

**UNIVERSIDAD DE INGENIERÍA Y TECNOLOGÍA**

**Carrera de Ingeniería Electrónica**



**DISEÑO DE UNA MÁQUINA DE  
MICROGRAVEDAD DE TRES GRADOS DE  
LIBERTAD**

Tesis para optar el título profesional de Ingeniero Electrónico

**Freddy Santos Rodríguez**

**Código 201210187**

**Asesor**

Arturo Rojas Moreno

Lima – Perú

Febrero 2020

La tesis

**DISEÑO DE UNA MÁQUINA DE MICROGRAVEDAD DE TRES GRADOS DE LIBERTAD**

Ha sido aprobada

-----

[Nombres y apellidos del Presidente de Jurado]

-----

Arturo Rojas Moreno

-----

[Nombres y apellidos del Tercer jurado]

*Dedicatoria:*

Para papá y mamá, no sería lo que soy si no fuera  
por ustedes, estaré eternamente agradecido.

*Agradecimientos:*

A mi familia por darme su apoyo incondicional, a mi asesor Arturo por sus buenos consejos, a todos mis profesores de UTEC por querer ver lo mejor de mí, y por último a mis amigos, por los ánimos durante esta larga aventura. Muchas gracias a todos.

# CONTENIDO

<b>RESUMEN .....</b>	<b>1</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>2</b>
<b>CAPÍTULO I .....</b>	<b>3</b>
<b>INTRODUCCIÓN</b>	
1.1 Historia de la Microgravedad y sus Máquinas.....	3
1.2 Formulación del Problema.....	6
1.3 Alcance .....	7
1.4 Objetivos.....	7
1.5 Organización.....	8
<b>CAPÍTULO II.....</b>	<b>9</b>
<b>MÁQUINAS DE MICROGRAVEDAD</b>	
2.1 ¿Qué es la Microgravedad?.....	9
2.2 ¿Qué son las Máquinas de Microgravedad? .....	10
2.3 Tipos de Máquinas de Microgravedad.....	11
2.3.1 Máquinas de Caída Libre .....	11
2.3.2 Máquinas Centrífugas .....	12
A. Clinostatos .....	12
B. Máquinas de Posicionamiento Aleatorio.....	16
C. Bioreactor RWV .....	19
2.4 Conceptos Relacionados a la Microgravedad .....	20
<b>CAPÍTULO III .....</b>	<b>24</b>
<b>MODELADO DE LA MÁQUINA DE MICROGRAVEDAD DE 3 GDL</b>	
3.1 Modelado cinemático de la máquina de microgravedad de 3GDL .	24
3.2 Modelado dinámico de los motores DC .....	28
<b>CAPÍTULO IV.....</b>	<b>30</b>
<b>SIMULACIÓN DE LA MÁQUINA DE MICROGRAVEDAD DE 3GDL</b>	
4.1 Simulación del modelo cinemático de la máquina de microgravedad.....	33
4.1.1 Simulación Modo Clinostato .....	33

4.1.2 Simulación Modo RPM .....	44
4.2 Simulación del modelo laplaciano de los motores DC .....	45
<b>CAPÍTULO V .....</b>	<b>46</b>
<b>DISCUSION DE RESULTADOS</b>	
5.1 Simulación Modo Clinostato .....	46
5.2 Simulación Modo RPM .....	48
<b>CAPÍTULO VI.....</b>	<b>49</b>
<b>CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS</b>	
6.1 Conclusiones .....	49
6.2 Trabajo Futuro .....	50
<b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>52</b>
<b>GLOSARIO DE TÉRMINOS .....</b>	<b>56</b>
<b>ANEXOS .....</b>	<b>57</b>
Anexo 1: Programas Fuente .....	57
Anexo 2: Construcción de la máquina de microgravedad.....	68

# ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1	Acción de la fuerza de la gravedad en relación a la altura desde el espacio hacia la tierra [42]. .....9
Figura 2	Clinostato de 3GDL [1] .....15
Figura 3	RPM 3D ubicada en DESC/ESA-ESTEC, Noordwijk, Holanda [30]. .....18
Figura 4	Aceleración residual $g'$ producida por fuerzas centrípetas en relación a la velocidad de rotación $w$ y a la ubicación de las muestras con respecto al punto de rotación [10]. .....19
Figura 5	Resumen de los principios de generación de gravedad reducida y los métodos utilizados. ....20
Figura 6	Esquema cinemático de la máquina de microgravedad de 3GDL .....25
Figura 7	Diagrama de flujo de la simulación en Matlab del modelo cinemático de la máquina de microgravedad de 3GDL .....31
Figura 8	Diagrama de flujo de la implementación con Raspberry Pi de la máquina de microgravedad de 3GDL .....32
Figura 9	Distribución del vector de gravedad (modo clinostato). .....34
Figura 10	Microgravedad simulada generada por la aceleración gravitacional. Rango visual de 5min (modo clinostato). .....35
Figura 11	Microgravedad simulada generada por la aceleración gravitacional. Rango visual de 1min 40s (modo clinostato). .....36
Figura 12	Microgravedad simulada generada por la aceleración no gravitacional (modo clinostato). .....37
Figura 13	Microgravedad simulada en modo clinostato para $R = 4:4$ . .....38
Figura 14	Microgravedad simulada en modo clinostato para $R = 4:4$ (acercamiento). .....38
Figura 15	Microgravedad simulada en modo clinostato para $R = 4:3$ . .....39
Figura 16	Microgravedad simulada en modo clinostato para $R = 4:3$ (acercamiento). .....39
Figura 17	Microgravedad simulada en modo clinostato para $R = 4:2$ . .....40

Figura 18	Microgravedad simulada en modo clinostato para $R = 4:2$ (acercamiento). .....	40
Figura 19	Microgravedad simulada en modo clinostato para $R = 4:1.8$ . .....	41
Figura 20	Microgravedad simulada en modo clinostato para $R = 4:1.8$ (acercamiento). .....	41
Figura 21	Microgravedad simulada en modo clinostato para $R = 4:1$ . .....	42
Figura 22	Microgravedad simulada en modo clinostato para $R = 4:1$ (acercamiento). .....	42
Figura 23	Microgravedad simulada en modo clinostato para $R = 4:0.2$ . .....	43
Figura 24	Microgravedad simulada en modo clinostato para $R = 4:0.2$ (acercamiento). .....	43
Figura 25	Microgravedad simulada en el modo RPM .....	44
Figura 26	Respuesta transitoria de la velocidad de los motores DC con control PID .....	45
Figura 27	Requerimientos físicos de la máquina de microgravedad de 3GDL. ....	68
Figura 28	Motores DC 12V GW4058-31Z .....	70
Figura 29	Slip ring MSC-22-24A .....	70
Figura 30	Raspberry Pi 3 B+ .....	71
Figura 31	Adafruit driver TB6612FNG .....	71
Figura 32	Pololu driver MC33926 .....	72
Figura 33	Sensor de orientación BNO055 .....	72
Figura 34	Esquema de la lógica de control de la máquina de microgravedad de 3GDL .....	73
Figura 35	Construcción de los marcos de cada GDL .....	74
Figura 36	Construcción de la base .....	74
Figura 37	Conexiones mecánicas con acoplamiento eje-bridado .....	74
Figura 38	Primeras pruebas de la máquina de 3GDL ensamblada. ....	75
Figura 39	Conexiones realizadas en los pines externos del Raspberry pi 3 B+ .....	76
Figura 40	Conexiones del driver TB6612FNG .....	77
Figura 41	Conexiones del driver MC33926 .....	77
Figura 42	Conexiones del sensor BNO055 .....	78



Figura 43	Distribución de las aceleraciones gravitacionales y no gravitacionales, y la microgravedad calculada a partir de los datos del sensor acelerómetro 3D.....	79
-----------	--	----

## ÍNDICE DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1 Comparación de resultados en las muestras y microgravedad simulada entre las máquinas de microgravedad más utilizadas en la actualidad [4].....	21
Tabla 2 Tiempo de Convergencia $T_g$ o tiempo en el que la Microgravedad $\mu g$ obtenida mediante simulación es menor a $10^{-4}g$ , y Microgravedad $\mu g$ obtenida luego de 24 horas de simulación en el modo Clinostato.....	48

## ÍNDICE DE ANEXOS

	Pág.
Anexo 1: Programas Fuente.....	57
Anexo 2: Construcción de la máquina de microgravedad. ....	68

# RESUMEN

Este trabajo de tesis plantea el diseño de una novedosa máquina de microgravedad centrífuga que consta de 3GDL (3 Grados de Libertad) y que se diferencia de sus similares por dos motivos principales: la máquina propuesta está diseñada para funcionar dentro de varios modelos de incubadoras comerciales, por lo que el coste de implementación es mucho menor; y el segundo motivo es que posee un grado de libertad adicional, el cual ha sido estudiado e implementado en [1], en donde se concluye que con este grado adicional se consigue menores valores de microgravedad, lo que significa mayor calidad de microgravedad.

El objetivo principal de este trabajo de tesis es obtener mediante simulaciones un valor de microgravedad entre  $10^{-4}g$  y  $10^{-5}g$ , valor establecido como óptimo para realizar pruebas biológicas con estas máquinas según el Profesor Julio Valdivia, Director de la Carrera de Bioingeniería de la Universidad de Ingeniería y Tecnología (UTEC). Para ello, primero se realizó el modelado cinemático de la máquina de microgravedad de 3GDL. A partir de este modelo se realizaron simulaciones en el programa Matlab para evaluar el desempeño en función de microgravedad obtenida de esta novedosa máquina. Las simulaciones se llevaron a cabo para los dos modos de funcionamiento de la máquina de microgravedad centrífuga, llamados Modo Clinostato y Modo RPM. La microgravedad o aceleración gravitacional obtenida para el caso del Modo Clinostato es menor a  $<0.221 \times 10^{-4}g$  luego de 24 horas de simulación; y para el caso del Modo RPM se obtuvo microgravedad de  $0.02g$  luego de 5 horas de simulación. Los resultados de microgravedad de ambos modos fueron comparados con los valores de microgravedad del Clinostato de [4] y el RPM de [5], mostrando una mejora en la calidad de microgravedad del 87% y 9.09% respectivamente.

Adicionalmente, se construyó un prototipo de la máquina de microgravedad. Se tomaron lecturas del sensor acelerómetro BNO055 y se obtuvo un resultado de  $0.1g$  luego de solo 8 min de simulación. Debido a que es el primero prototipo existen muchas mejoras posibles con componentes de mayor precisión para reproducir los valores de microgravedad obtenidos en simulación.

**Palabras clave:** microgravedad, clinostato de 3GDL, RPM de 3GDL, aceleración no gravitacional, artefactos (vibraciones no deseadas), tiempo de presentación del efecto de la gravedad, clinorotación.

# ABSTRACT

This thesis presents the design of a novel centrifuge microgravity machine which has 3DOF (3 Degrees of Freedom) and is different from similar models for two main reasons: the proposed machine is designed to work inside many different models of commercial incubators; therefore, the cost of implementation is much less because the dimensions of the machine are reduced. The second reason is that it possesses an additional DOF. According to the work developed in [1], with an additional DOF, lower values of microgravity can be achieved, resulting in a better microgravity quality.

The main objective of this thesis is to obtain through computer simulations a microgravity value between  $10^{-4}\text{g}$  and  $10^{-5}\text{g}$ , which is the optimal range for this value in order to make biological tests with this machine according to Professor Julio Valdivia, Director of the Bioengineering Career at the University of Engineering and Technology (UTEC). In order to achieve such a main objective, it is necessary to derive the kinematic model of the 3DOF microgravity machine. Using this kinematic model, many simulations were performed employing Matlab to evaluate the performance of the model and obtain the microgravity values for this machine. The simulation studies were done for the two working modes of this centrifuge machine, the Clinostat and RPM (Random Positioning Machine) modes. The microgravity value obtained for the Clinostat mode was below  $0.221 \times 10^{-4}\text{g}$  after 24 hours of simulation, and for the RPM mode, a microgravity value of  $0.02\text{g}$  was achieved after 5 hours of simulation. The results of microgravity from both modes were compared with the microgravity values of the Clinostat published in [4] and the RPM mentioned in [5], showing a notorious improvement in the quality of microgravity of 87% for the Clinostat mode and 9.09% for the RPM mode..

Additionally, a prototype for the microgravity machine was built. Data from the accelerometer BNO055 was taken and a result of  $0.1\text{g}$  was obtained after only 8 minutes of simulation. Due to the fact that this machine was the first prototype of its kind, many improvements, mainly of the mechanical type, must be done to boost the precision of the components in order to obtain higher quality of microgravity in real implementation.

**Keywords:** microgravity, 3DOF clinostat, 3DOF random positioning machine, non-gravitational acceleration, artifacts (unwanted vibrations), presentation time of the effect of gravity, clinorotation.

# CAPÍTULO I

## INTRODUCCIÓN

La importancia de tener menores valores de microgravedad producidos por estas máquinas es muy alta, debido a que los estudios realizados en el área de bioingeniería revelan valiosa información acerca del funcionamiento de todo tipo de microorganismos al ser expuestos a estas condiciones de ingravidez [19] [8]. Precisamente, muchos tipos de cánceres y tumores presentan un comportamiento anormal bajo estas condiciones [21] [18], generalmente terminando en recesión o incluso en la desaparición de los mismos [17]. Por ello, estas máquinas son una herramienta importante en la lucha por encontrar una cura contra estas patologías [20]. A continuación, se desarrollará más la importancia de estas máquinas y la relevancia en la comunidad científica a lo largo de la historia.

### **1.1 Historia de la Microgravedad y sus Máquinas.**

La gravedad es una de las cuatro interacciones fundamentales observadas en el universo y ha estado presente desde el comienzo de todo. Es lógico asumir que la gravedad ha jugado un rol importante en el desarrollo de la vida y quizás hasta en su creación. Esta idea ha motivado a lo largo de los años a muchos científicos a estudiar la relación entre la gravedad y los seres vivos, y aunque con limitaciones tecnológicas de la época, importantes descubrimientos en esta materia han sido realizados desde hace varias décadas como la determinación de los tiempos de presentación mediante la clinorotación [9] o las bases de la anulación del estímulo gravitatorio usando clinostatos [2] [13].

En 1973 se lanzó el programa US Skylab. Esta fecha marcó uno de los momentos iniciales en el que los seres humanos empezamos a experimentar los efectos de la exposición prolongada a un entorno de microgravedad, pero aún más importante fue descubrir que existe una relación entre la fuerza física generada por la gravedad y la función biológica [26] [22]. Pero, ¿qué es la microgravedad? La microgravedad es la interacción de atracción reducida de la gravedad con cualquier objeto con masa. Sin

embargo, este estado no se logra solo con permanecer a cierta altura de la Tierra, ya que por ejemplo a 400 km aún se experimenta el 90% de la gravedad terrestre, sino mediante la experimentación de la caída libre de los cuerpos en una órbita con altura constante alrededor de la Tierra. A través de experimentos realizados durante el Skylab se demostró que las células expuestas a microgravedad son fuertemente afectadas por los cambios físicos que ocurren en este entorno. Este trabajo creó los cimientos para posteriores experimentos que han examinado como la microgravedad afecta el crecimiento y el funcionamiento de células normales y cancerosas [15]. En los siguientes años hubo varios otros programas internacionales como el Space Shuttle en 1981, o el US Spacehab en 1993, durante los cuales se condujeron experimentos de la misma naturaleza, principalmente físicos y biológicos.

En 1998, la NASA (National Aeronautics and Space Administration) lanzó una misión de 16 días llamada STS-90. Uno de los experimentos llevados a cabo consistió en cultivar células humanas en el espacio por 6 días. Al regresar las muestras a la Tierra, se observó que 1632 de los 10000 genes habían sido alterados. Este fue el primer estudio que demostró que la gravedad reducida puede afectar un gran rango de genes [16].

Estos nuevos datos obtenidos sumados a los resultados de otros experimentos biológicos realizados en órbita generaron un creciente interés científico en estudiar el funcionamiento de diversos tipos de células cancerosas y la formación de tejido tumoral con el fin de desarrollar nuevas tecnologías o tratamientos que sean capaces de combatir estas enfermedades de manera eficaz [16].

La necesidad de realizar un mayor volumen de experimentos científicos en esta materia se vio fuertemente afectada por diversos motivos de índole económico, político y social de la época. En 1970, el costo de llevar una libra de masa a la órbita baja de la Tierra era aproximadamente de US \$1000, generando un coste aproximado de US \$8 millones por lanzamiento. El gobierno de Estados Unidos indicó que existía un sobre costo, limitando el financiamiento anual en el caso de nuevos programas como el Space Shuttle [28]. Los críticos de la época engrandecieron fuertemente las cifras, creando una ligera animosidad en la población contra el gobierno. También se alegó la existencia de burocracia no solo en la NASA, sino en todas las naciones con el poder de

realizar lanzamientos espaciales, indicando que los presupuestos para realizar viajes espaciales eran incrementados innecesariamente por el costo de los científicos, consultores, y administradores que en realidad no eran relevantes para llevar a cabo los lanzamientos [29].

Esta problemática condujo a la comunidad científica a encontrar otras maneras de simular el entorno microgravedad espacial en la Tierra, y eventualmente, a la creación de equipos llamados *máquinas de microgravedad*. Curiosamente, estos aparatos habían existido desde hace casi un siglo y medio, incluso habían sido ideados mucho antes por Denis Dodart en 1703 [37]. El inventor de la primera máquina de microgravedad fue Julius von Sachs, un botánico alemán quien en 1879 creó una máquina rotativa cuyo mecanismo era similar al de un reloj. A esta máquina le dio el nombre de '*klinostat*', actualmente conocida como clinostato [38]. El clinostato de Sachs tenía como finalidad estudiar el crecimiento de las plantas, las cuales giraban lentamente en conjunto con el eje de rotación de la máquina mientras eran expuestas a los rayos del sol. El método que emplea este clinostato para simular microgravedad es conocido como 'clinorotación', método en el cual el valor neto de la acción de gravedad en una muestra tiende a cero.

En base a este invento se desarrollaron nuevas máquinas con un principio de funcionamiento rotativo similar, formando un grupo de máquinas de microgravedad llamadas 'centrífugas' [15], pero también de nuevas tecnologías y técnicas que generarían la creación de nuevas máquinas de microgravedad.

Cada tipo de máquina de microgravedad tiene sus propias ventajas y limitaciones, pero varios trabajos como [6] y [7] concuerdan que las máquinas de microgravedad pertenecientes al grupo de centrífugas son las máquinas más apropiadas para simular ingravidez y que debe ser prioridad realizar estudios previos en estas máquinas antes de llevar muestras en viajes espaciales para que sean analizadas tan como se afirma en [10], [13], [14], [33]; esto sumado al relativo bajo coste de implementación y mantenimiento, hacen que las máquinas centrífugas sean una excelente opción para los investigadores. No obstante, la optimización del funcionamiento del grupo de centrífugas aún continúa hasta el día de hoy como en [24], [25], generando cada vez mejor calidad de microgravedad simulada con el fin de



producir resultados similares a los obtenidos en las estaciones espaciales. Dentro del grupo de las centrífugas, existen dos principales subgrupos: los clinostatos y los RPM (Random Positioning Machine) o máquinas de posicionamiento aleatorio por sus siglas en inglés. Las máquinas de estos dos subgrupos simulan un entorno de microgravedad mediante rotaciones, la única diferencia reside en el método. En otras palabras, físicamente un clinostato puede comportarse como un RPM o viceversa dependiendo del control del sentido de giro que se tenga sobre la máquina. Quizás es por ello que no existe un consenso general acerca de cómo llamar a este grupo de máquinas. En este trabajo se denominan como un grupo de máquinas centrífugas, pero también se pueden llamar simplemente clinostatos o clinostatos 3D (3 Dimensiones) [12].

En los subgrupos de clinostatos y RPM también existen diversas clasificaciones, una de ellas es por los grados de libertad (GDL). Generalmente estas máquinas poseen dos grados de libertad, ya que esta condición es suficiente para producir y estudiar cultivos en 3D. No obstante, [1] es el único precedente encontrado de una máquina de microgravedad de 3GDL validada por estudios biológicos que afirma que es posible obtener microgravedad simulada entre  $10^{-5}$  y  $10^{-6}$  g, sin embargo, la información de cómo se obtienen esos valores no es mostrada.

## **1.2 Formulación del Problema**

Este trabajo se centra en desarrollar una máquina de microgravedad de 3GDL, con rasgos únicos que la diferencia de cualquier modelo debido a lo expuesto anteriormente, pero que en resumen se puede decir que, la finalidad de esta máquina es generar un prototipo con las características más importantes como la facilidad de implementación y un mejor costo beneficio de la máquina, con la finalidad de poner las bases que permiten construir prototipos más avanzados y que puedan implementarse en un laboratorio real de bioingeniería. La máquina de microgravedad de 3GDL propuesta está diseñada para poder ubicarse dentro las incubadoras con modelos SCO5W (3517), SCO5W-2 (3517-2), SCO10W (3524) y SCO10W-2 (3524-2), por lo que consta de un tamaño reducido y portable, además de poseer la habilidad de cambiar entre dos métodos de operación debido a su programación: el modo clinostato y el modo RPM. Con estas características, el rango de estudios que se puede realizar es mayor. Este

modelo de máquina permite estudiar el comportamiento de más tipos de microorganismos patológicos sometidos a microgravedad, con la finalidad de hallar una manera de detener su avance y/o eliminar la amenaza que representan para los seres humanos.

### **1.3 Alcance**

Este trabajo presenta el diseño, la simulación y la implementación de una novedosa máquina de microgravedad de 3GDL que espera obtener microgravedad del orden de  $10^{-4}$  y  $10^{-5}$ g. La investigación se centra en obtener mejores valores de microgravedad, ya que esto significaría que las respuestas biológicas en las pruebas se asemejarían más a las obtenidas en el espacio [40]. El laboratorio de Bioingeniería de UTEC está equipado con una incubadora SCO5W donde se puede realizar pruebas biológicas posteriormente, sin embargo la validación biológica esta fuera del alcance de esta tesis. La validación de esta máquina se realizará mediante comparaciones del valor de microgravedad obtenida en la simulación con otros trabajos similares. Adicionalmente, en el Anexo 2 se pueden ver los resultados de gravedad obtenidos de la implementación de máquina, brindados por las lecturas del sensor de orientación BNO055 de Adafruit.

### **1.4 Objetivos**

El objetivo principal de este trabajo es generar, mediante la simulación e implementación de esta máquina, un entorno de microgravedad simulada cuyo valor se encuentre entre  $10^{-4}$  y  $10^{-5}$ g.

#### **1.4.1 Objetivos específicos:**

- Modelar la máquina de microgravedad de 3GDL.
- Simular la máquina de microgravedad de 3GDL.
- Implementar un test de pruebas.
- Comparar el resultado de microgravedad en simulación con máquinas de microgravedad de otros trabajos.
- Diseñar y construir la máquina de microgravedad.

## **1.5 Organización**

En el Capítulo II se explica en detalle las máquinas de microgravedad, sus tipos, usos, modos de operación, etc., con el fin de entender mejor el estado de importancia actual de estas máquinas, así como de poder diferenciar las ventajas y desventajas de cada una.

En el Capítulo III se presenta el modelado de la máquina de microgravedad de 3GDL. El modelado consta de dos partes importantes: el modelado cinemático de la máquina, el cual consiste en la descripción del movimiento de la máquina, y el modelado dinámico de los motores, a partir del cual se inicia el proceso de control de velocidad con un algoritmo de control PID.

El Capítulo IV muestra la simulación de la máquina de microgravedad, la cual consiste en evaluar posibles valores de microgravedad para diferentes parámetros de simulación; y también se muestra la simulación del control de los motores DC a partir del modelado obtenido en el capítulo anterior.

En el Capítulo V se muestra un análisis detallado de los resultados obtenidos de la simulación de la máquina, se lleva a cabo una comparación de los valores de microgravedad y se estudia las causas que llevaron a conseguir una mejora en la calidad de microgravedad.

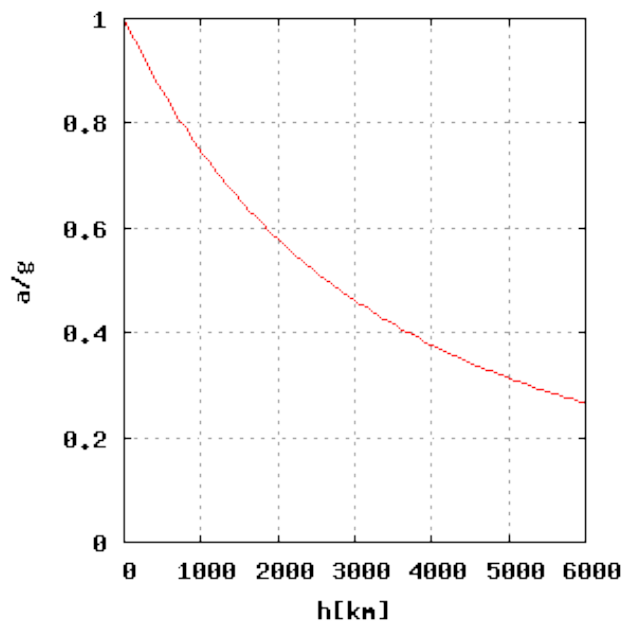
En el Capítulo VI se muestran las conclusiones obtenidas en este trabajo y recomendaciones para un trabajo futuro. Las conclusiones están basadas en los objetivos planteados en este capítulo, y se obtienen principalmente de la simulación de la máquina, demostrando el potencial de implementación real que esta máquina posee.

# CAPÍTULO II

## MÁQUINAS DE MICROGRAVEDAD

### 2.1 ¿Qué es la Microgravedad?

Antes de explicar las máquinas de microgravedad, hay que entender que es microgravedad. La microgravedad es un fenómeno que se lleva a cabo en el espacio debido a la reducción de la acción de la fuerza gravitatoria de la Tierra tal como se muestra en la siguiente Figura 1. El término de microgravedad generalmente se refiere a la microgravedad real obtenida en el espacio. En esta tesis existen dos tipos de microgravedad, la microgravedad real experimentada en el espacio y la microgravedad simulada, obtenida en la Tierra.



**Figura 1 Acción de la fuerza de la gravedad en relación a la altura desde el espacio hacia la tierra [42].**

En la Tierra, todos experimentamos la fuerza de la gravedad,  $9.8\text{ms}^{-2}$ , la cual hace que los elementos tengan un peso determinado. En términos físicos, se puede decir que todo organismo u objeto experimenta 1G a nivel terrestre. Este valor va disminuyendo a medida que nos alejamos de la Tierra.

La órbita baja y la órbita alta son orbitas alrededor de la Tierra en la que se encuentran casi todos los elementos llevados al espacio por el ser humano. La principal ventaja de estas órbitas es que permiten que los elementos que se encuentren en ellas mantenerse en caída libre hacia la Tierra, pero con una dirección y velocidad controladas, de manera que se necesite el mínimo esfuerzo para mantener una trayectoria circular alrededor de la Tierra.

Por lo tanto, a nivel de altura como por ejemplo, de la ISS (International Space Station) o Estación Espacial Internacional, se puede experimentar microgravedad real del orden de  $10^{-7}g$  [15]. Las máquinas de microgravedad buscan simular este entorno de microgravedad real a nivel terrestre debido a limitaciones de diversa índole, número de investigaciones y el coste de realizarlas como se detalla en el Capítulo I.

En principio, se intentó obtener microgravedad simulada llevando a cabo estudios expuestos a caída libre empleando vuelos parabólicos. Sin embargo, éstos solo permiten llevar a cabo investigaciones en un periodo de tiempo muy corto, limitado por la duración del descenso de los vuelos parabólicos. Adicionalmente, el problema de la oportunidad de realizar estudios y el coste no se vio resuelto completamente. Por esta razón, nacieron diversos tipos de máquinas de microgravedad que emplean diversos métodos, todos con la misma finalidad, la obtención de microgravedad simulada.

## **2.2 ¿Qué son las Máquinas de Microgravedad?**

Las máquinas de microgravedad son todo tipo de equipos con la capacidad de reproducir un entorno de microgravedad espacial a nivel terrestre, anulando la acción de la gravedad en los sistemas biológicos en estudio generalmente son microorganismos [31]. La certeza de que estos equipos funcionan proviene de la corroboración de estudios realizados en el espacio con los que se hacen en la Tierra actualmente con estas máquinas, de manera que la similitud de los experimentos y los resultados obtenidos aseguran que las muestras biológicas perciben un estado de ingravidez.

## 2.3 Tipos de Máquinas de Microgravedad

Existen diversas maneras de clasificar las máquinas de microgravedad. La principal clasificación se debe a su principio de funcionamiento. Existen dos principios fundamentales de simulación: el FF (Free Fall) o caída libre, o el TGA (Time Gravity Averaging) o promedio del vector de gravedad en el tiempo.

### 2.3.1 Máquinas de Caída Libre

Las máquinas de microgravedad que emplean el FF son conocidas como máquinas de caída libre, las cuales consisten en permitir a las muestras experimentar períodos de simulación de microgravedad mediante la exposición a caída libre.

#### A. Torres de caída libre

En las torres de caída o *drop towers* es posible exponer muestras a caída libre. Las muestras poseen las mismas condiciones que las generadas en el espacio, sin embargo, el tiempo de simulación es demasiado corto, debido a que depende del tiempo que demore en caer la muestra desde una altura hasta la Tierra.

#### B. Vuelos parabólicos

Los vuelos parabólicos se llevan a cabo con una aeronave capaz de elevarse hasta la órbita baja de la Tierra (15000 km) con la finalidad de realizar un vuelo alternante en alturas hacia la Tierra, de esta manera en el tiempo del descenso es posible simular caída libre. Este método presenta limitaciones como el tiempo por dos motivos: el tiempo de descenso es corto y depende de la planificación de vuelo de la aeronave, y por el tiempo de vuelo total limitado por la cantidad de combustible que la aeronave es capaz de llevar. Otra limitación es la misma alternación, ya que una vez que termina el tiempo de descenso, la aeronave debe volver a su altura inicial o al punto de inicio donde empezó el descenso, y durante esta maniobra el efecto sobre las muestra es inverso, se produce hipergravedad, La hipergravedad es la definición opuesta a la microgravedad. Ocurre cuando los cuerpos son sometidos a fuerzas que los sometan a aceleraciones superiores a  $9\text{m/s}^2$ .

### **C. Levitación Magnética o Diamagnética**

Los levitadores magnéticos emplean fuertes campos magnéticos para generar fuerzas opuestas sobre las muestras las cuales sumándose deben equiparar a la fuerza generada por la gravedad en la muestra con el fin de anularse entre ellas, de esta manera las muestras quedan suspendidas. También son referidos como levitadores diamagnéticos debido a que las muestras biológicas son organismos diamagnéticos. Este método presenta una gran compatibilidad con respecto a los efectos físicos producidos por la microgravedad real en el espacio sobre las muestras analizadas. Sin embargo, las máquinas levitadoras presentan limitaciones generadas por los fuertes campos magnéticos. El peso de las muestras analizadas no pueden ser superiores a 1 gramo, por lo que el espacio de pruebas es muy reducido y no permite analizar muestras de mayor tamaño. Por último, los fuertes campos magnéticos producen efectos en las muestras que no han sido observados en el espacio [30].

### **2.3.2 Máquinas Centrífugas**

Por otro lado, las máquinas que utilizan el TGA son conocidas como máquinas centrífugas, también conocidas como máquinas TGA (*TGA machines*) o máquinas centrífugas (*Centrifuges*). Estas máquinas basan su funcionamiento en el desplazamiento rotacional de la muestra, con la finalidad de redireccionar el vector de gravedad de estas y obtener la dirección promedio a lo largo del tiempo de simulación [39].

#### **A. Clinostatos**

Los clinostatos son máquinas que someten a rotaciones a las muestras con el fin de redireccionar el vector de gravedad y obtener un promedio de dirección de este vector cercano a cero. Los clinostatos tienen tres tipos de clasificación: por sus grados de libertad, por las dimensiones de la posición del vector de gravedad y por la velocidad de rotación. La principal característica de los clinostatos es que su rotación, conocida también como clinorotación, se produce de manera constante y en un solo sentido de giro.

## **Clasificación de clinostatos por sus grados de libertad:**

### **I. Clinostato de 1GDL**

Los clinostatos de un solo grado de libertad son el tipo más antiguo de clinostatos. El primer clinostato fue un clinostato de 1GDL inventado por Von Sachs. El funcionamiento de este tipo de máquina consta únicamente en emplear la clinorotación en las muestras. Debido a que solo posee 1GDL, el movimiento de las muestras está limitado por el espacio en los extremos del eje de rotación, pero aún más importante, este modelo solo puede redireccionar el vector de gravedad en una trayectoria circular, por ello, emplear este modelo de clinostatos generaría efectos físicos de forma en las muestras no observados en microgravedad real.

Este tipo de clinostatos fueron utilizados inicialmente por Sachs para estudiar el crecimiento de diversos tipos de plantas expuestas a los rayos del sol mientras eran sometidas a clinorotación. Los bioreactores RWV pueden ser incluidos en esta categoría debido a que solo poseen un 1GDL con el cual llevan a cabo la clinorotación, sin embargo, existen diferencias marcadas en otros aspectos que hacen que los bioreactores RWV sean considerados aparte.

### **II. Clinostato de 2GDL**

Los clinostatos de dos grados de libertad son una de las máquinas más conocidas en el área de bioingeniería relacionada con la microgravedad simulada. También es la máquina con mayor aceptación en la comunidad científica para realizar estudios preliminares debido a su simplicidad, eficacia y gran rango de muestras biológicas que es capaz de simular [7].

Este tipo de máquinas consta de armazones también conocidos como marcos de rotación, la traducción literal de *Rotational frames*, manera como estos elementos son comúnmente llamados en los trabajos de investigación en inglés. Poseen ejes de rotación coincidentes y ortogonales entre sí que permiten obtener una versión más real de la microgravedad simulada debido al efecto tridimensional que ejerce sobre el crecimiento de las muestras, comportamiento similar a las muestras en microgravedad real. Cabe resaltar que la cantidad



mínima de grados de libertad necesaria para producir omnilateralidad en la dirección del vector de gravedad es dos, quizás es por ello que a lo largo del tiempo no se ha habido un notable interés en generar clinostatos con mayores grados de libertad, sino en perfeccionar el control de dirección que clinostatos de 2GDL poseen para obtener mejor microgravedad simulada.

### **III. Clinostato de 3GDL**

Los clinostatos de 3GDL son una clase nueva de clinostatos de los últimos años. En la investigación realizada por este trabajo se ha encontrado escasa información acerca de esta nueva clase. El precedente de esta moderna máquina que posee una incubadora en su interior capaz de brindar las condiciones ambientales a las muestras como humedad y nivel de CO<sub>2</sub>, afirma obtener microgravedad del orden de 10<sup>-5</sup>g y 10<sup>-6</sup>g debido al nuevo grado de libertad que la máquina posee [1]. Generalmente los clinostatos contienen incubadoras en su interior, las cuales giran de acuerdo a la velocidad de los ejes de los clinostatos, y brindan las condiciones necesarias a las muestras biológicas para sobrevivir durante el periodo de simulación. A primera vista, las razones por las cuales aparentemente un grado de libertad adicional podría generar microgravedad simulada de mejor calidad no quedan dilucidadas para el lector, sin embargo, en el Capítulo IV se demuestra mediante simulaciones que al añadir un grado de libertad adicional a un clinostato de 2GDL genera patrones de movimiento más complejos que alteran la dirección del vector de gravedad con mayor eficacia en el mismo tiempo de simulación. Este precedente ha servido en gran medida de inspiración para llevar a cabo la realización de este trabajo [27].



**Figura 2 Clinostato de 3GDL [1]**

La máquina de microgravedad de 3GDL de esta tesis posee una principal diferencia que la vuelve única, está diseñada para caber dentro un importante número de incubadoras, eliminando el problema del peso del equipo que es necesario girar, e inevitablemente, reduciendo drásticamente los requerimientos de las piezas eléctricas y mecánicas que conforman la máquina.

### **Clasificación de clinostatos por la dimensión de la posición del vector de gravedad:**

#### **I. Clinostato 1D**

Los clinostatos 1D hacen referencia a la dirección del vector de gravedad a lo largo de la muestra. La orientación del vector de gravedad no cambia a lo largo de la simulación. Sin embargo, este modelo tiene la facilidad de simular entornos de gravedad parcial como la que existe en Marte o en la Luna alterando el ángulo del eje de rotación con respecto a la Tierra [41].

#### **II. Clinostato 2D**

Los clinostatos 2D poseen un plano por el cual es desplazado el vector de gravedad. Los clinostatos de 1GDL que emplean la clinorotación se encuentran en esta categoría, debido a que la trayectoria circular trazada por el redireccionamiento del vector de gravedad se encuentra en un plano.

### **III. Clinostato 3D**

Los clinostatos 3D son los más comunes en la actualidad. En esta categoría se encuentran los clinostatos de 2GDL y de 3GDL, debido a que la trayectoria trazada por el vector de gravedad produce una esfera, el cual se considera un espacio tridimensional.

#### **Clasificación de clinostatos por la velocidad de rotación:**

##### **I. Clinostato lento**

Los clinostatos lentos poseen una velocidad de rotación entre 0.25 y 4 rpm. El factor de la velocidad juega un papel importante debido a la presencia de fuerzas centrífugas en las muestras a medida que uno se aleja del eje de rotación [32]. Por ello, para muestras células u órganos con una distancia significativa con respecto al eje de rotación, la velocidad mencionada es aplicable y el clinostato sería denominado clinostato lento [36].

##### **II. Clinostato rápido**

Los clinostatos rápidos poseen un velocidad de rotación entre 55 – 120 rpm [36]. Teóricamente no existe un límite inferior ni superior de la velocidad de rotación que estos clinostatos pueden alcanzar. Esto se debe a que la velocidad de rotación de los clinostatos rápidos, al igual que la de todos los clinostatos está ligada al tiempo de respuesta de los órganos o células sensibles a los cambios de orientación las cuales son únicas para cada organismo [11]. Este tipo de clinostatos ha sido utilizado desde 1965 y es considerado una herramienta valiosa para evaluar la sensibilidad de un organismo expuesto a cambios gravitacionales [35].

#### **B. Máquinas de Posicionamiento Aleatorio**

Las máquinas de posicionamiento aleatorio o *RPM (Random Positioning Machines por sus siglas en inglés)* son máquinas que, al igual que los clinostatos, simulan microgravedad mediante movimientos rotacionales de las muestras, pero la diferencia radica en los cambios de sentido de giro que se producen de manera aleatoria mediante un conocido algoritmo llamado *Random*

*Walker* [3]. El Random Walker o caminante aleatorio es un algoritmo que genera valores aleatorios de desplazamiento, en este caso, aplicado a la dirección del vector de gravedad en el tiempo. La razón por la cual se cambia el sentido de giro en tiempos aleatorios es para evitar lo que se conoce como sedimentación [15], en otras palabras, para evitar que los organismos vivos se adapten a las condiciones generadas por una rotación constante [12]. Adicionalmente, los RPMs poseen velocidades iguales para cada GDL, a diferencia de los clinostatos cuyas velocidades son generalmente distintas en cada grado de libertad. Al igual que los clinostatos, se clasifican por sus grados de libertad (aunque no es común), por la dimensiones de la posición del vector de gravedad y por la velocidad de rotación.

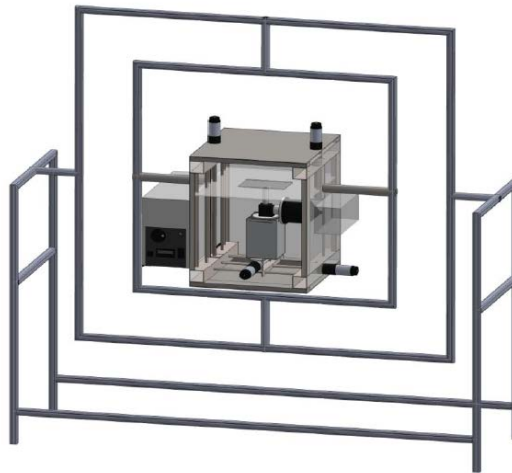
### **Clasificación de RPMs por sus grados de libertad:**

#### **I. RPM de 2GDL**

Los RPM de 2GDL son los modelos más comunes de RPM. Poseen las mismas características físicas de los clinostatos con la principal diferencia en el algoritmo de reposicionamiento aleatorio.

#### **II. RPM de 3GDL**

El único precedente encontrado acerca de este tipo de máquina es igual al del clinostato de 3GDL observado en la Figura 3, debido a que la máquina diseñada es capaz de producir los patrones de los clinostatos y los movimientos aleatorios de un RPM [1], [25].



**Figura 3 RPM 3D ubicada en DESC/ESA-ESTEC, Noordwijk, Holanda [30].**

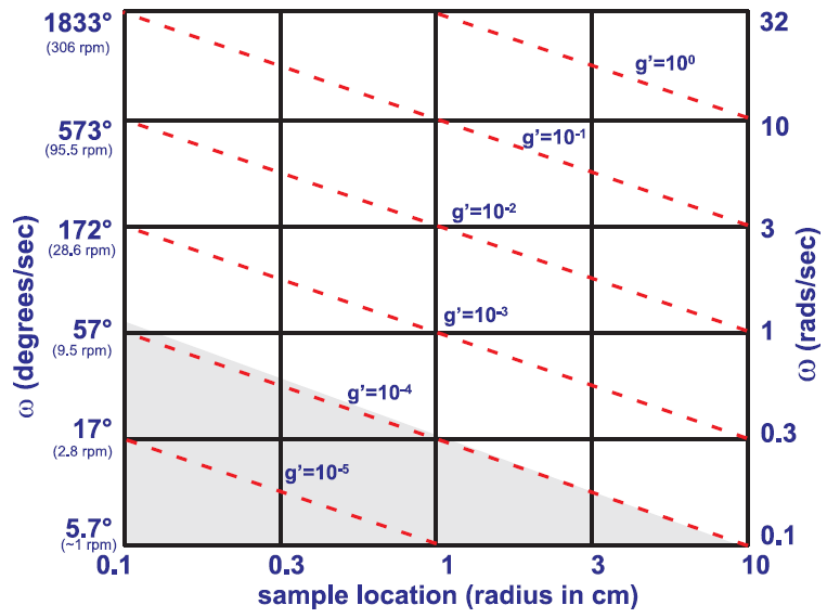
**Clasificación de RPMs por la dimensión de la posición del vector de gravedad:**

#### **I. RPM 3D**

Todos los RPMs encontrados durante la investigación son 3D. Esto se debe a que obtener omnilateralidad en la dirección del vector de gravedad se vuelve una tarea mucho más complicada cuando la trayectoria debe ser un plano tridimensional, en contraste con los modelos 2D, que solo se necesita una vuelta completa de las muestras para obtener un promedio neto de la dirección del vector de gravedad igual a cero.

**Clasificación de los RPMs por la velocidad de rotación:**

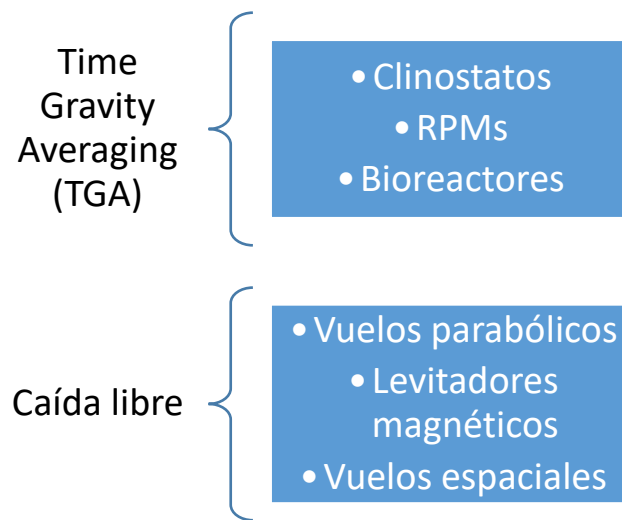
A diferencia de los clinostatos lentos o rápidos, los RPM no han sido definidos con velocidades que los definan como rápidos o lentos. El análisis realizado con respecto a su velocidad de rotación se hizo para determinar el impacto de esta misma y de la ubicación de la muestra en la generación de aceleraciones residuales que intervienen en la generación de microgravedad simulada.



**Figura 4** Aceleración residual  $g'$  producida por fuerzas centrípetas en relación a la velocidad de rotación  $\omega$  y a la ubicación de las muestras con respecto al punto de rotación [10].

### C. Bioreactor RWV

El bioreactor RWV (*Rotating Wall Vessel*) es del tipo de contenedores que operan únicamente mediante la clinorrotación. Son considerados un tipo especializado de clinostato debido a que permite oxigenación membranal de las muestras, rasgo que no presentan los clinostatos o RPMs [15]. Sin embargo, también posee limitaciones debido a su diseño que no le permite utilizar portaobjetos de vidrio de una sola capa que contengan muestras.



**Figura 5 Resumen de los principios de generación de gravedad reducida y los métodos utilizados.**

## 2.4 Conceptos Relacionados a la Microgravedad

### 2.4.1 Validación físico-matemática de las máquinas de microgravedad

Las máquinas de microgravedad han sido analizadas a lo largo del tiempo por numerosos trabajos que concuerdan que estas máquinas son de gran utilidad para llevar a cabo estudios biológicos, sin embargo, afirman que estos estudios deben ser preliminares. Esto es debido a que actualmente ninguna máquina ha sido capaz de simular todas las características propias del entorno espacial, debido a que este es un ambiente único descrito como espacio donde las aceleraciones dependientes de la masa de los cuerpos no exceden cierto nivel de ruido [30], generalmente entre  $10^{-5}$  y  $10^{-6}$  g.

Existen indicadores que evalúan el desempeño de las máquinas de microgravedad. Aunque no existe un consenso acerca de estos indicadores, a lo largo del tiempo se ha evaluado cada aspecto de estas máquinas con el fin de evolucionar los equipos para que produzcan mejores resultados. Estos indicadores son: el crecimiento 3D de las muestras, las fuerzas cortantes de los fluidos que contienen las muestras y la transferencia masiva de nutrientes y desperdicios [15]. Adicionalmente, existen estudios que calculan el promedio en

el tiempo de microgravedad simulada de equipos como los clinostatos 3D y RPMs [4], [5].

En la tabla 1 se puede observar un cuadro comparativo entre las máquinas de microgravedad utilizadas en la actualidad y una evaluación del desempeño que posee cada modelo acerca de cada característica mencionada.

**Tabla 1 Comparación de resultados en las muestras y microgravedad simulada entre las máquinas de microgravedad más utilizadas en la actualidad [4].**

<i>Máquina de cultivo / Indicador</i>	<i>Microgravedad espacial</i>	<i>Cultivo de una sola capa</i>	<i>Levitadores magnéticos o diamagnéticos</i>	<i>Clinostatos</i>	<i>RPMs</i>	<i>Bioreactor RWV</i>
<b>Crecimiento 3D</b>	+	-	+	+	+	+
<b>Fuerzas cortantes del fluido</b>	-	-	-	+	+	+
<b>Sedimentación</b>	-	+	+	+	-	-
<b>Transferencia másica de nutrientes y desechos</b>	Limitante si no se programa cambios en el medio de cultivo	No es limitante	Limitante si no se programa cambios en el medio de cultivo	No es limitante	No es limitante	No es limitante
<b>Valor de microgravedad simulada promedio</b>	$10^{-6}g \sim 10^{-7}g$	1g	$\sim 10^{-2}g + 10^{-2}g/mm$	$10^{-3}g \sim 3.3 \times 10^{-4}g$	$10 \times 10^{-2}g \sim 3 \times 10^{-2}g$	<i>No especificada</i>



#### **2.4.2 Validación biológica de las máquinas de microgravedad**

La validación biológica de las máquinas de microgravedad es el último filtro que las máquinas deben pasar para ser aceptadas en la comunidad científica de esta área. Afortunadamente, todos los métodos empleados por las máquinas de microgravedad han sido validados biológicamente incontables veces no solo corroborando su eficacia como en [23] y [34], sino promoviendo su utilización, especialmente en el caso de los clinostatos y RPM, debido a que son máquinas que han demostrado ser capaces de producir efectos similares a los obtenidos en microgravedad real para un gran rango de microorganismos, genes y sistemas vivos completos a un bajo coste [6], [7].

#### **2.4.3 Tiempos de presentación**

Los tiempos de presentación son la mínima cantidad de tiempo necesario para producir una respuesta gravitrópica en algún organismo. En 1992 Hatton calculó por primera vez el tiempo de presentación de una respuesta gravitrópica de un hongo [9]. En este estudio indica que los tiempos de presentación por ejemplo, en el caso de las plantas, están en un promedio de 4 min, sin embargo pueden llegar a ser tan cortos como 10s o 15s.

La razón por la cual los tiempos de presentación son importantes es porque al saber cuál es el tiempo mínimo que necesita un organismo para responder a la acción de la gravedad sobre él, se puede variar la velocidad de rotación mínima en el caso de las máquinas centrífugas que evite que las respuestas gravitrópicas se lleven a cabo redireccionando el vector de gravedad de la muestra de manera precisa en un tiempo menor al del tiempo de presentación; en el caso de los RPM el tiempo de evaluación del cambio de dirección aleatorio debería ser menor que los tiempos de presentación de las muestras para evitar que estos organismos se adapten a las rotaciones [12].

#### **2.4.5 Artefactos**

Las vibraciones no deseadas transmitidas por los mismos equipos a las muestras son conocidas como artefactos. Los artefactos moldean las estructuras tridimensionales en formas irregulares [1]. Estos defectos físicos se generan

principalmente en los RPM, debido a que estas máquinas sufren cambios en el sentido de giro continuos a lo largo de la simulación, lo cual si bien previene la sedimentación en algunas muestras biológicas, si el cambio no es suave genera estas vibraciones o artefactos los cuales pueden generar resultados erróneos en los estudios de bioingeniería. Como se puede suponer, la presencia de artefactos está estrechamente ligada a la velocidad de rotación angular de las muestras y al modo de operación de las máquinas de microgravedad.

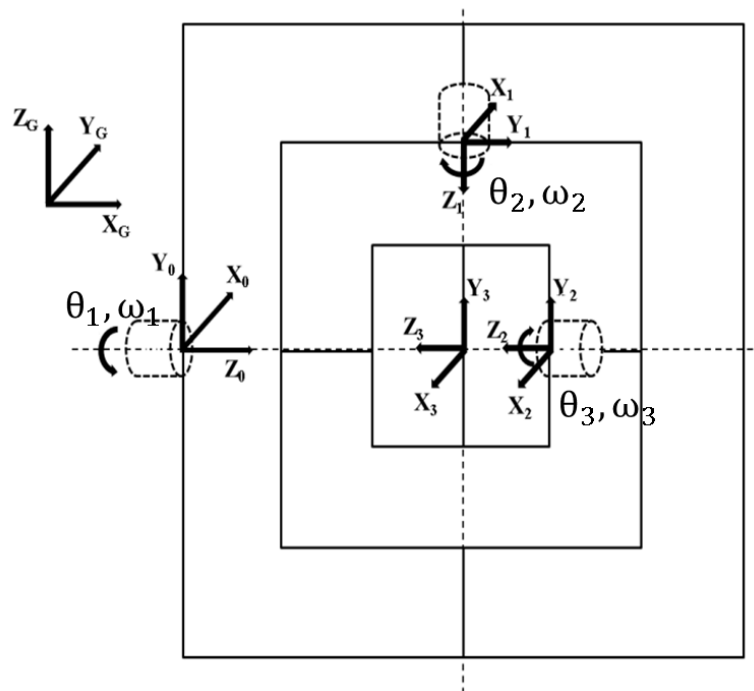
# CAPÍTULO III

## MODELADO DE LA MÁQUINA DE MICROGRAVEDAD DE 3 GDL

Este capítulo muestra la obtención del modelo cinemático de la máquina de microgravedad de 3GDL y del modelo continuo de los motores DC. Se formulan las ecuaciones pertinentes que describen los sistemas de manera apropiada con el fin de garantizar un simulaciones precisas que reflejen el comportamiento de la máquina de microgravedad de 3GDL.

### **3.1 Modelado cinemático de la máquina de microgravedad de 3GDL**

El modelo cinemático es el conjunto de ecuaciones que describen el movimiento en el tiempo de un sistema. En el caso de este trabajo, es necesario conocer la orientación y posición del último eslabón de la máquina de microgravedad de 3GDL, también conocido como efector final. En la Figura 6 se puede ver que existen 5 sistemas de referencia. El sistema de referencia global 'G', es decir, 'G' es el lugar en el espacio externo a la máquina llamado marco global. Los sistemas de referencia '0', '1' y '2' pertenecen a los motores 1, 2 y 3 respectivamente. Por último, el sistema de referencia 3 se encuentra exactamente en el centro de la máquina, y se considera a este sistema de referencia como la orientación del efector final.



**Figura 6 Esquema cinemático de la máquina de microgravedad de 3GDL**

El esquema cinemático presentado en la Figura 6 muestra las orientaciones de los sistemas de referencia G, 0, 1, 2 y 3, la ubicación inicial y sentido de giro de los motores, y las variables como la posición y velocidad angular de cada motor DC. Inicialmente tenemos el vector de gravedad  $\vec{g}_G$  en el marco global G, el cual es el plano estático donde se encuentra el observador. El valor negativo en la tercera fila de  $\vec{g}_G$  indica la dirección del vector de gravedad, siguiendo el sistema de referencia G, mostrado en la Figura 6.

$$\vec{g}_G = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

La orientación del vector de gravedad en el marco global se describe en (1). Ahora, el siguiente objetivo es trasladar la orientación de este vector al sistema de referencia 3, el cual es el lugar de interés porque es donde se sitúan las muestras biológicas en los estudios de bioingeniería, por ende, es necesario conocer la orientación del vector de gravedad en este sistema de referencia en esta máquina de microgravedad de 3GDL.

Para obtener la orientación del vector de gravedad en el sistema de referencia 3 es necesario multiplicar las correspondientes matrices de rotación  $R_2^3$ ,  $R_1^2$ ,  $R_0^1$  y  $R_G^0$  por el vector de gravedad en el marco global G como se muestra en (2).

$$\vec{g}_3(t) = R_2^3 R_1^2 R_0^1 R_G^0 \vec{g}_G \quad (2)$$

La primera matriz de rotación es una matriz de identidad, debido a que no existe ninguna rotación entre los sistemas de referencia 3 y 2 como se puede ver en la Figura 6.

$$R_2^3 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

Las siguientes matrices de rotación describen la acción de los motores en los sistemas de referencia 0, 1 y 2 junto la rotación entre sistemas de referencia 2 y 1, 1 y 0, y 0 y G respectivamente.

$$R_1^2 = \begin{bmatrix} -c_{\theta_3} & 0 & -s_{\theta_3} \\ -s_{\theta_3} & 0 & -c_{\theta_3} \\ 0 & -1 & 0 \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$R_0^1 = \begin{bmatrix} c_{\theta_2} & 0 & -s_{\theta_2} \\ s_{\theta_2} & 0 & c_{\theta_2} \\ 0 & -1 & 0 \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$R_G^0 = \begin{bmatrix} 0 & c_{\theta_1} & -s_{\theta_1} \\ 0 & s_{\theta_1} & c_{\theta_1} \\ 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (6)$$

Finalmente, reemplazando las matrices de rotación se obtiene (7), la cual describe la orientación del vector de gravedad del marco global en el marco 3 en función de la posiciones  $\theta_1$ ,  $\theta_2$  y  $\theta_3$  de los motores 1, 2 y 3 respectivamente.

$$\vec{g}_3(t) = \begin{bmatrix} g_{3x} \\ g_{3y} \\ g_{3z} \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$\vec{g}_3(t) = \begin{bmatrix} c_{\theta_1} s_{\theta_3} - c_{\theta_2} c_{\theta_3} s_{\theta_1} \\ -c_{\theta_1} c_{\theta_3} - c_{\theta_2} s_{\theta_1} s_{\theta_3} \\ -s_{\theta_1} s_{\theta_2} \end{bmatrix} \quad (8)$$

Con la orientación del vector  $\vec{g}_3$  es posible determinar las gravedades parciales acumuladas en los ejes X, Y y Z mostradas en (9), (10) y (11) respectivamente.

$$G_{X_{mean}} = \frac{\sum_{i=1}^n g_{3x,i}}{n} \quad (9)$$

$$G_{Y_{mean}} = \frac{\sum_{i=1}^n g_{3y,i}}{n} \quad (10)$$

$$G_{Z_{mean}} = \frac{\sum_{i=1}^n g_{3z,i}}{n} \quad (11)$$

Reemplazando cada componente de (8) tal como se muestra en (7) en las ecuaciones (9), (10) y (11) es posible calcular el valor en el tiempo de la microgravedad simulada como se muestra en (12).

$$G_{mean} = \sqrt{(G_{X_{mean}})^2 + (G_{Y_{mean}})^2 + (G_{Z_{mean}})^2} \quad (12)$$

Para calcular la componente de la microgravedad llamada aceleración no gravitacional, se debe escoger un punto aleatorio  $\vec{r}_3$  a cierta distancia del centro de rotación, cuyas coordenadas estén denominadas por los valores  $r_{3x}$ ,  $r_{3y}$  y  $r_{3z}$  en el sistema de referencia 3.

$$\vec{r}_3 = \begin{bmatrix} r_{3x} \\ r_{3y} \\ r_{3z} \end{bmatrix} \quad (13)$$

Trasladando (13) mediante las rotaciones producidas por los motores, se puede calcular la posición global de dicho punto tal como se muestra en (14).

$$\vec{p}_{global} = R_0^G R_1^0 R_2^1 R_3^2 \vec{r}_3 \quad (14)$$

El punto  $\vec{p}_{global}$  es la ubicación desde la perspectiva de sistema de referencia global G del punto escogido en el sistema de referencia 3. Para conocer la aceleración del punto escogido en (13) es necesario derivar dos veces (14). De este manera se obtiene (15).

$$\vec{a}_{global} = R_0^G R_1^0 R_2^1 R_3^2 \vec{r}_3 \quad (15)$$

$$\vec{a}_{global} = \begin{bmatrix} a_x \\ a_y \\ a_z \end{bmatrix} \quad (16)$$

Los componentes de (16)  $a_x$ ,  $a_y$  y  $a_z$  son las aceleraciones no gravitacionales en los ejes X, Y y Z en el sistema de referencia global G. Al igual que la aceleración gravitacional, es necesario hallar las componentes axiales acumuladas, tal como se muestra en (17), (18) y (19).

$$A_{X_{mean}} = \frac{\sum_{i=1}^n a_{x,i}}{n} \quad (17)$$

$$A_{Y_{mean}} = \frac{\sum_{i=1}^n a_{y,i}}{n} \quad (18)$$

$$A_{Z_{mean}} = \frac{\sum_{i=1}^n a_{z,i}}{n} \quad (19)$$

De esta manera se puede obtener el valor de la aceleración no gravitacional en el tiempo en (20).

$$A_{global}(t) = \sqrt{\left(A_{X_{global}}(t)\right)^2 + \left(A_{Y_{global}}(t)\right)^2 + \left(A_{Z_{global}}(t)\right)^2} \quad (20)$$

### 3.2 Modelado dinámico de los motores DC

El modelo laplaciano brinda la oportunidad de evaluar la respuesta transitoria de la variable de control de los motores. Los motores DC brindan la posición actual mediante codificadores magnéticos de cuadratura, para ello físicamente fue necesario una etapa de conversión de la posición a la velocidad mediante un programa que brinde la velocidad en tiempo real, sin embargo, para realizar la simulación del comportamiento de la velocidad angular de los motores fue necesario construir una función de transferencia entre la variable de entrada (voltaje) y la variable controlada (velocidad angular).

Los parámetros utilizados para modelar los motores DC son cinco. Estos parámetros son la resistencia de armadura, la cual basada en el modelo de motor DC utilizado se consideró un valor de  $4\Omega$  (Ohms), la inductancia entre bornes con un valor de  $2.75\mu\text{H}$  (micro henrios), la inercia del rotor de  $3.22\mu\text{J}$  (micro joules), el valor de la fricción de

amortiguamiento de  $3.5077 \times 10^{-6}$  y la constante de EMF autoinducida de cada motor DC de 0.0274. En (21) se puede ver la función de transferencia entre la posición angular del motor DC y el voltaje de entrada. Sin embargo, es necesario calcular la relación entre la velocidad angular y la entrada.

$$M(s) = \frac{\theta(s)}{V(s)} = \frac{K}{(Js+B)(Ls+R+K^2)} = \frac{2740}{8.87 \times 10^{-7} s^2 + 1.29 s + 1.4} \quad (21)$$

Utilizando la relación entre la posición angular y la velocidad angular se obtiene (22)

$$\theta(s) = \frac{\omega(s)}{s} \quad (22)$$

Reemplazando (22) en (21)

$$M(s) = \frac{\omega(s)}{V(s)} = \frac{2740}{(8.87 \times 10^{-7} s^2 + 1.29 s + 1.4)s} \quad (23)$$

Debido a que generalmente la inductancia L en los motores DC es mucho menor que la resistencia de armadura ( $L \ll R$ ) se suele simplificar la función de transferencia, obteniendo la ecuación simplificada mostrada en (24).

$$M(s) = \frac{1957}{(0.92 s + 1)s} \quad (24)$$

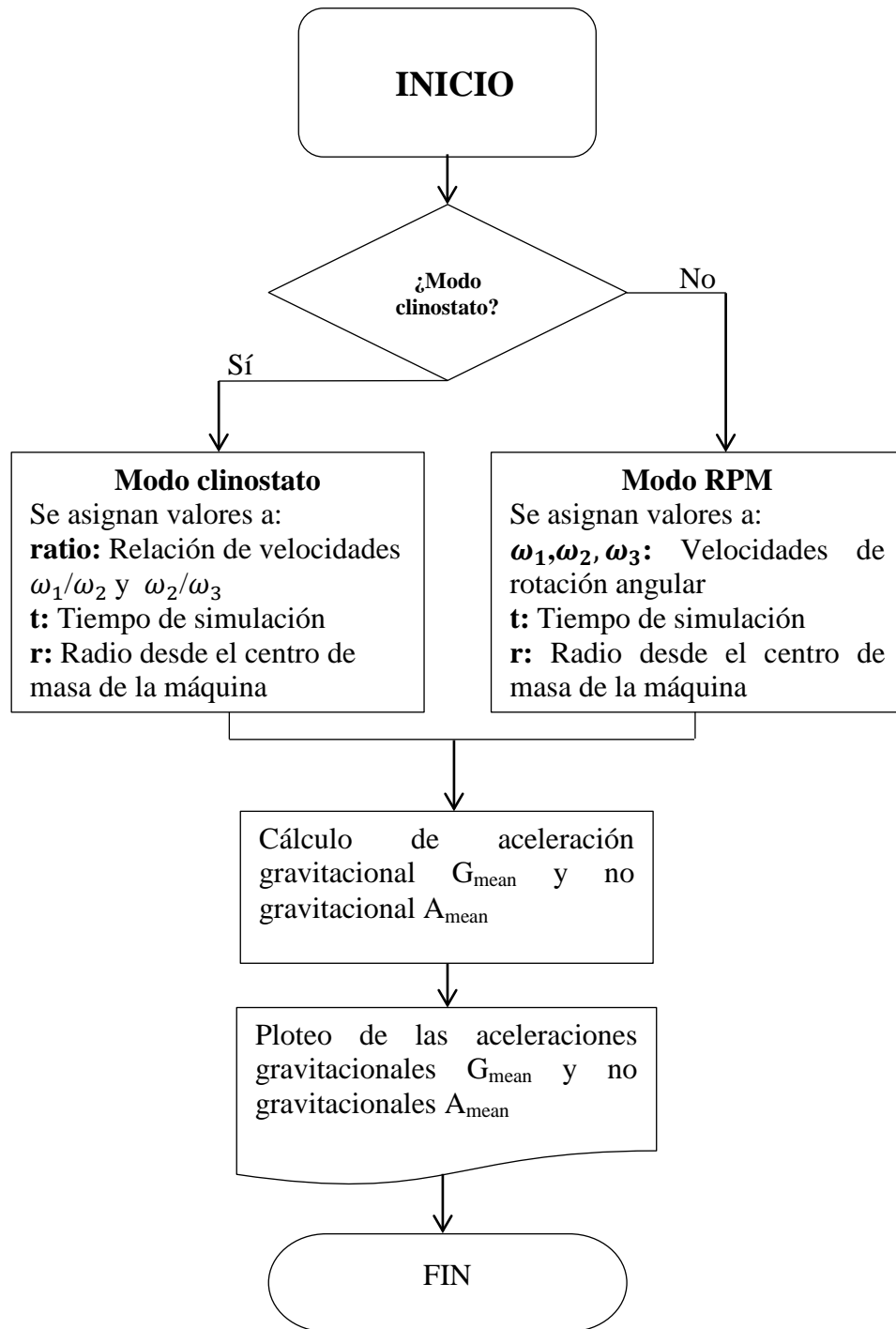


# CAPÍTULO IV

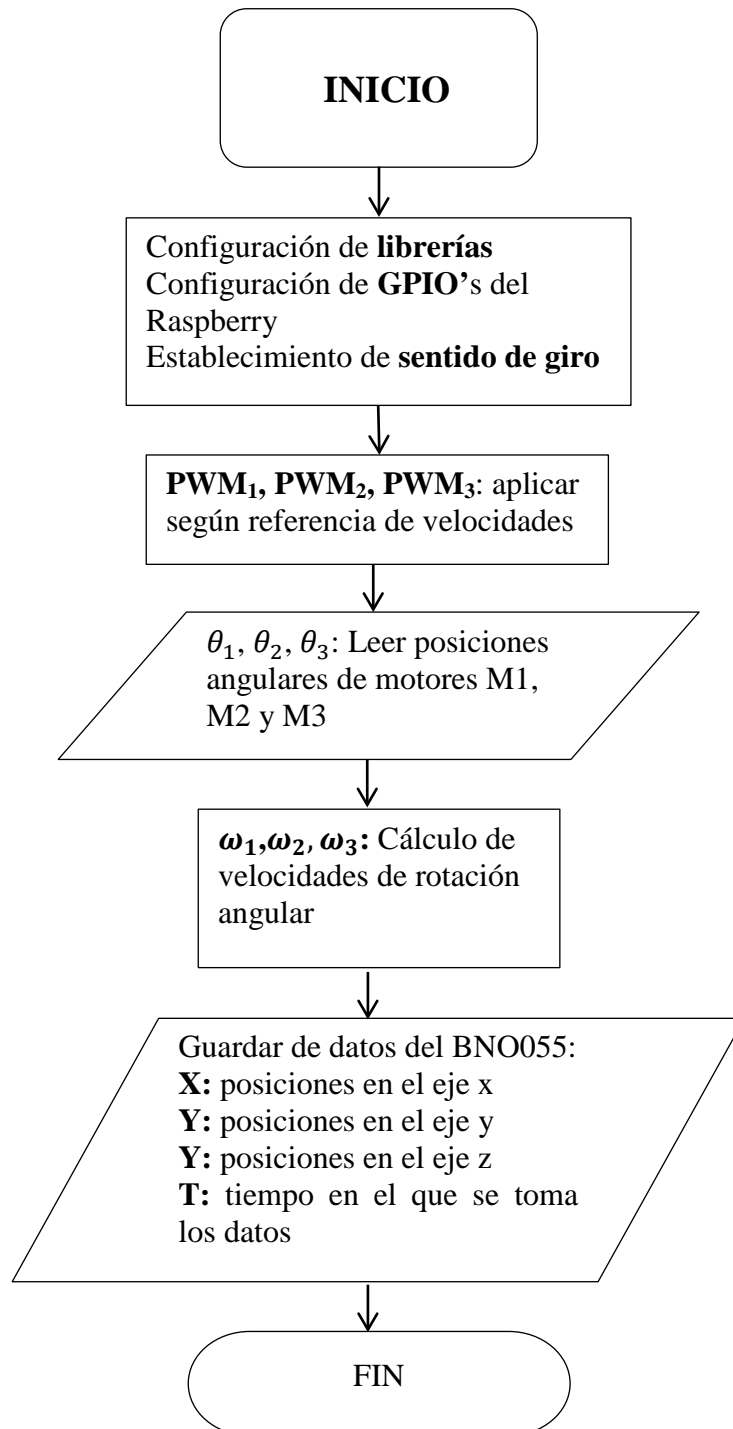
## SIMULACIÓN DE LA MÁQUINA DE MICROGRAVEDAD DE 3GDL

En esta parte se busca simular el comportamiento de la máquina de microgravedad mediante las ecuaciones que describen su modelo cinemático, con el fin de obtener un primer valor de la microgravedad simulada que este modelo de máquina puede generar. Paralelamente, se halla la respuesta transitoria de los motores DC a un algoritmo de control PID. La principal finalidad de esta etapa es obtener valores de microgravedad simulada utilizando la herramienta de simulación Matlab.

En la Figura 7 se puede ver el diagrama de flujo de la simulación de los modos de operación de la máquina de microgravedad de 3GDL, la cual fue llevada a cabo en Matlab. Los códigos para esta simulación se encuentran detalladamente explicados en el Anexo 1. También, en la Figura 8 se puede ver el diagrama de flujo para el cálculo de microgravedad en la implementación real de la máquina mostrada en el Anexo 2. La programación de este diagrama de flujo se realizó en python 3.5. El código se encuentra detallado en el Anexo 1.



**Figura 7 Diagrama de flujo de la simulación en Matlab del modelo cinemático de la máquina de microgravedad de 3GDL**



**Figura 8 Diagrama de flujo de la implementación con Raspberry Pi de la máquina de microgravedad de 3GDL.**

## 4.1 Simulación del modelo cinemático de la máquina de microgravedad.

La simulación de la máquina de microgravedad consta de dos partes principales, la simulación del modo Clinostato con sentidos de giro constantes, y la simulación del modo RPM con sentidos de giro alternantes de manera aleatoria.

### 4.1.1 Simulación Modo Clinostato

Con el fin de optimizar el valor de microgravedad de la máquina se llevaron a cabo simulaciones con diferentes parámetros. Los parámetros son:  $\omega_1$  es la velocidad del primer motor ubicado en el marco de referencia 0,  $\omega_2$  es la velocidad del segundo motor en el marco de referencia 1,  $\omega_3$  es la velocidad del tercer motor ubicado en el marco de referencia 2,  $R$  es la relación de velocidades entre los marcos de rotación adyacentes entre sí como se muestra en la ecuación 25, y por último,  $t$  es el tiempo de simulación. A continuación se muestra el resultado de simulación de una prueba inicial con sus respectivos parámetros.

$$R = \frac{\omega_1}{\omega_2} = \frac{\omega_2}{\omega_3} \quad (25)$$

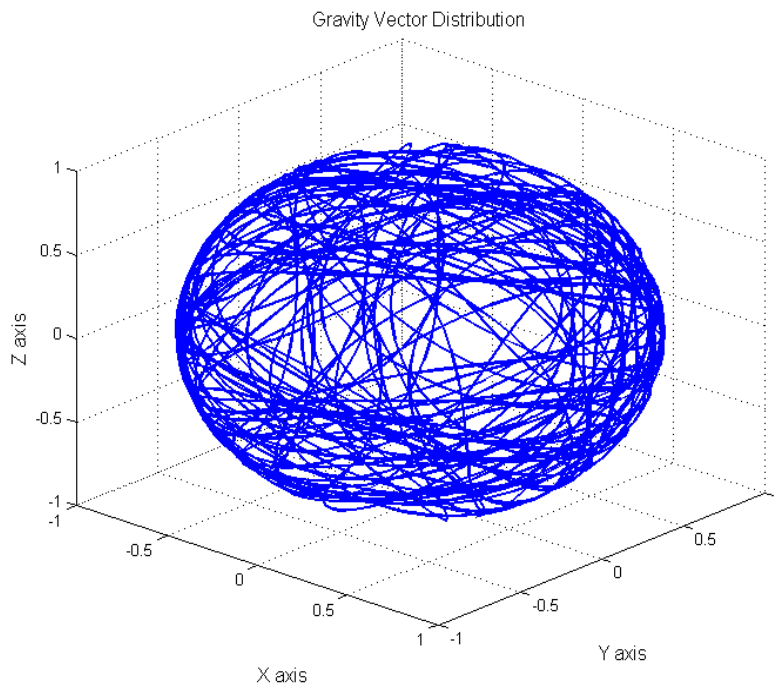
#### Prueba Inicial #1

$$\omega_1 = 10 \text{ rpm.}$$

$$R = 4:1.8.$$

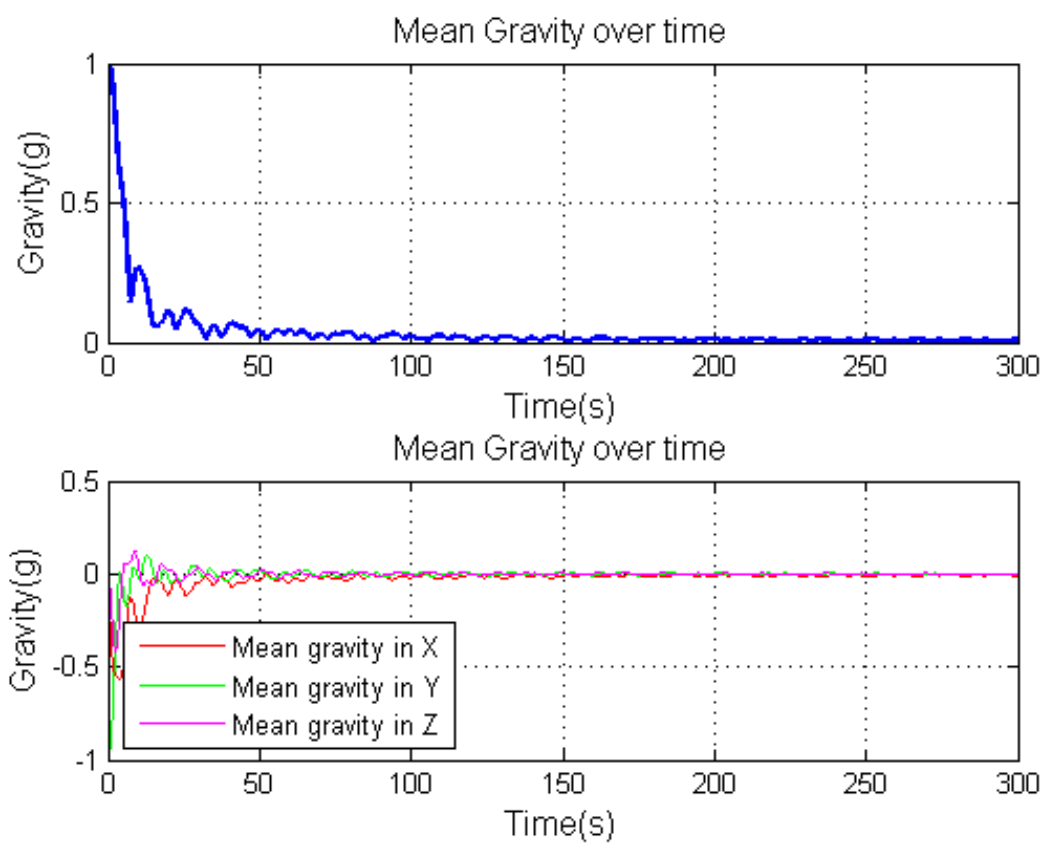
$$t = 5 \text{ minutos.}$$

En la Figura 9 se muestra la trayectoria de la orientación del vector de gravedad de la muestra para los parámetros escogidos. El patrón de movimiento se asemeja al de una esfera, cubriendo en gran parte los espacios en blanco.

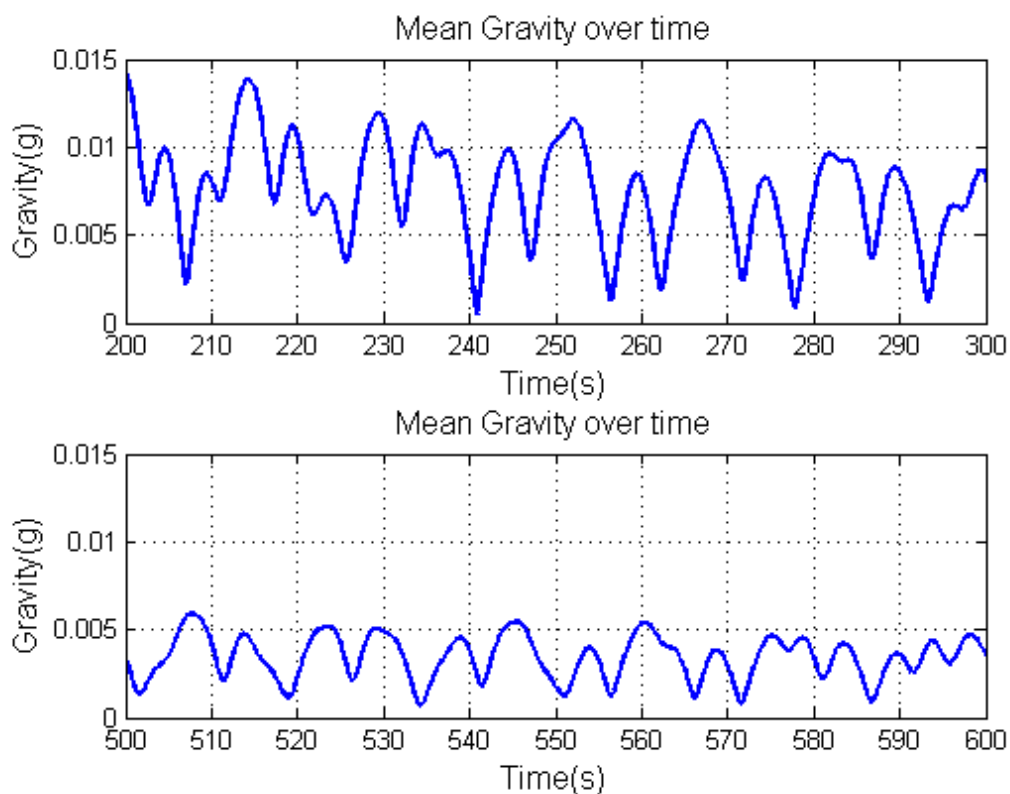


**Figura 9 Distribución del vector de gravedad (modo clinostato)**

En la Figura 10 se puede observar que la microgravedad simulada rápidamente tiende a cero y en la Figura 11 que la convergencia es continua, y que el valor de microgravedad es menor que el 1% del valor de la gravedad a partir de los cinco minutos. Generalmente los patrones generados en clinostatos son mucho más marcados y no se distribuyen de manera equitativa. Los parámetros fueron escogidos con fines comparativos para discutir posteriormente.



**Figura 10** Microgravedad simulada generada por la aceleración gravitacional.  
**Rango visual de 5min (modo clinostato).**

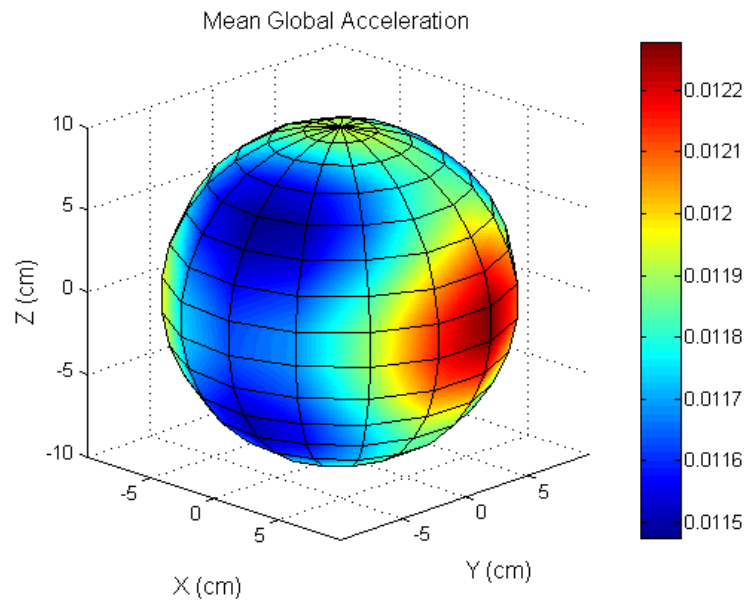


**Figura 11** Microgravedad simulada generada por la aceleración gravitacional.  
**Rango visual de 1min 40s (modo clinostato).**

En la Figura 12 se muestra la distribución de la aceleración no gravitacional. Esta componente es generada por los valores mismos parámetros de simulación escogidos inicialmente, adicionando un parámetro más, el cual es un punto desde el centro de rotación de la máquina. Por simplicidad de simulación, se escogió el punto en el sistema de referencia 3:

$$\vec{r}_3 = \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (26)$$

Reemplazando (26) en (14) y derivando dos veces el resultado se obtuvo las componentes parciales en los ejes X, Y y Z del sistema de referencia global. La leyenda de la Figura 12 muestra valores de aceleración menores al 1.3% del valor de la gravedad con concentraciones mayores en los polos opuestos a los lados de la esfera.

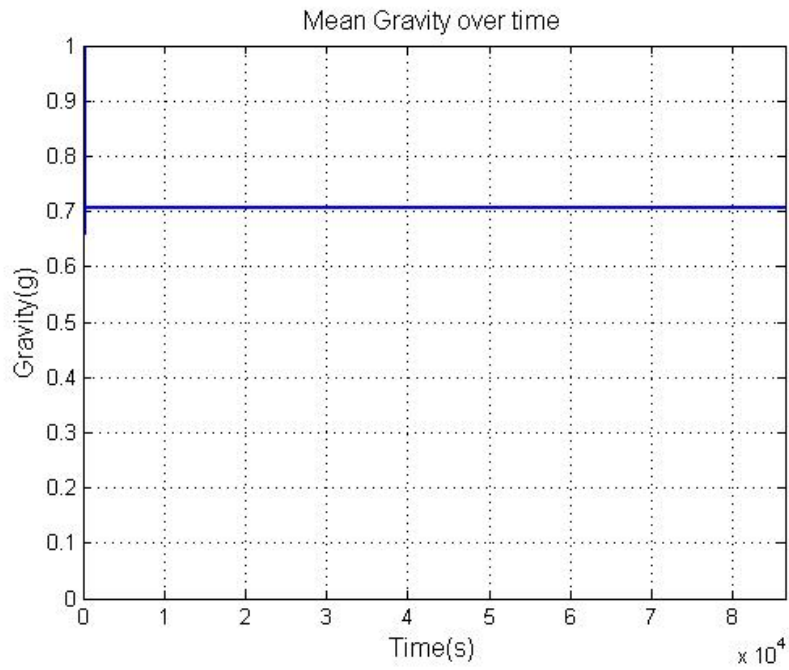


**Figura 12** Microgravedad simulada generada por la aceleración no gravitacional (modo clinostato).

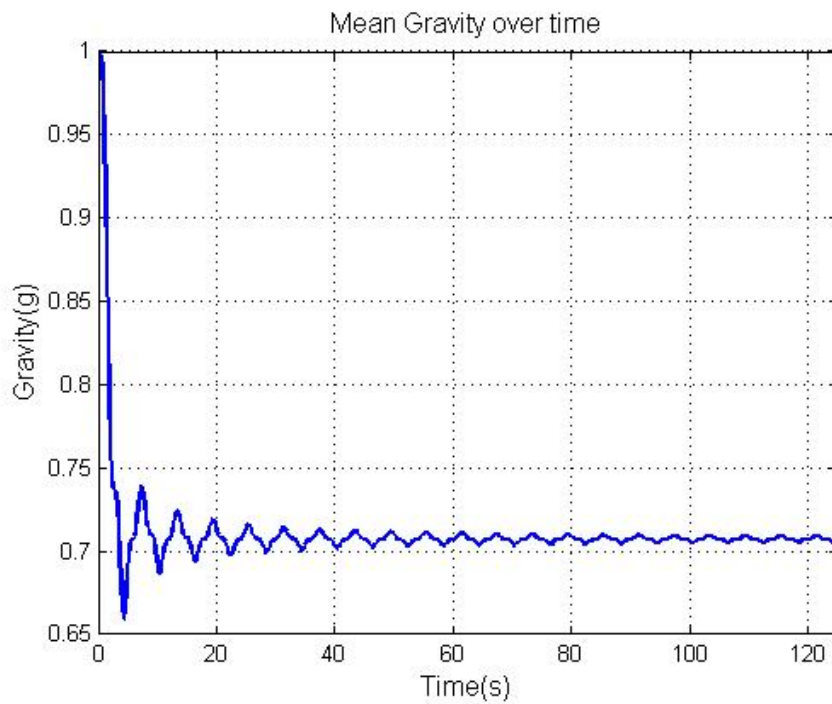
En las posteriores simulaciones notar que se cambió la relación de velocidades en todos los casos y que el tiempo de simulación ahora es 24 horas, tiempo usualmente utilizado en pruebas reales con estas máquinas.



## Prueba #2 (R = 4:4)



**Figura 13** Microgravedad simulada en modo clinostato para R = 4:4.



**Figura 14** Microgravedad simulada en modo clinostato para R = 4:4  
(acercamiento).

### Prueba #3 ( $R = 4:3$ )

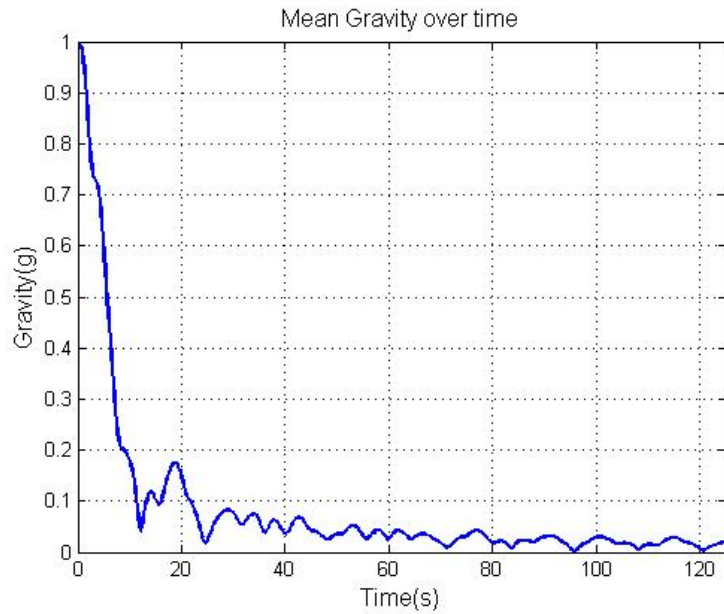


Figura 15 Microgravedad simulada en modo clinostato para  $R = 4:3$ .

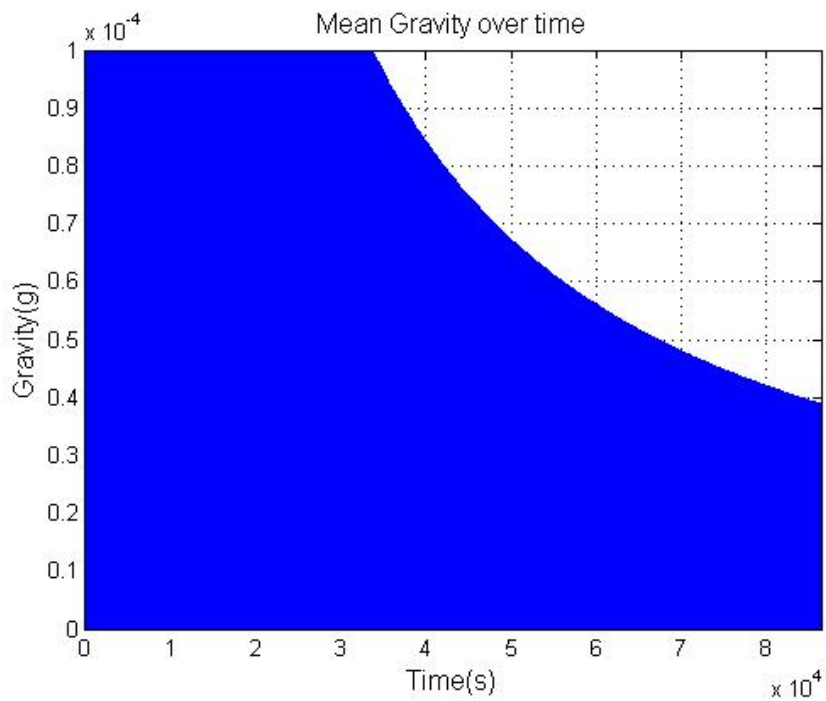
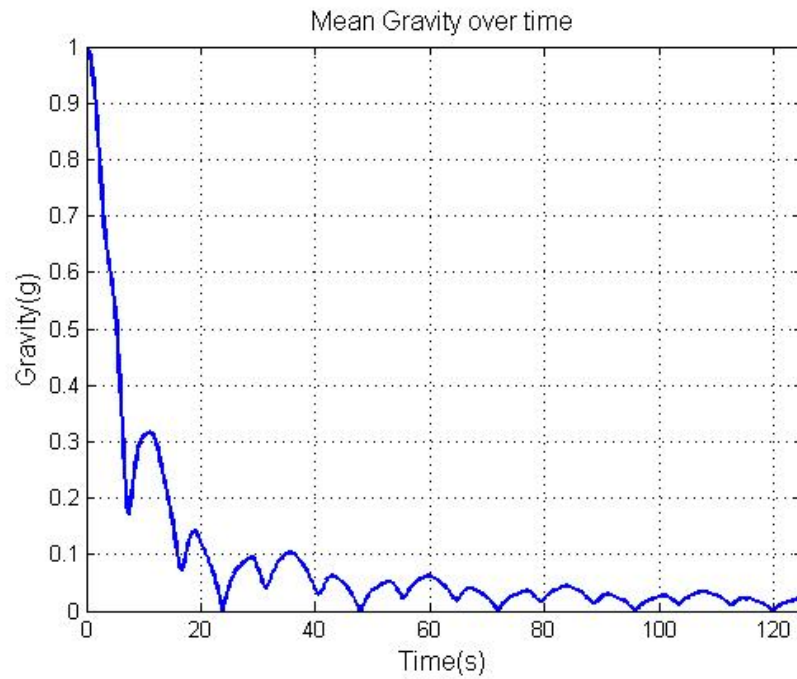
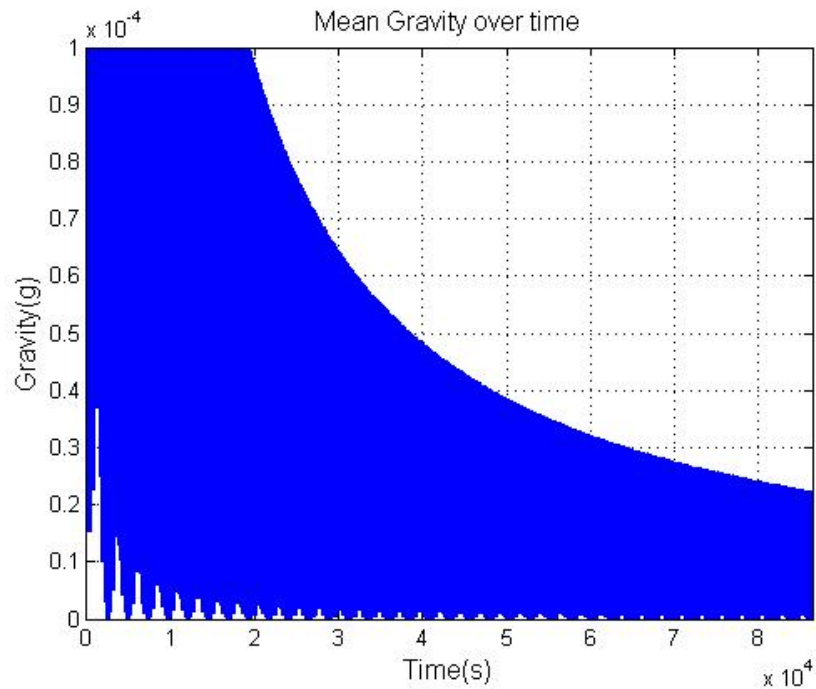


Figura 16 Microgravedad simulada en modo clinostato para  $R = 4:3$   
(acercamiento).

### Prueba #4 ( $R = 4:2$ )

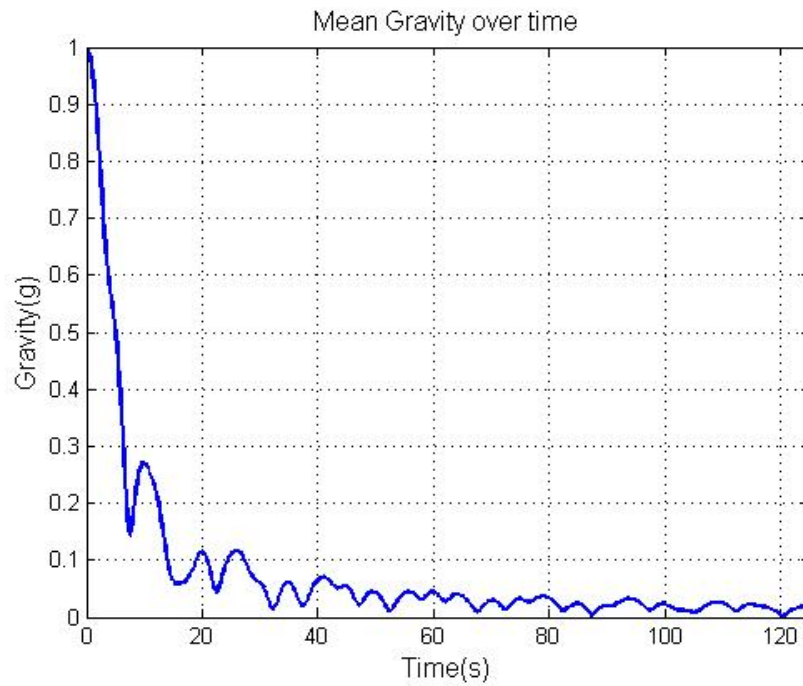


**Figura 17** Microgravedad simulada en modo clinostato para  $R = 4:2$ .

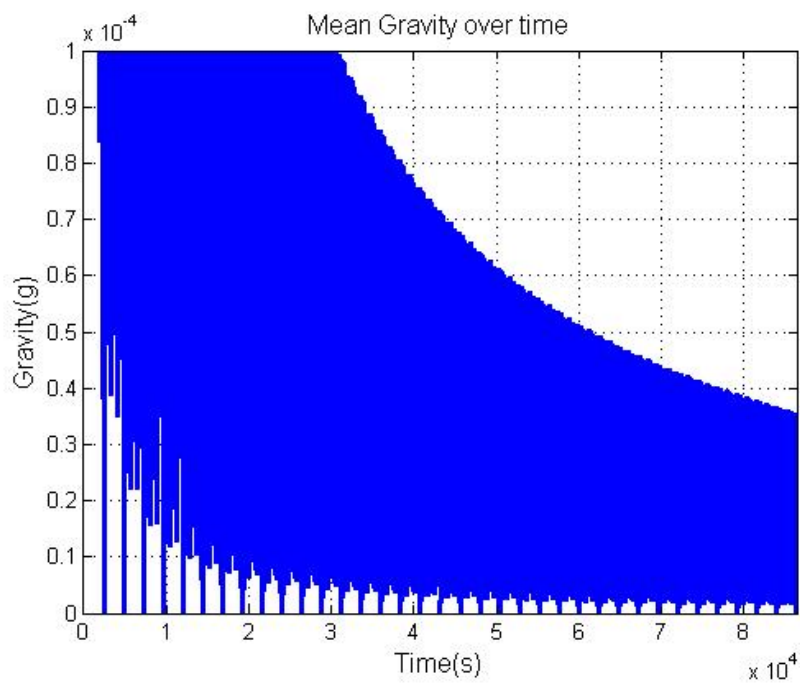


**Figura 18** Microgravedad simulada en modo clinostato para  $R = 4:2$  (acercamiento).

**Prueba #5 (R = 4:1.8)**

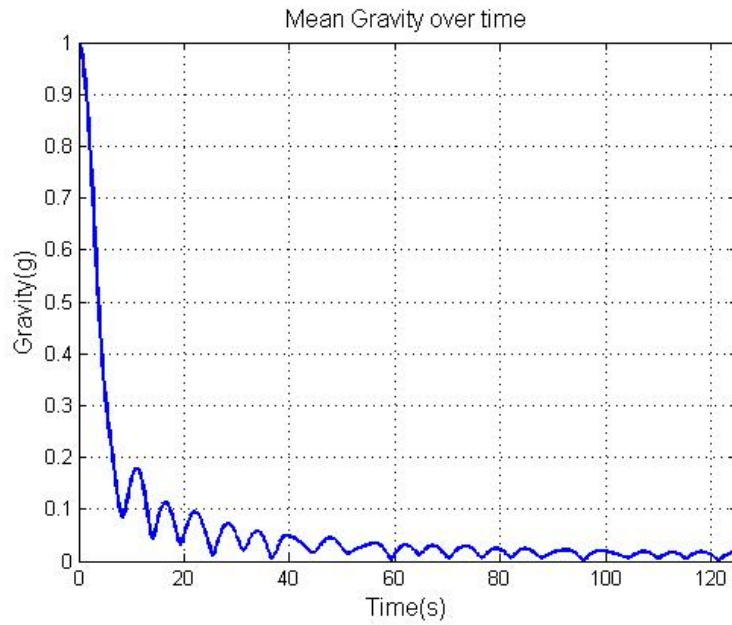


**Figura 19** Microgravedad simulada en modo clinostato para R = 4:1.8.

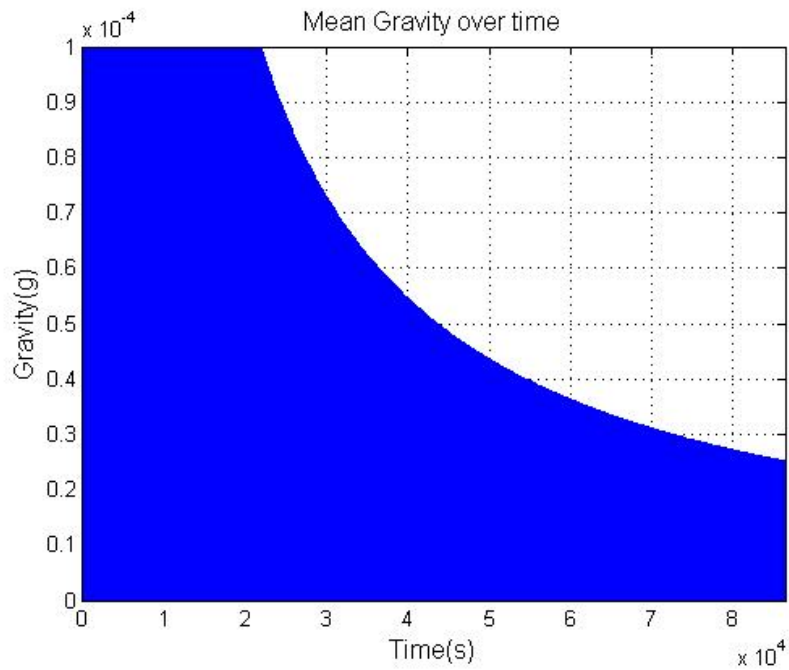


**Figura 20** Microgravedad simulada en modo clinostato para R = 4:1.8 (acercamiento).

### Prueba #6 ( $R = 4:1$ )

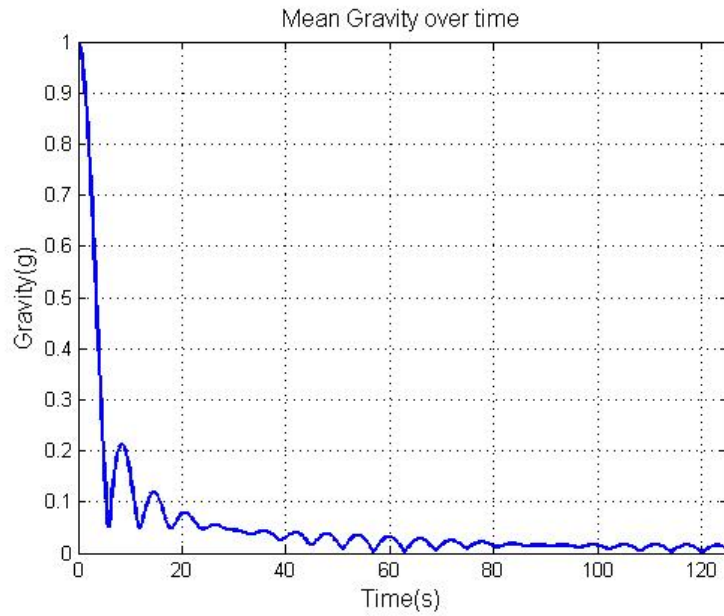


**Figura 21** Microgravedad simulada en modo clinostato para  $R = 4:1$ .

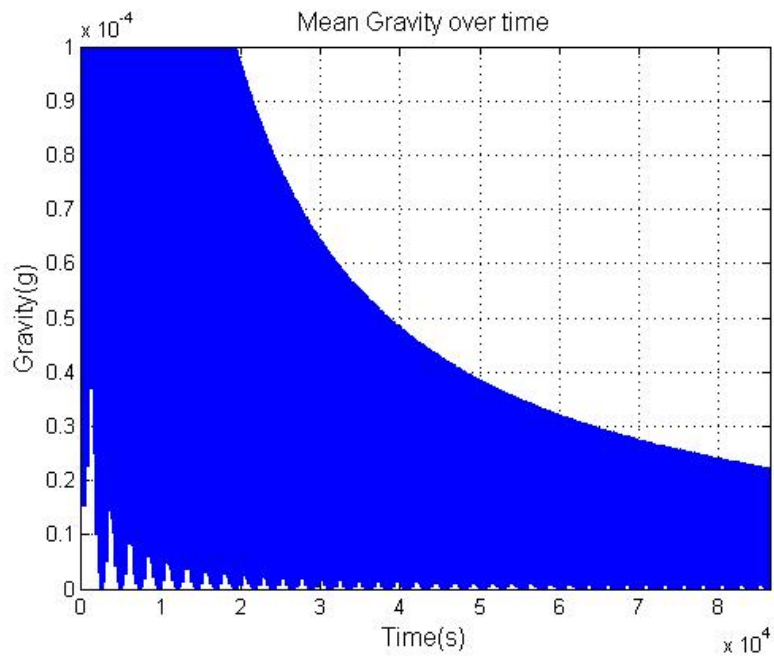


**Figura 22** Microgravedad simulada en modo clinostato para  $R = 4:1$   
(acercamiento).

**Prueba #7 (R = 4:0.2)**



**Figura 23** Microgravedad simulada en modo clinostato para R = 4:0.2.



**Figura 24** Microgravedad simulada en modo clinostato para R = 4:0.2 (acercamiento).

### 4.1.2 Simulación Modo RPM

Para simular este modo eficientemente se requiere realizar muchas pruebas con el fin de obtener una mejor visualización del rango en que se encuentra el valor de microgravedad obtenida; debido a que este modo consta de cambios de sentido aleatorios después de cada intervalo de tiempo que se asigne, en cada simulación se obtiene un valor de microgravedad distinta. Se realizó una prueba inicial de este modo con sus respectivos parámetros.

#### Parámetros de Prueba Inicial

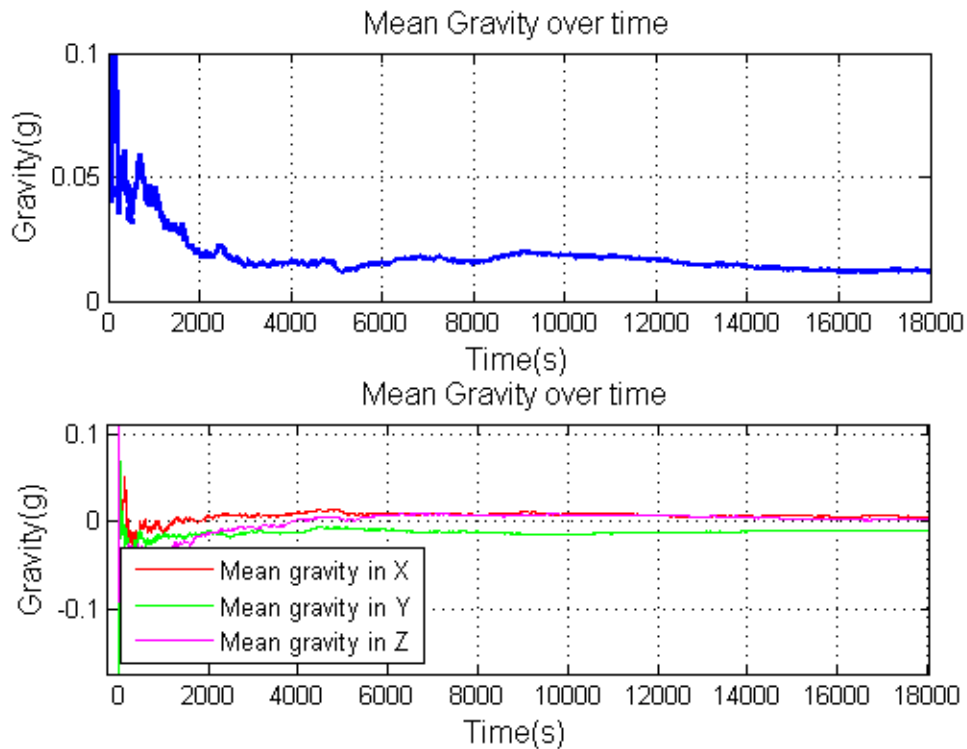
$$\omega_1 = 10 \text{ rpm.}$$

$$\omega_2 = 4.5 \text{ rpm.}$$

$$\omega_3 = 2.025 \text{ rpm.}$$

$$R = 4:1.8.$$

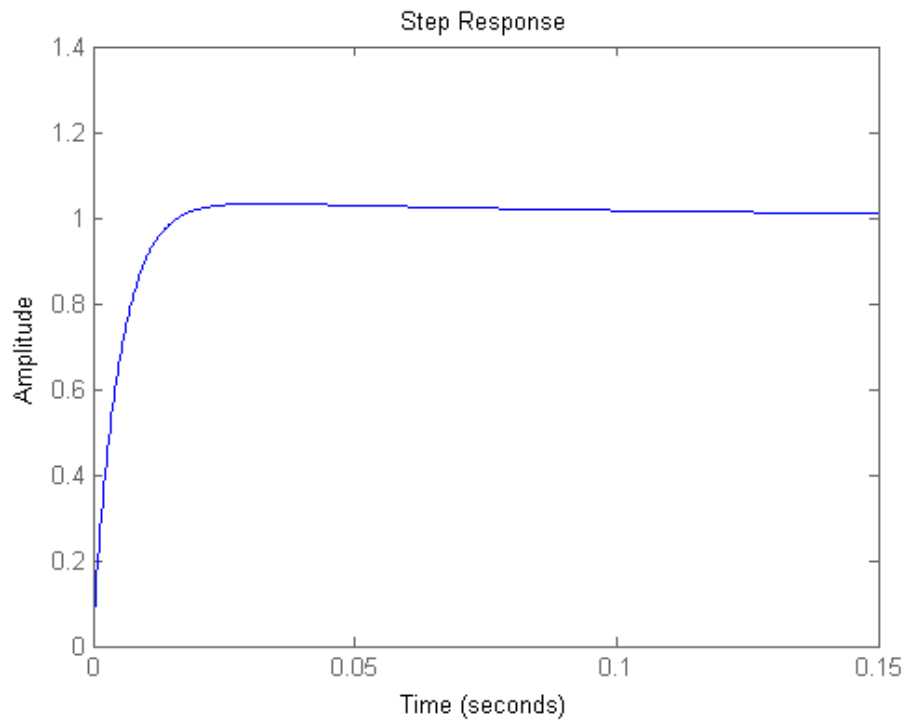
$$t = 5 \text{ horas.}$$



**Figura 25** Microgravedad simulada en el modo RPM

## 4.2 Simulación del modelo laplaciano de los motores DC

La simulación de la respuesta transitoria de los motores DC también se llevó a cabo en Matlab. El algoritmo de control de la velocidad angular implementando fue un control PID, cuyos parámetros fueron una constante proporcional de 0.1, una constante integral de 1 y una constante derivativa de 0.1.



**Figura 26** Respuesta transitoria de la velocidad de los motores DC con control PID



# CAPÍTULO V

## DISCUSIÓN DE RESULTADOS

En este capítulo se divide en dos partes, el análisis de los resultados obtenidos en la simulación para el modo de operación Clinostato y para el modo RPM de la máquina de microgravedad.

### 5.1 Simulación Modo Clinostato

En este modo se realizaron 6 pruebas con diferentes relaciones de velocidad  $R$  entre las velocidades de los motores. El objetivo principal de esta tesis fue obtener microgravedad entre el rango de  $10^{-4}$ g y  $10^{-5}$ g, por ello, las Figuras 16, 18, 20, 22 y 24 muestran que luego de cierto tiempo de simulación se llega a pasar por debajo del valor de referencia  $10^{-4}$ g. Para cada  $R$  existe un distinto  $Tg$  o tiempo de convergencia, el cual es el tiempo en que la microgravedad es menor que  $10^{-4}$ g, y un valor  $\mu g$  o microgravedad correspondiente. Estos valores se muestran en la Tabla 2, donde se puede ver que los casos extremos son no convergencia, es decir, el vector de gravedad no se distribuye de manera omnidireccional, y de mejor tiempo convergencia y microgravedad.

En el primer caso donde  $R = 4:4$ , las velocidades de los tres motores son 10 rpm, esto significa que alrededor de cada marco de rotación el vector de gravedad sigue una trayectoria circular cuyo promedio a lo largo de 24 horas de simulación es 0.7071g. Este valor se encuentra demasiado lejos del objetivo de esta tesis, sin embargo, el resultado de usar esta configuración da como resultado una gravedad parcial, la cual puede ser utilizada para realizar estudios que necesiten emular un entorno bajo estas condiciones.

El caso de  $R = 4:3$  es particular por un motivo. En la Tabla 2 se podría inferir a simple vista que mientras menor sea  $R$  menor serán los valores de interés  $Tg$  y  $\mu g$ , sin embargo, los valores obtenidos para este caso no siguen dicho patrón. La razón es que la relación de velocidad  $R$  asigna una velocidad a cada marco de rotación ortogonal y adyacente entre sí basada en la velocidad de rotación inicial  $\omega_1$ , la cual escogimos como

10 rpm, una velocidad estándar en la mayoría de aplicaciones de este equipo. Esta velocidad asignada a cada motor debe crear un patrón de movimiento que se distribuya uniformemente alrededor de una esfera, lo cual ocurre para  $R = 4:3$ . En contraste,  $R = 4:2$  no tiene tan buenos resultados como  $R = 4:3$  debido a que la distribución del vector de gravedad ocurre de manera más uniforme en  $R = 4:3$ . El siguiente caso es  $R = 4:1.8$ , este caso particular fue añadido debido a que este valor de relación ayuda a generar mejores resultados de implementación en los laboratorios de bioingeniería, es decir, tiene una propiedad que hace que los objetos de estudio tengan expresiones más marcadas en algunos casos.

El mejor valor de microgravedad obtenido y el mejor tiempo de convergencia ocurrieron en  $R = 4:0.2$ . No obstante, cabe resaltar algo, la relación  $R$  en este caso significa que las velocidades de rotación  $\omega_2$  y  $\omega_3$  de los marcos adyacentes son muy pequeñas en comparación con  $\omega_1$ , lo que implica dos cosas, en caso de implementar esta opción en la máquina de microgravedad de 3GDL sería necesario tener un control muy preciso para velocidades muy bajas de rotación entre los 0.5 y 0.025 rpm ya que esto implica tener un diseño mecánico óptimo y un algoritmo de control muy eficiente; y lo otro sería acerca de algo conocido como *sedimentación*. Es sabido que en los clinostatos puede existir sedimentación, es decir, un acoplamiento irregular de las partículas estudiadas a las paredes del contenedor, esto ocurre usualmente porque las velocidades de rotación son relativamente bajas dependiendo del tipo de estudio. Por ello, utilizar  $R = 4:0.2$  significaría que solo un marco de rotación gira a 10 rpm, mientras que los dos restantes lo hacen a una velocidad muy lenta (entre 0.5 y 0.025 rpm), lo cual puede provocar sedimentación en las muestras, adicional al ‘conocimiento’ del sentido de giro de las muestras debido a que una velocidad de rotación es dominante.

**Tabla 2** Tiempo de Convergencia  $Tg$  o tiempo en el que la Microgravedad  $\mu g$  obtenida mediante simulación es menor a  $10^{-4}g$ , y Microgravedad  $\mu g$  obtenida luego de 24 horas de simulación en el modo Clinostato.

	<b>Tiempo de Convergencia <math>Tg</math></b>	<b>Microgravedad <math>\mu g</math></b>
<b>R = 4:4</b>	No converge a 0.	0.7071g
<b>R = 4:3</b>	9.33 horas	$<0.384 \times 10^{-4}g$
<b>R = 4:2</b>	10.35 horas	$<0.429 \times 10^{-4}g$
<b>R = 4:1.8</b>	8.48 horas	$<0.354 \times 10^{-4}g$
<b>R = 4:1</b>	6.03 horas	$<0.251 \times 10^{-4}g$
<b>R = 4:0.2</b>	5.35 horas	$<0.221 \times 10^{-4}g$

## 5.2 Simulación Modo RPM

En el modo RPM se llevaron a cabo simulaciones para obtener los parámetros que brindan el mejor valor de microgravedad. El caso de los RPM es distinto a los clinostatos como se ha mencionado previamente, los clinostatos tienen un solo sentido de giro el cual no cambia a lo largo de la simulación, mientras que los RPM poseen marcos de rotación que alternan de manera independiente y aleatoria su sentido de giro. Esto hace particularmente difícil la simulación de los RPM, debido a que cada simulación llevada a cabo, incluso con los exactos mismo parámetros brinda siempre un resultado de microgravedad distinto, por lo que es posible determinar fácilmente si manipular un parámetro en cierto sentido está provocando una mejora de microgravedad o no. La microgravedad obtenida en este modo fue de 0.02g para 5 horas de simulación.

# CAPÍTULO VI

## CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

### 6.1 Conclusiones

La máquina de microgravedad de 3GDL se simuló en dos modos de operación, el modo clinostato y el modo RPM. En el modo clinostato se encontró que la distribución del vector de gravedad se produce de manera más equitativa, tal como se discutió en el Capítulo V; la convergencia se produjo de manera más rápida y eficiente en comparación con los clinostatos de 2GDL como en [4], y la aceleración no gravitacional presentó poca concentración, siendo las aceleraciones de menor valor las que se presentaban mayormente como se puede observar en la Figura 12.

Se cumplió el objetivo principal de obtener microgravedad simulada entre  $10^{-4}g$  y  $10^{-5}g$ . Precisamente, el mejor valor de microgravedad simulada obtenido fue  $0.221 \times 10^{-4}g$  para el modo clinostato y  $0.02g$  para el modo RPM; en comparación con los valores de microgravedad del clinostato de [4] y el RPM de [5], se obtuvo una mejora en la calidad de microgravedad del 87% y 9.09% respectivamente. También se desarrolló el modelado cinemático de la máquina, el modelado dinámico de los motores DC utilizados para una máquina de microgravedad de 3GDL, para lo cual no existe bibliografía que muestre de manera explícita lo desarrollado en este trabajo.

Los motivos por los cuales no se logró obtener resultados de microgravedad de la implementación similares a la de la simulación es por dos razones principales: primero, porque el diseño mecánico de la máquina no está optimizado. Si bien el peso de la máquina es liviano y está diseñado para trabajar en un espacio reducido como una incubadora, existe un problema de desbalance, el cual hace que al girar los marcos de la máquina, estos tiendan a moverse más rápido en ciertas partes de un ciclo, debido a que el peso no está exactamente distribuido para cancelar los torques parásitos que por momentos actúan en forma opuesta al sentido de giro de los motores y luego a favor, lo cual no genera una trayectoria continua como la observada en la simulación. El segundo

motivo es la selección de componentes, los componentes utilizados como los motores DC que brindan la potencia para mover los marcos de la máquina, o los *slip rings* o anillos deslizantes que son dispositivos que transmiten señales de potencia como de control, cumplen únicamente los requerimientos mínimos de transmisión de potencia mecánica, eléctrica y de control. Por ende, el control de velocidad de los motores utilizados puede carecer de precisión, y la transmisión de señales puede no ser la óptima debido a que las señales de potencia de que alimentan a los motores y las señales de nivel lógico que controlan y capturan los datos del sensor 3D situado en el interior de la máquina son transmitidas en el mismo *slip ring*, lo que puede producir ruido en las lecturas.

Se diseñó y construyó un prototipo que cumpla con requerimientos mínimos mecánicos y electrónicos con el cual se implementó la máquina de microgravedad de 3GDL y se verificó los datos obtenidos mediante la simulación. Sin embargo, repetir los resultados de la simulación mediante la implementación real de la máquina requiere de componentes de mucha mayor precisión y por ende mayor coste.

## **6.2 Trabajo Futuro**

El modo clinostato de la máquina de microgravedad de 3GDL presentó una clara ventaja en el desempeño en la simulación. Dado que no existe un método analítico para optimizar el valor de microgravedad obtenida, los resultados tanto de simulación como experimentales han sido obtenidos siguiendo el método de ensayo y error. Esta máquina de microgravedad, al poseer un grado de libertad extra, representa una carga computacional mayor para simular y también un conjunto de ecuaciones cinemáticas más complejas, pero también posee la posibilidad de mejorar los valores de microgravedad con trayectorias más complejas las cuales son posibles alterando las referencias de velocidad de los 3 motores DC utilizados. Por ejemplo, en el modo clinostato las velocidades de rotación angular de los motores escogidas para la simulación e implementación fueron de 10rpm, por ello, dado que la referencia es una constante, el movimiento de cada sistema de referencia se realiza de manera continua. Sin embargo, si la referencia de las velocidades angulares fueran ondas sinusoidales, los patrones de movimiento cambian, y el modelo cinemático se vuelve exponencialmente

más pesado de simular. Esto representa un problema, ya que las implementaciones reales de los clinostatos tienen una duración de uno a dos días generalmente, lo cual genera una gran cantidad de datos los cuales aumentan con la frecuencia con la que se tomen.

Por otra parte, la implementación del prototipo inicial de esta máquina de microgravedad de 3GDL demuestra la posibilidad de obtener mayor eficiencia de trabajo y sienta las bases para posteriores prototipos. Si los problemas mencionados son solucionados, este trabajo recomienda implementar nuevos métodos de control de velocidad como diferentes algoritmos, los cuales también tienen un impacto en el rendimiento de la implementación. También, dado que no existe un método analítico para obtener la mejor microgravedad en una máquina de 3GDL, se recomienda un enfoque continuo en esta área de investigación, la cual aún tiene potencial para generar no solo mejores valores de microgravedad en simulación o implementación, sino en los mismos experimentos biológicos para los cuales este trabajo está finalmente dedicado.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] D. Laván et al., “Design and construction of a three-axis microgravity machine for biological experiments,” presented at the 30th Annu. Meeting American Society for Gravitational and Space Research, Pasadena, Calif., 2014.
- [2] S. L. Wuest et al., “A Novel Microgravity Simulator Applicable for Three-Dimensional Cell Culturing,” *Microgravity Sci. Technol.*, vol. 26, no. 2, pp. 77-78, Oct. 2014.
- [3] S. L. Wuest et al., “Simulated Microgravity: Critical Review on the Use of Random Positioning Machines for Mammalian Cell Culture,” *BioMed Research Int.*, vol. 2015, Article ID 971474, 8 pages, Jan. 2015.
- [4] Y. J. Kim et al., “Time-averaged simulated microgravity (taSMG) inhibits proliferation of lymphoma cells, L-540 and HDLM-2, using a 3D clinostat,” *BioMed Eng. OnLine*, vol. 16, no. 48, Apr. 2017.
- [5] S. M. Kim et al., “An Experimental and Theoretical Approach to Optimize a Three-Dimensional Clinostat for Life Science Experiments,” *Microgravity Sci. Technol.*, vol. 29, no. 1-2, pp. 97-106, Feb. 2017.
- [6] T. Russomano et al., “Development and Validation of a 3D Clinostat for the Study of Cells during Microgravity Simulation,” presented at the *Conf. proc.: 27th Annu. Int. Conf. IEEE Engineering in Medicine and Biology Society*, Shanghai, 2005, pp. 564-6.
- [7] T. Hoson et al., “Evaluation of the three-dimensional clinostat as a simulator of weightlessness,” *Planta*, vol. 203, no.1, pp. 187-197, Aug. 1997.
- [8] S. Makihira et al., “Impact of the microgravity environment in a 3-dimensional clinostat on osteoblast- and osteoclast-like cells,” *Cell Biology Int.*, vol. 32, no. 9, pp. 1176-1181, Sep. 2008.
- [9] J. P. Hatton and D. Moore, “Kinetics of stem gravitropism in *Coprinus cinereus*: Determination of presentation time and ‘dosage-response’ relationships using clinostats,” *FEMS Microbiol. Lett.*, vol. 100, no. 1-3, pp. 81-86, Dec. 1992.
- [10] J. V. Loon, “Some history and use of the random positioning machine, RPM, in gravity related research,” *Advances in Space Research*, vol. 39, no. 7, pp. 1161-1165, Dec. 2007.
- [11] W. Briegleb, “Some Qualitative and Quantitative Aspects of the Fast-Rotating Clinostat as a Research Tool,” *ASGSB Bull.*, vol.5, no.2, pp. 23-30, Oct. 1992.
- [12] A. G. Borst and J. V. Loon, “Technology and Developments for the Random Positioning Machine RPM,” *Microgravity Sci. Technol.*, vol. 21, pp. 287-292, Nov. 2009.

- [13] R. R. Dedolph and M. H. Dipert, "The Physical Basis of Gravity Stimulus Nullification by Clinostat Rotation," *Plant Physiology*, vol. 47, pp. 756-764, Jun. 1971.
- [14] Y. Zhang et al., "The use of Microgravity Simulators for Space Research," presented at the *American Society for Gravitational and Space Research Annu. Conf.*, Cleveland, OH, 2016.
- [15] J. L. Becker and G. R. Souza, "Using space-based investigations to inform cancer research on Earth," *Nature Reviews Cancer*, vol. 13, pp. 315-327, Apr. 2013.
- [16] NASA, "Fighting Cancer with Microgravity Research," <https://www.nasa.gov/content/fighting-cancer-with-microgravity-research/>, accessed: 01-05-2018.
- [17] J. A. De La Cruz and D. L. Quiroz, "Microgravedad y cáncer," *Rev. Fac. Med. Hum.*, vol. 17, no. 4, pp.7-11, Jan. 2017.
- [18] R. Sahebi et al., "The Role of Microgravity in Cancer: A Dual-edge Sword," *Multidiscip Cancer Invest.*, vol. 1, no. 3, July 2017.
- [19] M. Babbick et al., "Expression of transcription factors after short-term exposure of *Arabidopsis thaliana* cell cultures to hypergravity and simulated microgravity (2-D/3-D clinorotation, magnetic levitation)," *Advances in Space Research*, vol. 39, pp.1182–1189, Jan. 2007.
- [20] J. E. Valdivia and D. L. Quiroz, "Simulated microgravity alters tumor growth, apoptosis and invasiveness characteristics in breast cancer cell lines in a nonrandom manner," presented at the 39th COSPAR Scientific Assembly, Mysore, 2012.
- [21] V. S. Julio et al., "Genetic sensors of gravitational waves analyzed in *Drosophila melanogaster* could be important regulators in cancer progression," presented at the 31st Annual Meeting of the American Society for Gravitational and Space Research, Alexandria, VA, 2015.
- [22] R. Herranz et al., "*Drosophila* GENE Experiment in the Spanish Soyuz Mission to the ISS: II. Effects of the Containment Constraints," *Microgravity Sci. Technol.*, vol. 21, pp. 299-304, Oct. 2008.
- [23] R. Herranz et al., "The "Gene" Experiment in the Spanish Soyuz Mission to the ISS. Effects of the cold transportation step," *Microgravity Sci. Technol.*, vol. 19, no. 5-6, pp. 196–200, Sep. 2007.
- [24] C. Pache et al., "Digital holographic microscopy real-time monitoring of cytoarchitectural alterations during simulated microgravity," *Journal of Biomedical Optics*, vol. 15, no. 2, Apr. 2010.



- [25] L. David et al., “Design and construction of a fluorescence microscope for operation in microgravity,” presented at the ‘Encuentro Científico Internacional Verano’, Lima, 2016.
- [26] L. David et al., “Gravitational waves are detected by genetic sensors: evidence in *Drosophila melanogaster*,” presented at the 31st Annual Meeting of the American Society for Gravitational and Space Research, Lima, Alexandria, VA, 2015.
- [27] L. David et al., “Biological validation of the three-degrees of freedom microgravity machine by analysis of genetic expression in pupae of *Drosophila melanogaster*,” presented at the 31st Annual Meeting of the American Society for Gravitational and Space Research, Lima, Alexandria, VA, 2015.
- [28] H. E. McCurdy, “The cost of space flight,” *Space Policy*, vol. 10, no. 4, pp. 277-289, Nov. 1994.
- [29] D. J. O’Donnel, “Overcoming barriers to space travel,” *Space Policy*, vol. 10, no. 4, pp. 252-255, Nov. 1994.
- [30] R. Herranz et al., “Ground-Based Facilities for Simulation of Microgravity: Organism-Specific Recommendations for Their Use, and Recommended Terminology,” *Astrobiology*, vol. 13, no. 1, pp. 1-17, Jan. 2013.
- [31] A. Buehler, “The Simulation of Microgravity Conditions on the Ground,” *ASGSB Bulletin*, vol. 5, no.2, pp. 1-10, Oct. 1992.
- [32] J. O. Kessler, “The Internal Dynamics of Slowly Rotating Biological Systems,” *ASGSB Bulletin*, vol. 5, no.2, pp. 11-21, Oct. 1992.
- [33] A. H. Smith, “Centrifuges: Their Development and Use in Gravitational Biology,” *ASGSB Bulletin*, vol. 5, no.2, pp. 33-41, Oct. 1992.
- [34] A. H. Brown, “Centrifuges: Evolution of Their Uses in Plant Gravitational Biology and New Directions for Research on the Ground and in Spaceflight,” *ASGSB Bulletin*, vol. 5, no.2, pp. 43-57, Oct. 1992.
- [35] M. Cogoli, “The Fast Rotating Clinostat: A History of its Use in Gravitational Biology and a Comparison of Ground-Based and Flight Experiment Results,” *ASGSB Bulletin*, vol. 5, no.2, pp. 59-67, Oct. 1992.
- [36] A. Sievers and Z. Hejnowicz, “How Well Does the Clinostat Mimic the Effect of Microgravity on Plant Cells and Organs,” *ASGSB Bulletin*, vol. 5, no.2, pp. 69-75, Oct. 1992.
- [37] Wikipedia, “Clinostat,” <https://en.wikipedia.org/wiki/Clinostat>, accedido: 01-05-2018.
- [38] Wikipedia, “Julius von Sachs,” [https://en.wikipedia.org/wiki/Julius\\_von\\_Sachs](https://en.wikipedia.org/wiki/Julius_von_Sachs), accedido:

01-05-2018.

- [39] W.A.van Loon, “Centrifuges for Microgravity Simulation. The Reduced Gravity Paradigm,” *Frontiers in Astronomy and Space Sciences*, vol. 3, no. 21, pp. 1-6, July 2016.
- [40] B. R. Unsworth and P. I. Lelkes, “Growing tissues in microgravity,” *Nature Med.*, vol. 4, no. 8, pp. 901–907, Aug. 1998.
- [41] K. H. Hasenstein and J. J. van Loon, “Clinostats and Other Rotating Systems—Design, Function, and Limitations,” in *Generation and Applications of Extra-Terrestrial Environments on Earth*, Amsterdam, The Netherlands: River Publishers, 2015, ch. 14, pp. 147-156.
- [42] Wikipedia, “Intensidad del campo gravitatorio,” [https://es.wikipedia.org/wiki/Intensidad\\_del\\_campo\\_gravitatorio](https://es.wikipedia.org/wiki/Intensidad_del_campo_gravitatorio), accedido 30-10-18.

## GLOSARIO DE TÉRMINOS

**Artefactos:** Vibraciones no deseadas transmitidas por los mismos equipos a las muestras biológicas analizadas en las máquinas de microgravedad.

**Clinorotación:** Método utilizado para describir la rotación de elementos de estudios, principalmente plantas a lo largo de un eje horizontal.

**Clinostato:** Un clinostato es un tipo de máquina de microgravedad perteneciente al grupo de máquinas centrífugas, las cuales simulan un entorno de microgravedad mediante rotaciones.

**FF:** Caída libre o *free fall* por sus siglas en inglés. Se refiere al fenómeno que experimenta cualquier objeto al ser atraído por acción gravitacional que ejerce la Tierra sobre cualquier cuerpo en la superficie cuando este se encuentra cayendo en un medio con poca o baja resistencia opuesta a la dirección de su movimiento.

**Microgravedad:** La microgravedad es un fenómeno que se lleva a cabo en el espacio debido a la reducción de la acción de la gravedad de la Tierra.

**RPM:** Máquina de posicionamiento aleatorio o *Random Positioning Machine* por sus siglas en inglés. Es un tipo de máquina de microgravedad perteneciente al grupo de centrífugas. Tiene la misma estructura de un clinostato, sin embargo, el modo de operación es distinto, debido a que las rotaciones del RPM sufren cambios de sentido de giro aleatorios.

**TGA:** Promedio en el tiempo de la gravedad o *Time Gravity-Averaging* es un método muy utilizado que genera un cálculo virtual de la cantidad de gravedad que actúa en un cuerpo. Se utiliza con el fin de conocer la distribución de la acción de la gravedad en las máquinas de microgravedad.

# ANEXOS

## Anexo 1: Programas Fuente

### A. CÓDIGOS DE SIMULACIÓN EN MATLAB.

#### Código para el cálculo de velocidades angulares de los motores en Matlab 'rotation\_speed\_conditioner.m'

```
function [w1_out,w2_out,w3_out] = rotation_speed_conditioner(
w1,w2,w3,modo )
%Convierte velocidades w1 w2 and w3 a rads/sec para implementar en
%codificación posterior
switch modo
case 'dps'
    w1_out = w1*pi/180;
    w2_out = w2*pi/180;
    w3_out = w3*pi/180;
case 'rpm'
    w1_out = w1*6*pi/180;
    w2_out = w2*6*pi/180;
    w3_out = w3*6*pi/180;
end

end
```

#### Código del cálculo de 'gI' (vector de gravedad) en Matlab 'computing\_variables.m'

```
clc; close all; clear all;
syms theta1 theta2 theta3 theta1_0 theta2_0 theta3_0 w_theta1 w_theta2
w_theta3 r_x r_y r_z t a
RG_0 = [
    0 0 1;
    cos(w_theta1*t + theta1_0) sin(w_theta1*t + theta1_0) 0;
    -sin(w_theta1*t + theta1_0) cos(w_theta1*t + theta1_0) 0];
R0_1 = [cos(w_theta2*t+ theta2_0) sin(w_theta2*t +theta2_0) 0;
    0 0 -1;
    sin(w_theta2*t + theta2_0) cos(w_theta2*t +theta2_0)
0];

R1_2 = [ -cos(w_theta3*t +theta3_0) -sin(w_theta3*t +theta3_0) 0;
    0 0 -1;
    sin(w_theta3*t +theta3_0) -cos(w_theta3*t +theta3_0) 0];
%R2_3 = R3_2; %R3_2 tiene la forma de una matriz de identidad, por
%ello su transpuesta es igual

R2_1 = transpose(R1_2);
R1_0 = transpose(R0_1);
R0_G = transpose(RG_0);
```

```

gG = [0;0;-1]; %Vector de gravedad en marco global
gI = R2_1*R1_0*R0_G*gG; % Vector de gravedad en marco interno
gI = subs(gI,theta1_0,0);% posición angular inicial 1 puesta a 0
gI = subs(gI,theta2_0,0);% posición angular inicial 2 puesta a 0
gI = subs(gI,theta3_0,0);% posición angular inicial 3 puesta a 0

save('variables.mat','RG_0','R0_1','R1_2','R2_1','R1_0','R0_G','gI')

```

## Código random walker como referencia para el sentido de giro de las velocidades angulares $w_1$ , $w_2$ y $w_3$ en Matlab 'rand\_dir.m'

```

function [ rand_vector ] = rand_dir( length, dir_eval_time,
sim_step_size)
%Provee un vector con cambios aleatorios en dirección para un
%intervalo específico de tiempo.
%rand_vector: da un vector con número aleatorio
%length: longitud del vector aleatorio, usualmente la misma longitud
%del vector de tiempo
%dir_eval_time: duración del intervalo de tiempo
rand_vector = 2*randi([1 2],1,length) - 3; % genera -1 o 1 en el
%vector rand_vector con la longitud de t_vector
eval_time = dir_eval_time;%s -> tiempo para la evaluación de la
%dirección de rotación
eval_step_time = eval_time/sim_step_size;% -> agrupando valores dentro
%del vector para la duración del step
%tiempo de evaluación del step debe ser mayor que 10
last_dir = 0; %1 para más de cero, 0 igual a 0, -1 para menos de cero
%eval_step_time debe ser más grande que 20. Parámetros para ello =>
%eval time = 2 y sim step = 0.1
for k = 1:eval_step_time:length
    rand_vector(k:(k+eval_step_time-1)) = rand_vector(k);
    new_dir = sign(rand_vector(k));
    if (last_dir == 0) && (k == 1)
        rand_vector(k:10)= rand_vector(k:10).*[0 0.1 0.2 0.3 0.4
0.5 0.6 0.7 0.8 0.9];
    elseif (last_dir == 1) && (new_dir == -1)
        rand_vector(k:k+18) = rand_vector(k:k+18).*[-0.9 -0.8 -0.7
-0.6 -0.5 -0.4 -0.3 -0.2 -0.1 0 0.1 0.2 0.3 0.4 0.5 0.6 0.7 0.8 0.9];
    elseif (last_dir == -1) && (new_dir == 1)
        rand_vector(k:k+18) = rand_vector(k:k+18).*[-0.9 -0.8 -0.7
-0.6 -0.5 -0.4 -0.3 -0.2 -0.1 0 0.1 0.2 0.3 0.4 0.5 0.6 0.7 0.8 0.9];
    end
    last_dir = new_dir;
end
end
end

```

## Código para la simulación de los Modos Clinostato y RPM en Matlab 'test\_clinostat3DOF.m'

```

clear all; close all; clc;

%metros del centro de rotación
radius = 0.1;%m
sim_step_size = 0.1;
[t_vector] = simulation_config(sim_step_size,5,'hr'); %tiempo
%óptimo de step es 0.1s
%escoger entre: 'sec' 'min' 'hr'
%escoger 0.2 ayuda a despreciar la transición de las posiciones
%angulares cuando un cambio de signo en las velocidades de
%rotación ocurre en el modo RPM

% % %      Acvtivar para modo rpm:
%      %creando movimiento aleatorio:
[ rand_vector_1 ] = rand_dir(length(t_vector), 2, sim_step_size);
%tamaño del vector aleatorio, intervalo del tiempo de evaluación y
%el tamaño del step del tiempo de simulación
[ rand_vector_2 ] = rand_dir(length(t_vector), 2, sim_step_size);
[ rand_vector_3 ] = rand_dir(length(t_vector), 2, sim_step_size);

% t_vector = t_vector.*rand_vector;

%aplying changes in direction to time vector

%escoge velocidades de rotación (w1 marco exterior, w2 marco
%intermedio, w3 marco interno)
w1 = 10; w2 = 7; w3 = 4; %misma unidad para todos (rpm or dps)

%convirtiendo rpm or dps -> rads/sec
[w1,w2,w3] = rotation_speed_conditioner(w1,w2,w3,'rpm');
%escoger entre: dps(grados por segundo) o rpm (revoluciones por
%minuto)
% Para el clinostato:
ratio = 4/1.8;

w1t = w1.*t_vector; %w1*t (velocidad de rotación multiplicado por
%el tiempo para poder simplificar (usar solo si se usa ratio)
% w2t = w2.*t_vector; %w1*t
% w3t = w3.*t_vector; %w1*t
% para RPM:
w1_vector = w1*rand_vector_1;
w2_vector = w2*rand_vector_2;
w3_vector = w3*rand_vector_3;

w1_vector_t = w1_vector.*t_vector;
w2_vector_t = w2_vector.*t_vector;
w3_vector_t = w3_vector.*t_vector;
%
load variables.mat
% cargando matrices de rotación y orientación del vector de
%gravedad gI en el marco de rotación interno I.
syms theta1 theta2 theta3 theta1_0 theta2_0 theta3_0 w_theta1
w_theta2 w_theta3 r_x r_y r_z t a

```

```

%para el modo clinostato
%   gI = subs(gI,w_theta3,w_theta1/ratio/ratio);%valor de velocidad
%angular inicial
%   gI = subs(gI,w_theta2,w_theta1/ratio);%valor de velocidad
%angular inicial
%   gI = subs(gI,t*w_theta1,a);%valor de velocidad angular inicial
%   gI = eval(subs(gI,a,w1t));%valor de velocidad angular inicial
%for RPM mode:
%   gI = subs(gI,w_theta3,);%valor de velocidad angular inicial
% %   gI = subs(gI,w_theta2,w_theta1/ratio);%valor de velocidad
%angular inicial
%   gI = subs(gI,cos(t*w_theta3),sin(pi/2 - t*w_theta3));%valor de
%velocidad angular inicial
%   gI = subs(gI,cos(t*w_theta2),sin(pi/2 - t*w_theta2));%valor de
%velocidad angular inicial
%   gI = subs(gI,cos(t*w_theta1),sin(pi/2 - t*w_theta1));%valor de
%velocidad angular inicial
% % activar for rpm:
%   gI = eval(subs(gI,{t*w_theta1,t*w_theta2,t*w_theta3},
%{w1_vector_t,w2_vector_t,w3_vector_t}));
%valor de velocidad angular inicial

gI_x_cumulated = cumsum(gI(1,:));%gravedad parcial acumulada
gI_y_cumulated = cumsum(gI(2,:));
gI_z_cumulated = cumsum(gI(3,:));
n = 1:length(gI(1,:)); %número de muestras acumuladas
gI_x_mean = gI_x_cumulated./n; %gravedad parcial promedio en el
%tiempo
gI_y_mean = gI_y_cumulated./n;
gI_z_mean = gI_z_cumulated./n;
Gmean = sqrt(gI_x_mean.^2 +gI_y_mean.^2 +gI_z_mean.^2); %gravedad
%total promedio en el tiempo

save('24hclinostat_ratio005','Gmean','t_vector','gI_x_mean','gI_y_mean
','gI_z_mean')

figure(2)
% subplot(2,1,1)
plot(t_vector,Gmean,'b','LineWidth',2)
grid on
xlabel('Time(s)','FontSize',12)
ylabel('Gravity(g)','FontSize',12)
title('Mean Gravity over time','FontSize',12)
axis([0 86400 0 0.0001])

% activar el siguiente código para obtener el valor de aceleración no
%gravitacional->...

% surf(gI(1,:),gI(3,:),gI(3,:))
%
%
%
% r_local = [r_x;r_y;r_z];
% p_global = RG_0*R0_1*R1_2*R2_3*r_local;%vector de posicion global
% Ax_global = diff(p_global(1), t,2);
% Ay_global = diff(p_global(2), t,2);
% Az_global = diff(p_global(3), t,2);

```

```

% A_global = sqrt(Ax_global^2+Ay_global^2+Az_global^2);
% %
% A_global_evaluated=A_global; %para hacer pruebas(evaluar este codigo
%para resetear)
% A_global_evaluated = subs(A_global_evaluated,theta1_0,0);%valor de
%posicion angular
% A_global_evaluated = subs(A_global_evaluated,theta2_0,0);%valor de
%posicion angular
% A_global_evaluated = subs(A_global_evaluated,theta3_0,0);%valor de
%posicion angular
% A_global_evaluated =
%subs(A_global_evaluated,w_theta3,w_theta1/2.22/2.22);%valor de
%velocidad angular inicial
% A_global_evaluated =
%subs(A_global_evaluated,w_theta2,w_theta1/2.22);%valor de velocidad
%angular inicial
%
% A_global_evaluated =
%subs(A_global_evaluated,w_theta1,dps*pi/180);%valor de velocidad
%angular inicial
%
% A_global_evaluated = simplify(A_global_evaluated);
%
% help = A_global_evaluated;
% period = 360/dps;%period of rotation
% evaluation_time = 0:0.1:120;%120secs 2 min
%
%
% n = 2^4-1; %15
% [x,y,z] = sphere(n); %16x16 matrix x y and z
%
% x =100*x; y = 100*y; z=100*z; %converting to mm ( radius is 1dm,
%*100 becomes 100mm radius)
% % c = zeros(16);
% c = struct2array(load('matlab_a.mat'));
% % for j = 1:16
% %     for k = 1:16
% % A_global_evaluated = help;
% % A_global_evaluated =
%subs(A_global_evaluated,r_x,x(j,k));%aceleracion global del punto x
% % A_global_evaluated =
%subs(A_global_evaluated,r_y,y(j,k));%aceleracion global del punto y
% % A_global_evaluated =
%subs(A_global_evaluated,r_z,z(j,k));%aceleracion global del punto z
% %
% % A_global_evaluated_values =
%eval(subs(A_global_evaluated,t,evaluation_time));
% % Mean =
%sum(A_global_evaluated_values)/length(A_global_evaluated_values)/9810
%conversion de mm/s^2 a g
% % %se divide entre 9810 debido a la multiplicacion por 100 en 'x'
%'y' y 'z' y para convertir a m/s^2 y luego a 'g'
% % c(j,k) = Mean;
% %     end
% % end
% x =x/10; y = y/10; z=z/10; %turns to cm for plotting
% figure
% surf(x,y,z,c,'FaceColor','interp','FaceLighting','phong')
% % camlight right

```



```

% colormap('Default'),colorbar
% axis equal
% grid on
% xlabel('X (cm)','FontSize',12)
% ylabel('Y (cm)','FontSize',12)
% zlabel('Z (cm)','FontSize',12)
% title('Mean Global Acceleration','FontSize',12)
% ...<- Hasta aquí

```

## Código para la simulación del Modo RPM en Matlab 'rpm\_test.m'

```

clc; clear all; close all;
%Escoger velocidades de rotación (w1 marco exterior, w2 marco
%intermedio, w3 marco interno)
w1 = 10; w2 = 4.5; w3 = 2.025; %misma unidad para todos (rpm o dps)
%a continuación se implementa el random walk

%se convierten las unidades rpm o dps -> rads/sec
[w1,w2,w3] = rotation_speed_conditioner(w1,w2,w3,'rpm');
%choose between: dps(degrees per second) or rpm
[t_vector] = simulation_config(0.1,300,'sec');

load variables.mat
% Cargando matrices de rotación y orientación del vector de gravedad
%gI en el marco interno I.
syms theta1 theta2 theta3 theta1_0 theta2_0 theta3_0 w_theta1 w_theta2
w_theta3 r_x r_y r_z t a
gI = subs(gI,w_theta3,w3);%valor de velocidad angular inicial
gI = subs(gI,w_theta2,w2);%valor de velocidad angular inicial
gI = subs(gI,w_theta1,w1);%valor de velocidad angular inicial

gI = eval(subs(gI,t,t_vector));%valor de velocidad angular inicial

gI_x_cumulated = cumsum(gI(1,:));%gravedad parcial acumulada
gI_y_cumulated = cumsum(gI(2,:));
gI_z_cumulated = cumsum(gI(3,:));
n = 1:length(gI(1,:)); %número de muestras acumuladas
gI_x_mean = gI_x_cumulated./n; %gravedad parcial promedio en el tiempo
gI_y_mean = gI_y_cumulated./n;
gI_z_mean = gI_z_cumulated./n;

plot3(gI(1,:), gI(2,:), gI(3:),'b','LineWidth',2)
plot(t_vector,gI_x_mean,'r',t_vector,gI_y_mean,'g',t_vector,gI_z_mean,
'm')
grid on
xlabel('Time(s)','FontSize',12)
ylabel('Gravity(g)','FontSize',12)
title('Mean Gravity over time','FontSize',12)
legend('Mean gravity in X','Mean gravity in Y','Mean gravity in
Z','Location','SouthWest')

```

## Código de ploteado de los datos del sensor acelerómetro BNO055 en Matlab 'sensor\_data\_plotting.m'

```
%prueba con un solo marco
pruebal_sensor = struct2array(load('data.mat'));
x_g = pruebal_sensor(:,1);y_g = pruebal_sensor(:,2);z_g =
pruebal_sensor(:,3);
x_a = pruebal_sensor(:,4);y_a = pruebal_sensor(:,5);z_a =
pruebal_sensor(:,6);
x_g = x_g/9.8; y_g = y_g/9.8; z_g = z_g/9.8;
x_a = x_a/9.8; y_a = y_a/9.8; z_a = z_a/9.8;

x_g_cumulated = cumsum(x_g);%gravedad parcial acumulada
y_g_cumulated = cumsum(y_g);
z_g_cumulated = cumsum(z_g);
x_g_cumulated_t = transpose(x_g_cumulated); %transpuesta a ser
%ploteada
y_g_cumulated_t = transpose(y_g_cumulated);
z_g_cumulated_t = transpose(z_g_cumulated);
n = 1:length(x_g_cumulated); %número de muestras acumuladas
x_g_mean = x_g_cumulated_t./n; %gravedad parcial promedio en el tiempo
y_g_mean = y_g_cumulated_t./n;
z_g_mean = z_g_cumulated_t./n;
Sensor_Gmean = sqrt(x_g_mean.^2 +y_g_mean.^2 +z_g_mean.^2);
%aceleración gravitacional promedio
sensor_time = linspace(0,length(Sensor_Gmean),length(Sensor_Gmean));

Ax_global = x_a; Ay_global = y_a; Az_global = z_a;
A_global = sqrt(Ax_global.^2+Ay_global.^2+Az_global.^2); %aceleración
%no gravitacional promedio

Figure
%orientación del vector de gravedad del sensor
plot3(x_g,y_g,z_g,'b','LineWidth',2)
axis([-1 1 -1 1 -1 1])
grid on
xlabel('X axis','FontSize',12)
ylabel('Y axis','FontSize',12)
zlabel('Z axis','FontSize',12)
title('Sensor Gravity Vector','FontSize',12)

plot(sensor_time,Sensor_Gmean,'b','LineWidth',2)
grid on
xlabel('Time(s)','FontSize',12)
ylabel('Gravity(g)','FontSize',12)
title('Sensor Mean Gravity over time','FontSize',12)
axis([0 length(Sensor_Gmean) 0 max(Sensor_Gmean)])
```

## **B. CÓDIGO DE IMPLEMENTACIÓN EN RASPBERRY**

El algoritmo de control a implementar en los motores será el PID. Este algoritmo tiene alta aceptación en la industria y gran facilidad de aplicación en diversos entornos. Los motores deben tener una velocidad controlada sin OS (sobreimpulso u *overshoot* por sus siglas en inglés) y con un tiempo de establecimiento menor a 1s.

El algoritmo Random Walker es utilizado para generar caminatas al azar en un plano de dos dimensiones. La codificación de este algoritmo consiste en obtener elementos aleatorios cada cierto intervalo que permitan, en nuestro caso, determinar el sentido de giro de cada motor de manera aleatoria.

El sensor BNO055 es un acelerómetro 3D el cual tiene 9 grados de libertad. Los datos obtenidos del sensor son las componentes del vector de gravedad en cada instante de tiempo y las aceleraciones no gravitacionales para corroborar esta componente que depende de la distancia escogida desde el centro de rotación, la cual debe ser la misma que la simulación.

Los codificadores magnéticos son de cuadratura, por lo que son necesarias 4 entradas para poder usar al máximo la cantidad de datos que nos brinda este sensor. Este codificador posee una resolución de 11PPR, pero está sujeto a un motor DC con reducción de 1:36, por lo que en la resolución real del motor en la salida es de 396PPR. Adicionalmente, si se escoge el mejor tipo de decodificación llama X4, se obtiene 4 veces mayor resolución, dando un total de 1584PPR.

## Código principal del controlador Raspberry Pi 'Main.py'

```
#IMPORTACIÓN DE LIBRERÍAS
import RPi.GPIO as GPIO
import time
import random
#BNO055 library
import logging
import sys
import csv #excel files
#CONFIGURACIÓN INICIAL DE LOS GPIO DEL RASPBERRY
GPIO.cleanup()
GPIO.setmode(GPIO.BCM)
#MOTOR 3
M3_AIN1 = 8 #GPIO 18, FUENTE
M3_AIN2 = 7 #GPIO 23, TIERRA
M3_PWMA = 27 #GPIO 4, CONTROL PWM
M3_enc_ch_A = 20 #GPIO 17, LECTURA DE CANAL A DE ENCODER
M3_enc_ch_B = 21 #GPIO 27, LECTURA DE CANAL B DE ENCODER
#MOTOR 2:
M2_IN1 = 24 #GPIO 25, FUENTE
M2_IN2 = 25 #GPIO 8, TIERRA
M2_PWM = 17 #GPIO 9, CONTROL PWM
M2_enc_ch_A = 12 #...
M2_enc_ch_B = 16 #...
#MOTOR 1:
M1_IN1 = 18 #GPIO 18
M1_IN2 = 23 #GPIO 23
M1_PWM = 4 #GPIO 4
M1_enc_ch_A = 19 #...
M1_enc_ch_B = 26 #...
#ENTRADAS:
#CONFIGURACIÓN DE PINES COMO ENTRADAS
GPIO.setup(M3_enc_ch_A,GPIO.IN) #CANAL A MOTOR 3
GPIO.setup(M3_enc_ch_B,GPIO.IN) #CANAL B MOTOR 3
GPIO.setup(M2_enc_ch_A,GPIO.IN) #CANAL A MOTOR 3
GPIO.setup(M2_enc_ch_B,GPIO.IN) #CANAL B MOTOR 3
GPIO.setup(M1_enc_ch_A,GPIO.IN) #CANAL A MOTOR 3
GPIO.setup(M1_enc_ch_B,GPIO.IN) #CANAL B MOTOR 3
#SALIDAS:
GPIO.setup(M3_AIN1,GPIO.OUT) #CONFIGURACIÓN DE PINES COMO SALIDAS
GPIO.setup(M3_AIN2,GPIO.OUT)
GPIO.setup(M3_PWMA,GPIO.OUT)
#GPIO.setup(D2_STBY,GPIO.OUT) ERA UN PIN ANTES ,AHORA SE CONECTA A GND
GPIO.setup(M2_IN1,GPIO.OUT)
GPIO.setup(M2_IN2,GPIO.OUT)
GPIO.setup(M2_PWM,GPIO.OUT)
GPIO.setup(M1_IN1,GPIO.OUT)
GPIO.setup(M1_IN2,GPIO.OUT)
GPIO.setup(M1_PWM,GPIO.OUT)
hz = 5000 #5000~10000Hz PRODUCE UN MEJOR PWM
PWM3 = GPIO.PWM(M3_PWMA,hz) #SEÑAL INICIAL DE 15kHz
PWM2 = GPIO.PWM(M2_PWM,hz)
PWM1 = GPIO.PWM(M1_PWM,hz)
##GPIO.output(D2_STBY,GPIO.LOW) #starting DC driver
#FUNCIONES DE DIRECCIÓN
def CW_M3(): #CONFIGURACIÓN EN SENTIDO DE LAS AGUJAS DEL RELOJ
```

```

GPIO.output(M3_AIN1,GPIO.HIGH)
GPIO.output(M3_AIN2,GPIO.LOW)
dir3 = "cw"
def CCW_M3(): #CONFIGURACIÓN EN CONTRA DEL SENTIDO DE LAS AGUJAS DEL RELOJ
GPIO.output(M3_AIN1,GPIO.LOW)
GPIO.output(M3_AIN2,GPIO.HIGH)
dir3 = "ccw"
def STOP_M3(): #CONFIGURACIÓN PARA DETENER EL MOVIMIENTO
GPIO.output(M3_AIN1,GPIO.LOW)
GPIO.output(M3_AIN2,GPIO.LOW)
dir3 = "stop"
##def STANDBY_M3():
## GPIO.output(D2_STBY,GPIO.LOW)
## return;
def CW_M2(): #CONFIGURACIÓN EN SENTIDO DE LAS AGUJAS DEL RELOJ
GPIO.output(M2_IN1,GPIO.HIGH)
GPIO.output(M2_IN2,GPIO.LOW)
dir2 = "cw"
def CCW_M2(): #CONFIGURACIÓN EN CONTRA DEL SENTIDO DE LAS AGUJAS DEL RELOJ
GPIO.output(M2_IN1,GPIO.LOW)
GPIO.output(M2_IN2,GPIO.HIGH)
dir2 = "ccw"
def STOP_M2(): #CONFIGURACIÓN PARA DETENER EL MOVIMIENTO
GPIO.output(M2_IN1,GPIO.LOW)
GPIO.output(M2_IN2,GPIO.LOW)
dir2 = "stop"
def CW_M1(): #CONFIGURACIÓN EN SENTIDO DE LAS AGUJAS DEL RELOJ
GPIO.output(M1_IN1,GPIO.HIGH)
GPIO.output(M1_IN2,GPIO.LOW)
dir1 = "cw"
def CCW_M1(): #CONFIGURACIÓN EN CONTRA DEL SENTIDO DE LAS AGUJAS DEL RELOJ
GPIO.output(M1_IN1,GPIO.LOW)
GPIO.output(M1_IN2,GPIO.HIGH)
dir1 = "ccw"
def STOP_M1(): #CONFIGURACIÓN PARA DETENER EL MOVIMIENTO
GPIO.output(M1_IN1,GPIO.LOW)
GPIO.output(M1_IN2,GPIO.LOW)
dir1 = "cw"

#DECLARANDO VARIABLES GLOBALES PARA LECTURA DE ENCODERS
global counts
global discrete_time
global discrete_time_last
global time_passed
M3_Encoder_A_old,M3_Encoder_B_old = None,None
counts,error,discrete_time,discrete_time_last= 0,0,0,0
def encodercount(term):
global M3_Encoder_A
global M3_Encoder_A_old
global M3_Encoder_B
global M3_Encoder_B_old
M3_Encoder_A,M3_Encoder_B = GPIO.input(20),GPIO.input(21) #GPIOs CORRESPONDIENTES
M2_Encoder_A,M2_Encoder_B = GPIO.input(12),GPIO.input(16)
M1_Encoder_A,M1_Encoder_B = GPIO.input(19),GPIO.input(26)
if ((M3_Encoder_A,M3_Encoder_B_old) == (1,0)) or ((M3_Encoder_A,M3_Encoder_B_old) ==
(0,1)):
# PARA ROTACION EN SENTIDO DEL RELOJ
counts += 1

```

```

## print 'La cuenta del encoder es %s\nAB is %s %s %s' % (counts, M3_Encoder_A,
M3_Encoder_B,time_passed)
elif ((M3_Encoder_A,M3_Encoder_B_old) == (1,1)) or ((M3_Encoder_A,M3_Encoder_B_old) ==
(0,0)):
# PARA ROTACIÓN EN CONTRA DE LAS AGUJAS DEL RELOJ
counts -= 1

##PARA REALIZAR UN PRUEBA DE LECTURA, USAR EL SIGUIENTE CODIGO ##
## print 'La cuenta del encofer es %s\nAB is %s %s %s' % (counts, M3_Encoder_A,
M3_Encoder_B,time_passed)
## else:
## #this will be an error
## error += 1
## print 'Error count is %s' %error
##
## if (counts == -396) or (counts == 396) : #reinitializing circle degrees every 11*36 counts
## counts = 0

M3_Encoder_A_old,M3_Encoder_B_old = M3_Encoder_A,M3_Encoder_B
# INICIALIZANDO INTERRUPCIONES – SE ACTIVAN EN LECTURAS DE SUBIDAS Y
BAJADAS
GPIO.add_event_detect(20, GPIO.BOTH, callback = encodercount) # Encoder A
GPIO.add_event_detect(21, GPIO.BOTH, callback = encodercount) # Encoder B
#PARA AMBOS SUBIDAS Y BAJADAS
# ESTA PARTE DE CODIGO CORRE DE MANERA NORMAL EN EL SEGUNDO PLANO
#ESTABLECIENDO DIRECCIONES DE ROTACION INICIALES PARA LOS MOTORES
CW_M3()
CW_M2()
CW_M1()
#SE ESTABLECE EL DUTY CYCLE DE CADA MOTOR
PWM3.start(0)
PWM2.start(0)
PWM1.start(0)
start = time.time() #COMIENZA EL MOVIMIENTO
discrete_time_last = time.time()
discrete_position_last = counts
with open('M3_speed','w',newline=") as m:
writer = csv.writer(m)
while (1):
time.sleep(1)
#EVALUANDO VELOCIDAD
discrete_time = time.time() #TIEMPO ACTUAL
discrete_position = counts*0.2272 #POSICION ACTUAL *0.9 -> CODX1 *0.2272 -> CODX4
#DETALLES DE TIEMPO Y DISTANCIA
time_passed = discrete_time-discrete_time_last #TIEMPO DELTA
distance_traveled = discrete_position-discrete_position_last #DISTANCIA DELTA
#CALCULANDO VELOCIDAD DISCRETA
discrete_speed = (distance_traveled)/(time_passed)
#TIEMPO DE SIMULACION
current_sim_time = discrete_time - start
#GUARDANDO VELOCIDAD VS TIEMPO
writer.writerow([int(current_sim_time),int(discrete_speed)])
#ACTUALIZANDO EL ULTIMO VALOR
discrete_time_last = discrete_time
discrete_position_last = discrete_position
print ('La velocidad es { }grados/s'.format(int(discrete_speed)))

```

## Anexo 2: Construcción de la máquina de microgravedad.

### La Arquitectura Del Sistema

El primer paso es el diseño de la arquitectura de la máquina como un sistema. Así se establece las restricciones y el alcance de todos los elementos electrónicos, mecánicos, eléctricos y electromecánicos a tener en consideración. El trabajo de investigación de esta tesis no pudo encontrar precedentes que muestren una labor completa de la creación de una máquina de microgravedad, por ello, en este anexo se brinda un énfasis especial acerca de los requerimientos de diseño necesarios y la metodología de cada paso.

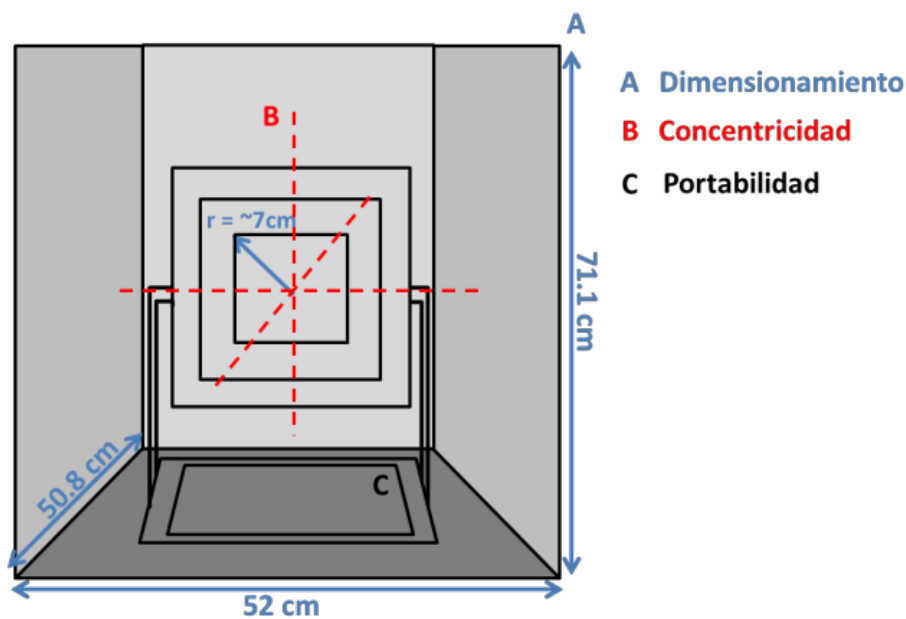


Figura 27 Requerimientos físicos de la máquina de microgravedad de 3GDL.

### Diseño mecánico

La máquina de microgravedad de 3GDL debe cumplir con requerimientos básicos de diseño mecánico, como un dimensionamiento óptimo, ya que las dimensiones de la máquina no pueden exceder el espacio brindado por los modelos de la incubadora, concentricidad axial, debido a que los ejes de rotación deben coincidir en el

centro de rotación ubicado en el espacio para las muestras y portabilidad, con el fin de facilitar el transporte y la instalación de la máquina de microgravedad de 3GDL.

El material seleccionado para los armazones o marcos de la máquina de microgravedad fue aluminio, debido a las ventajas como bajo peso, baja oxidación en el tiempo y relativo bajo coste. Los elementos mecánicos utilizados fueron:

- Tubos rectangulares de aluminio 041745
- Ángulos iguales de aluminio 041109
- Bridas rígidas de acero Ø 8mm
- Chumaceras Ø 10mm
- Acoplamiento eje-brida
- Pernos y tuercas M3, M4 y M5
- Prisioneros 3/8, M3 y M4

## Diseño electrónico

En el diseño electrónico se realiza la selección de los elementos electromecánicos, de los chips como los drivers o puentes H de los motores, elementos rotacionales de transmisión de potencia o datos llamados anillos deslizantes, también conocidos como *slip rings*, la selección del sensor que brinda los datos necesarios como la orientación y del microcontrolador o tarjeta que ejecuta los algoritmos y recopilará los datos del sensor. Los componentes electrónicos seleccionados fueron:

- **Motores DC 12V GW4058-31Z:** Los motores DC sin escobillas fueron utilizados debido a su precisión para controlar velocidad. Este modelo viene con una caja de engranajes reductores 1:36 que brinda torque a la máquina y un codificador magnético de cuadratura de 11PPR (pulsos por revolución).





**Figura 28 Motores DC 12V GW4058-31Z**

- **Slip ring MSC-22-24A:** Este modelo de anillo deslizante posee 24 cables. Cada uno soporta hasta 10A y es capaz de llevar señales de potencia o de control.



**Figura 29 Slip ring MSC-22-24A**

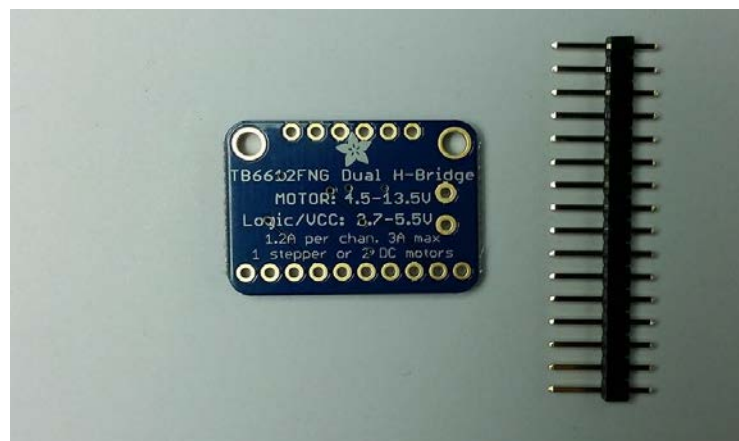
- **Raspberry Pi 3 B+:** Ordenador con comunicación serial, I2C y SPI y 40 pines de uso externo. Esta tarjeta adquiere los datos de orientación y

realiza el control de velocidad de los motores con un algoritmo PID en python 3.5.



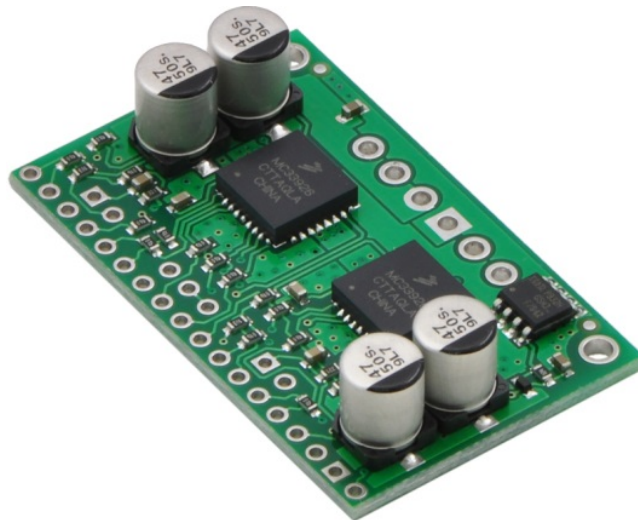
**Figura 30** Raspberry Pi 3 B+

- **Adafruit driver TB6612FNG:** Puente H con 2 salidas de 1.2A por canal. Con este chip se control el motor 3 o el marco 3.



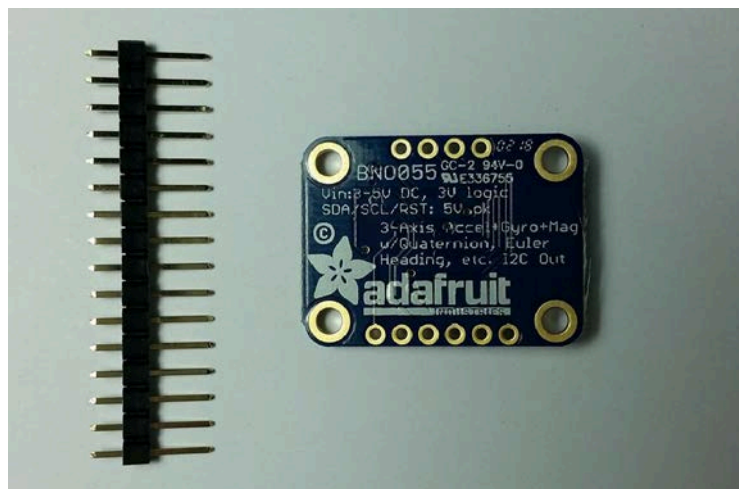
**Figura 31** Adafruit driver TB6612FNG

- **Pololu driver MC33926:** Puente H con 2 salidas de 3A máx. por canal. Es una versión más potente de TB6612FNG utilizada para controlar las velocidades de los motores 1 y 2 o de los marcos 1 y 2 mediante PWM.



**Figura 32 Pololu driver MC33926**

- **Sensor de orientación BNO055:** Sensor de orientación de 9DOF. Con este sensor se obtienen la información de orientación del vector de gravedad y las aceleraciones no gravitacionales.

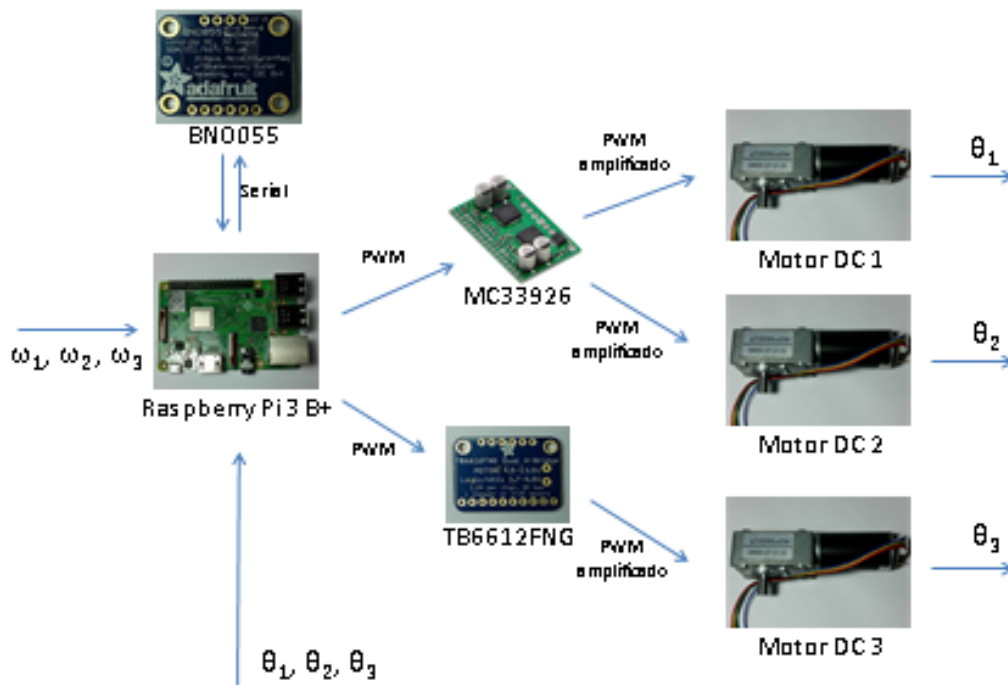


**Figura 33 Sensor de orientación BNO055**

## Diseño de la lógica de control

El esquema de la lógica de control consta de la tarjeta Raspberry Pi 3 B+, donde se implementó el algoritmo de control PID para el control de velocidad de cada motor y se estableció la comunicación serial con sensor de orientación BNO055. El sensor de orientación BNO055 utiliza el protocolo de comunicación I2C, sin embargo, los puertos SCL y SDA se han adaptado para comunicarse serialmente mediante un módulo

desarrollado por Adafruit para los Raspberry. Los drivers de adrafruit y pololu que brindan 1.2 amperios máx. y 3 amperios máx. respectivamente, los motores los cuales son controlados mediante señales PWM provenientes de los drivers.



**Figura 34** Esquema de la lógica de control de la máquina de microgravedad de 3GDL

### Ensamblaje de la Máquina de 3GDL

La construcción se realizó exclusivamente con elementos de fijación como pernos, tuercas y prisioneros, de manera que la máquina sea completamente desmontable. La construcción de la máquina se llevó a cabo por partes debido a la complejidad del ensamblaje general.

Primero, se ensamblaron los armazones o marcos de cada grado de libertad. Cada armazón consta de 4 tubos rectangulares de la misma longitud, los cuales están unidos por ángulos iguales mediante pernos y tuercas.

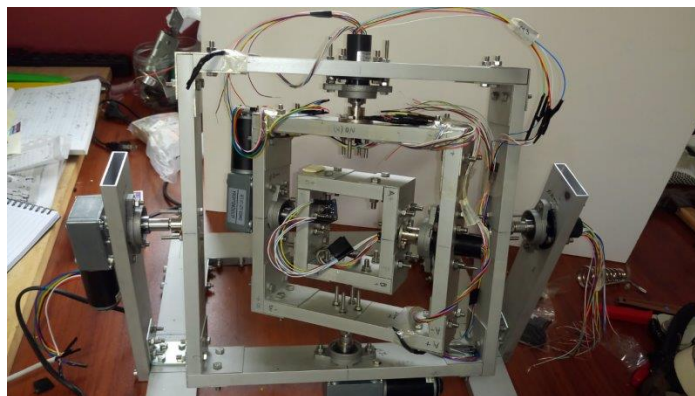


**Figura 35** Construcción de los marcos de cada GDL



**Figura 36** Construcción de la base

Segundo, se colocaron los *slip rings* y los motores DC en lugares opuestos de cada marco de rotación, y se procedió a realizar las conexiones mecánicas utilizando los acoplamientos de entre los ejes de los motores y las bridas rígidas para unir la base con los marcos.



**Figura 37** Conexiones mecánicas con acoplamientos eje-brida

Finalmente, se realizó el cableado necesario y las correspondientes soldaduras de los cables de los *slip rings* o anillos deslizantes con los motores para transmitir las señales de potencia y de control hasta el marco más interno de la máquina.



**Figura 38** Primeras pruebas de la máquina de 3GDL ensamblada.



## Conexiones eléctricas

Se muestra la lógica de las conexiones realizada entre la tarjeta Raspberry y los demás componentes electrónicos.

Rasberry Pi 3 B+ Pinout (BCM)						
SOURCE DRIVERS + S	3.3V			5V		GPIO
	GPIO 2			5V		Avaiability:
	GPIO 3			GND		No
PWM M1 (OUT)	GPIO 4			GPIO 14	SCL BNO055	Maybe
GND DRIVERS + SENS	GND			GPIO 15	SDA BNO055	Yes
PWM M2 (OUT)	GPIO 17			GPIO 18	AIN1 M1 (OUT)	
PWM M3 (OUT)	GPIO 27			GND		
	GPIO 22			GPIO 23	AIN2 M1 (OUT)	
SOURCE ENCODERS	3.3V			GPIO 24	IN1 M2 (OUT)	
	GPIO10			GND		
RST BNO055	GPIO 9			GPIO 25	IN2 M2 (OUT)	
	GPIO11			GPIO 8	IN1 M3 (OUT)	
GND ENCODERS	GND			GPIO 7	IN2 M3 (OUT)	
	DNC			DNC		
	GPIO 5			GND		
	GPIO 6			GPIO 12	CHA M2 (IN)	
	GPIO 13			GND		
CHA M1 (IN)	GPIO 19			GPIO 16	CHB M2 (IN)	
CHB M1 (IN)	GPIO 26			GPIO 20	CHA M3 (IN)	
	GND			GPIO 21	CHB M3 (IN)	

Figura 39 Conexiones realizadas en los pines externos del Raspberry pi 3 B+.

		TB6612FNG			
		12V	0V		
	Vm	+	-	Motor B	
3.3v	Vcc	Vmotor			
0V	GND				
	PWMB				
	BIN2			GND	
	BIN1				
0V	STBY			Ma	M3+
GPIO 8	AIN1				M3-
GPIO 7	AIN2				
GPIO 27	PWMA				

**Figura 40 Conexiones del driver TB6612FNG.**

		MC33926			
				M2FB	
M2+	M2OUT2			M2SF	
M2-	M2OUT1			M2D1	GND
				M2D2	GPIO 17
12V	VIN			M2IN1	GPIO 24
0	GND			M2IN2	GPIO 25
				INV	
M1+	M1OUT2			SLEW	3.3V
M1-	M1OUT1			EN	3.3V
				M1FB	
				M1SF	
				M1D1	GND
				M1D2	GPIO 4
				M1IN1	GPIO 18
				M1IN2	GPIO 23
				VDD	3.3V
				GND	GND
				VIN	

**Figura 41 Conexiones del driver MC33926.**

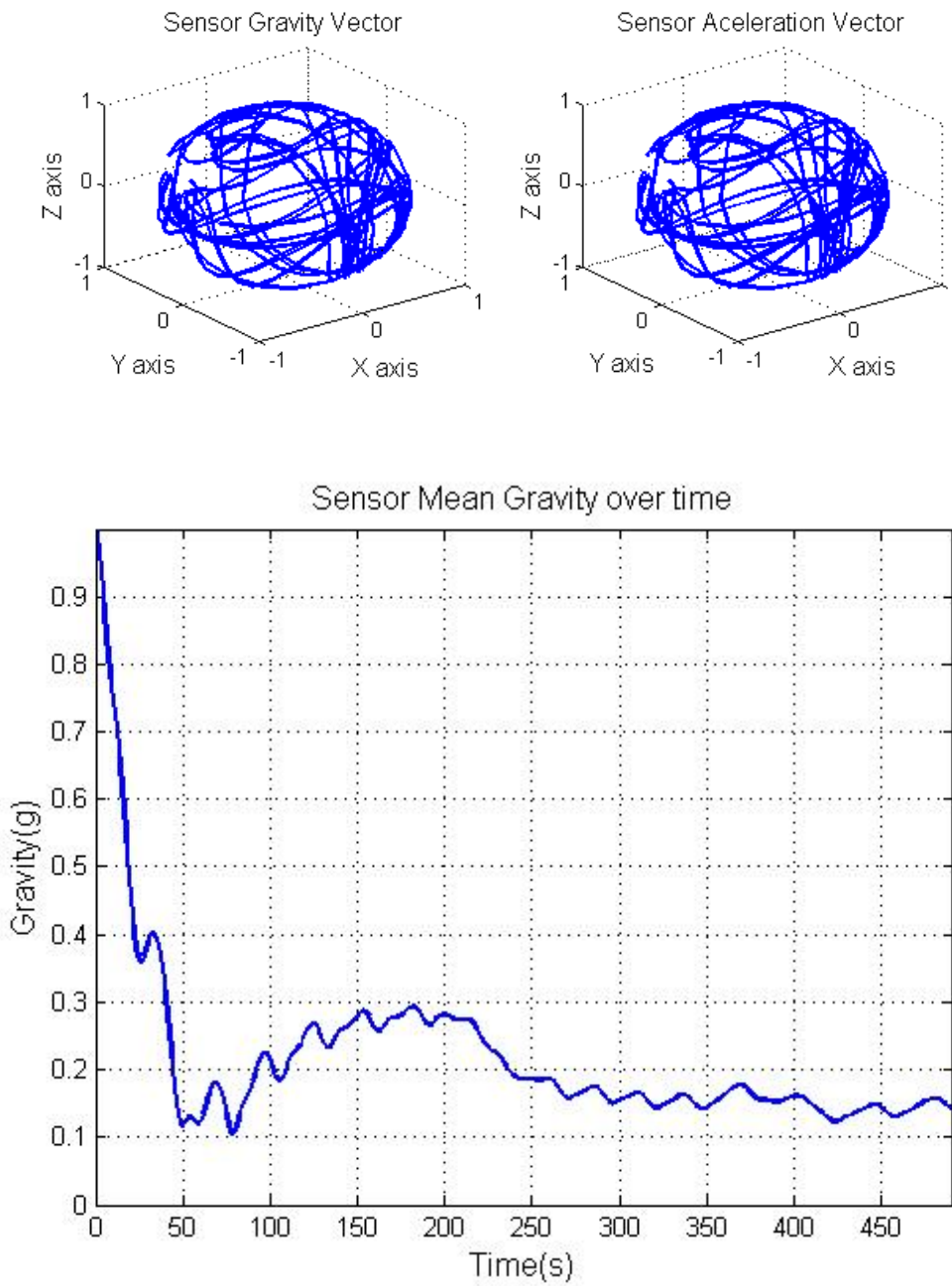


BNO055					
3.3V	VIN				
	3vo			PS0	
GND	GND			PS1	3.3V
GPIO 15	SDA			INT	
GPIO 14	SCL			ADR	
GPIO 9	RST				

**Figura 42 Conexiones del sensor BNO055.**

## Resultados experimentales

En las pruebas experimentales se obtuvieron los resultados mostrados en la Figura 41. Se puede observar que la distribución se asemeja más a la de los clinostatos de 2GDL. También se observa que la gravedad experimentada en el tiempo se reduce pero no a valores tan bajos como los esperados, esto se explicará en detalle en el Capítulo VI.



**Figura 43** Distribución de las aceleraciones gravitacionales y no gravitacionales, y la microgravedad calculada a partir de los datos del sensor acelerómetro 3D.