

Sistema de balanceo en una cuchara para la alimentación de personas con trastornos de movimiento en las extremidades superiores

Balance system in a spoon for feeding people with movement disorders in the upper extremities

Daniel Fernando Rivero Rico & Edwin Calla Durandal

Carrera de Ingeniería Mecatrónica, Departamento de Ciencias Exactas e Ingenierías de la Universidad Católica Boliviana "San Pablo" Regional Cochabamba, Campus Tupuraya. Calle M. Márquez esq. Parque Trigo Andia

daniel.rivero.rico@gmail.com

Resumen: Los temblores se caracterizan por ser un movimiento rítmico y anómalo de diferentes partes del cuerpo, siendo estos variantes y oscilatorios, en el presente artículo se enfoca a las manos afectadas por ello se desarrolló un aporte tecnológico mediante un prototipo para la cuchara brindando estabilidad, seguridad y autonomía en la alimentación, de modo que se estudiaron sus características de los temblores para proyectar el controlador por tres etapas de un diseño mecatrónico. La estabilidad del sistema se encontró a señales con baja intensidad a frecuencias menores a 5 Hz se estabilizó la misma aplicando un controlador PID adaptativo tuning por sus características versátiles frente a sistemas variantes en el tiempo.

Palabras clave: Trastornos de movimiento, sistema de balanceo, señal, control.

Abstract: The tremors are characterized by a rhythmic and anomalous movement of different parts of the body, these variations and oscillatory, in this article focuses on the affected hands was developed a technological contribution by a prototype for the spoon providing stability, safety and autonomy in feeding, so that their characteristics of tremors were studied to project the controller by three stages of a mechatronic design. The stability of the system was found to signals with low intensity at frequencies lower than 5 Hz, it was stabilized by applying a PID adaptive tuning controller for its versatile characteristics versus time varying systems.

Key words: Movement disorders, balancing system, signals, control.

1 Introducción, contextualización y objetivos

En el presente trabajo se enfoca a los trastornos de movimiento de las extremidades superiores ya que estos afectan de forma directa a las actividades que realiza el individuo según las acciones que debe tomar con la mano, como comer y escribir. De modo que el doctor les receta medicamentos según la clase de temblor

que presente la persona. Algunas de las enfermedades relacionadas al temblor son la enfermedad de Parkinson, el temblor Esencial, la Huntington y muchos más (GARCÍA & QUERO, 2012).

En el documento se pretende dar un aporte tecnológico al estilo de vida a las personas que sufren por tales enfermedades donde contemplará varios temas. El sistema de balanceo se basa en la obtención de la flexibilidad y estabilización de algún objeto antes los movimientos externos que pudiesen existir, una de las aplicaciones que usan este método se encuentran en los motores de los cohetes como una cámara de balanceo en la tobera que se lo conoce como “gimballed”. Los sistemas se modernizan con algoritmos de control Proporcional, Integral y Derivativo (PID) y sensores de retroalimentación para obtener más precisión en la aplicación que se desee (REZA, ABDON, & REZA, 2013).

En la actualidad existen trabajos e investigaciones que apoyan al tema de la supresión de los temblores. En una tesis de maestría se desarrolló un guante eficaz, portátil y flexible para la supresión del temblor de manos. Un trabajo similar se desarrolló en un artículo con el tema de: Análisis y control del temblor en la mano usando internet de las cosas (IoT). Una tesis de doctorado despliega un tema de Principios biomecánicos para la supresión del temblor por medios ortésicos. La tecnología fue avanzando y se dio importancia en el tema de la salud, ahora mediante los sistemas de control se puede realizar las órtesis, prótesis, los robots quirúrgicos y aplicaciones de precisión dando lugar a la medicina moderna (BELDA, 2009) (TURKISTANI, 2017) (SACHINDRA & MOHAMMED, 2017) (MATHWORKS, 2018).

De modo que se lleva a cabo por tres etapas de diseño, la primera parte se plantea el diseño mecánico de un sistema de cardán con tres ejes, tomando la forma de un robot manipulador de tres grados de libertad. En la segunda etapa se emplea el sistema de conexión de dos microcontroladores que se dividen en un área de cálculo y la otra de actuación. Por último, en la tercera etapa se realiza un análisis de frecuencia a tres diferentes señales externas según su nivel de intensidad que son alta, mediana y leve por lo que se proyecta e implementa un controlador PID.

1.1 Planteamiento del problema de investigación

Una de las enfermedades más conocidas es la de Parkinson, no tiene cura y puede durar toda la vida, afectando de diferente manera a cada persona que la padece. La Organización Mundial de la Salud (OMS) señala que cerca de 40 millones de personas padecen la enfermedad y un 30% adicional no ha sido diagnosticada, por ello a las personas afectadas se les dificulta la vida cotidiana y la autonomía que podrían tener al momento de realizar sus actividades de nutrición. Viendo que el mayor problema es el control de sus movimientos existe una ausencia de algún

mecanismo que les permita llevar una alimentación tranquila y una vida saludable (FINDLEY & CAPILDEO, 1984) (RODRÍGUEZ, et al., 2012).

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo general

Implementar un sistema de balanceo para la obtención de estabilidad del elemento terminal como un prototipo de cuchara y brindar autonomía a las personas afectadas por los temblores.

1.2.2 Objetivos específicos

- Analizar los temblores de las personas para tratar tecnológicamente.
- Diseñar el sistema mecánico y electrónico para el elemento terminal.
- Implementar el prototipo de manera física que se articule al cubierto.
- Diseñar e implementar el algoritmo de control.
- Realizar pruebas en el prototipo del sistema de balanceo final.

2 Sustento teórico

2.1 Trastornos de movimiento y temblores en las manos

Según Findley y Gresty (1981) el temblor es una oscilación periódica involuntaria de una o varias partes del cuerpo, como ser manos, piernas, etc. Hay diferentes clases de temblores como ser: el temblor de reposo que se produce cuando el músculo está relajado. El temblor postural que se produce cuando la persona mantiene una posición en contra de la gravedad. El temblor cinético aparece durante el movimiento de una parte del cuerpo. El temblor intencional que está presente durante el movimiento voluntario hacia un objetivo. El temblor específico de una tarea aparece cuando se realizan tareas altamente especializadas y orientadas a un objetivo y el temblor isométrico se produce durante una contracción muscular voluntaria que no está acompañada de ningún movimiento. En la siguiente Tabla 1 se hace un resumen de la frecuencia de algunas de las enfermedades más conocidas relacionadas al temblor, las cuales no sobrepasa más de los 20Hz (CHÁVEZ, ONTIVEROS, & CARRILLO, 2013) (FINDLEY & CAPILDEO, 1984).

Tabla 1. Temblores y sus frecuencias

Temblor	Frecuencia [Hz]
Temblor en Reposo	3-6

Temblor Parkinsoniano	3-6
Temblor Mesencefálico	2-4
Temblor Esencial	4-12
Temblor Fisiológico	8-12
Temblor Ortostático	16
Temblor Distónico	<7
Temblor Intencional	3-5

Fuente: Elaboración propia en base a ÁLVAREZ, 2012

2.2 Servomotor

El servomotor se controla a través de modulación por ancho de pulso (PWM) donde su eje de giro del servomotor es aproximadamente 180° y dependiendo de la alimentación que se le suministre puede aumentar su torque. La frecuencia se envía por medio de una secuencia de pulsos al servomotor a 50Hz, lo que significa que cada ciclo tiene una duración de 20 milisegundos. Estas duraciones de cada pulso se interpretan como comandos de posicionamiento del motor, mientras que los espacios entre cada pulso se desprecian. Por lo tanto en el trabajo se contemplará dichos actuadores (TORRENTE, 2013).

Para el funcionamiento cuenta con tres cables el servomotor común, dos para la alimentación, el cual se energiza variando desde 4,8 V a 6 V, y un tercer cable donde se aplica un tren de pulsos de control, con la finalidad de que el circuito de control diferencial interno ubique el servomotor en la posición indicada, pero dentro de su rango de operación de cada fabricante (TORRENTE, 2013) (GARCÍA A. , 2016).

2.3 9DoF Razor IMU M0

Este dispositivo se maneja como un integrado microcontrolador el cual conlleva también el sensor MPU-9250 por ello consta de nueve grados de libertad (DoF) y se caracteriza por ser de propósito general y programable. En este se detecta la aceleración lineal, la velocidad de rotación angular y el vector del campo magnético el cual se utilizarán para el presente trabajo. Dicho dispositivo se viene pre programado de fábrica con firmware de ejemplo y un gestor de arranque compatible con Arduino el cual se muestra en la Figura 1; donde se visualiza la captura de la aceleración angular, el giroscopio y el magnetómetro de los tres ejes respectivamente (SPARKFUN, 2016).

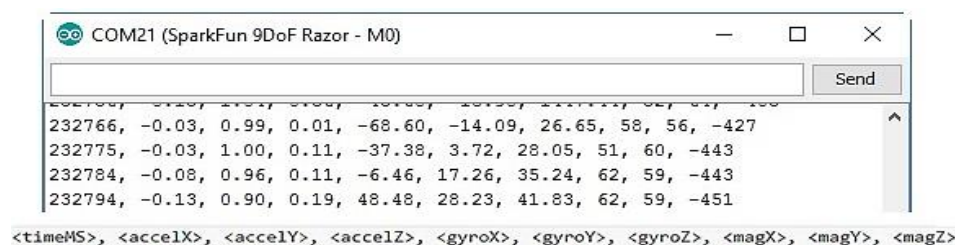


Figura 1: Firmware de fábrica del Razor IMU. Fuente: SPARKFUN, 2016

Si se desea que la placa sea móvil se implementa una batería de polímero de litio (LiPo) de una sola celda, o una conexión de 5 V en el pin Vin, y el zócalo μ SD que es compatible con cualquier tarjeta μ SD donde se registran los datos que procesa el integrado. En el IDE de Arduino se puede incluir la biblioteca MPU-9250 donde se personaliza el firmware y actualiza el nuevo código a través del cable USB micro-B para encender y reprogramar la IMU Razor según las necesidades específicas.

En el procesador de movimiento digital (DMP) del MPU-9250 se incluyen procesos como el cálculo del cuaternión, el conteo de pasos y la determinación de la orientación hacia el IMU. Por otra parte, se puede modificar el rango de frecuencia de muestreo de 1 a 100Hz, para que se logre configurar dichas funciones se puede visitar su página web de la guía de conexión y manejo del 9DoF Razor IMU M0. El microprocesador ATSAM21G18 que se encuentra presente en el Razor IMU tiene características relevantes en cuanto a la memoria flash de lectura y escritura de las operaciones de 256 Kb, como también SRAM 32 Kb, la velocidad del reloj es 48MHz y su bajo consumo de alimentación de 1,62 v – 3,63 v entre sus características sobresalientes (SPARKFUN, 2016).

2.4 Control Proporcional-Integral-Derivativo (PID)

En las industrias se presentan los controladores PID o PID modificado, estos se aplican a varios escenarios o plantas inestables para que logre estabilizar los factores de interés, se exhiben de diversas formas como PID analógicos los cuales son de tipo hidráulico, neumático, eléctrico y muchos de ellos se transforman a PID digitales por medio de microcontroladores, el cual se aplica en el artículo.

El PID se analiza bajo tres acciones que son: la acción proporcional el cual consiste en el producto entre la señal de error y la constante proporcional K_p para lograr que el error en estado estacionario se aproxime a cero; A la vez la acción integral K_i tiene como propósito disminuir y eliminar el error en estado estacionario y por último la acción derivativa K_d es mantener el error al mínimo corrigiéndolo proporcionalmente con la misma velocidad que se produce; de esta manera evita que el error se incremente y lo anticipa, dicho error es la diferencia del valor deseado y el

valor leído. De esta manera, se llega a la función de transferencia (FdT) en el dominio de Laplace (OGATA, 1998).

$$G_c(s) = K_p + \frac{K_I}{s} + K_D s \quad (1)$$

2.4.1 Reglas de sintonización para controladores PID

Existe varias técnicas para sintonizar los parámetros del controlador, pero en el presente artículo se enfoca a la sintonización del controlador a prueba piloto, siendo una de ellas el método de Ziegler y Nichols. En el cual se proponen unas reglas para determinar los valores de la ganancia proporcional K_p , del tiempo integral T_i y del tiempo derivativo T_d , esto se muestra en la FdT de la ecuación 2. Se desglosa en dos métodos en el cual se pretende obtener un máximo sobrepaso del 25% a una respuesta escalón.

$$G_c(s) = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right) \quad (2)$$

El primer método se sintoniza con una señal de entrada escalón unitario para la respuesta de la planta. Si la planta no contiene integradores ni polos dominantes complejos conjugados, la curva de respuesta escalón unitario pudiese tener forma de S (OGATA, 1998).

El segundo método se sintoniza de manera experimental, estableciendo $T_i=0$ y $T_d=0$ y continuación se incrementa la acción proporcional K_p , de cero a un valor crítico K_{cr} donde se exhiba en la salida unas oscilaciones sostenidas, como se muestra a continuación en la Figura 2. Siendo así, que la ganancia crítica K_{cr} y el periodo crítico P_{cr} se determinan empíricamente (OGATA, 1998).

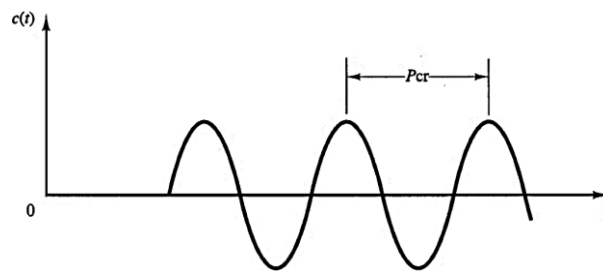


Figura 2: Oscilación sostenida. Fuente: OGATA, 1998

En la Tabla 2 se establecen valores para los parámetros K_p , T_i y T_d ; como ejemplo se toma un controlador PID y se hace uso de la fórmula (2) el cual produce una función de transferencia con un polo en el origen y un cero doble en $s = -\frac{4}{P_{cr}}$, donde se observa en la fórmula (3).

Tabla 2. Sintonización de Ziegler Nichols basada en el segundo método

Tipo de controlador	K_p	T_i	T_d
P	$0,5K_{cr}$	∞	0
PI	$0,45K_{cr}$	$\frac{1}{1,2}P_{cr}$	0
PID	$0,6K_{cr}$	$0,5P_{cr}$	$0,125P_{cr}$

Fuente: Elaboración propia en base a OGATA, 1998

$$G_c(s) = 0,6K_{cr} \left(1 + \frac{1}{0,5P_{cr}s} + 0,125P_{cr}s \right) \quad (3)$$

$$G_c(s) = 0,075K_{cr}P_{cr} \frac{\left(s + \frac{4}{P_{cr}} \right)^2}{s} \quad (4)$$

La fórmula (3) esta descrita por las variables del controlador PID y describe la función de transferencia de la planta que se va a controlar, reemplazando las variables de ganancia crítica K_{cr} y el periodo crítico P_{cr} para obtener la fórmula (4) (OGATA, 1998).

2.5 Denavit Hartenberg (DH)

La metodología de Denavit Hartenberg clásico se especializa por establecer la ubicación del sistema de referencia de los eslabones en los robots articulados, ya sean prismáticas, angulares o con cadenas cinemáticas abiertas. Esta parametrización se propone para estandarizar la ubicación de los sistemas de referencia de los eslabones de un robot (Figura 3:) que permite definir las transformaciones relativas entre dichos eslabones con cuatro parámetros, siendo el número mínimo para configuraciones genéricas en los robots (CRAIG, 2006).

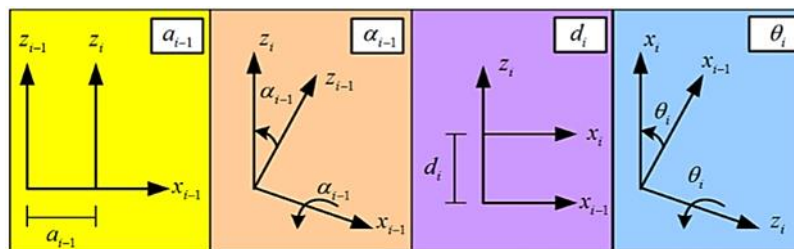


Figura 3: Descripción gráfica de los parámetros por Denavit-Hartenberg.

Fuente: HERNÁNDEZ, et al., 2015.

2.6 Cinemática directa de los robots manipuladores

En la robótica se considera constantemente la ubicación de los objetos en el espacio tridimensional, y los atributos que destacan el espacio son la posición y la orientación. La cinemática se refiere a todas las propiedades del movimiento, las geométricas y las basadas en tiempo, sin considerar las fuerzas que lo ocasionan.

El estudio de la cinemática directa se emplea para determinar la posición y la orientación del efector final, con respecto a un sistema de coordenadas que se toma como referencia, tomando en cuenta que se conoce los valores de las articulaciones y los parámetros geométricos de los elementos del robot. Denavit Hartenberg se relaciona con este procedimiento para obtener una matriz de transformación homogénea (${}^{n-1}T_n$) o también ($M_{n-1,n}$), la ecuación (6), donde sus parámetros se representan en matrices de traslación y rotación de la siguiente manera (BARRIENTOS, PEÑÍN, BALAGUER, & ARACIL, 2007).

$${}^{n-1}T_n = \text{Trans}_{z_{n-1}}(d_n) * \text{Rot}_{z_{n-1}}(\theta_n) * \text{Trans}_{x_n}(r_n) * \text{Rot}_{x_n}(\alpha_n) \quad (6)$$

$$\text{Trans}_{z_{n-1}}(d_n) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_n \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$\text{Rot}_{z_{n-1}}(\theta_n) = \begin{bmatrix} \cos \theta_n & -\sin \theta_n & 0 & 0 \\ \sin \theta_n & \cos \theta_n & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$\text{Trans}_{x_n}(r_n) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & r_n \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$\text{Rot}_{x_n}(\alpha_n) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha_n & -\sin \alpha_n & 0 \\ 0 & \sin \alpha_n & \cos \alpha_n & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (10)$$

$${}^{n-1}T_n = \begin{bmatrix} \cos \theta_n & -\sin \theta_n \cos \alpha_n & \sin \theta_n \sin \alpha_n & r_n \cos \theta_n \\ \sin \theta_n & \cos \theta_n \cos \alpha_n & -\cos \theta_n \sin \alpha_n & r_n \sin \theta_n \\ 0 & \sin \alpha_n & \cos \alpha_n & d_n \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R & T \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (11)$$

En la matriz resultante (11) se obtiene la submatriz R (3x3) que representa la rotación, y la submatriz T (3x1) describe la traslación; los parámetros θ_n y α_n según la metodología D-H mencionada anteriormente.

2.7 Cuaterniones

Los cuaterniones se aplican en diversas áreas, tanto para la teoría de números, como también en física se representan rotaciones en el espacio donde se planteará en el presente trabajo, y por otra parte se despliegan en aplicaciones de electromagnetismo y la mecánica cuántica (KUIPERS, 1999).

$$R = \begin{bmatrix} 1-2s(q_j^2+q_k^2) & 2s(q_i q_j - q_k q_r) & 2s(q_i q_k + q_j q_r) \\ 2s(q_i q_j + q_k q_r) & 1-2s(q_i^2+q_k^2) & 2s(q_j q_k - q_i q_r) \\ 2s(q_i q_k - q_j q_r) & 2s(q_j q_k + q_i q_r) & 1-2s(q_i^2+q_j^2) \end{bmatrix} \quad (13)$$

$$q = \cos \theta + \sin \theta \hat{u} \quad (14)$$

$$q = \cos \theta + \sin \theta (u_x i + u_y j + u_z k) \quad (15)$$

La matriz de rotación R (13) se maneja para representar la rotación de un cuaternión, donde $s = \|q\|^{-2}$, pero si es un cuaternión unitario $s=1$. Dicho procedimiento se realiza sabiéndose el ángulo y el eje de giro para la orientación deseada con la ecuación (15). Estas matrices se calculan con eficiencia por la herramienta de Matlab (JIA, 2015) (OLLERO, 2001).

3 Metodología

3.1 Método, tipo y diseño de la investigación

Se caracterizaron los temblores de las manos con el fin de analizar sus características, más propiamente de frecuencia. Seguidamente se realizaron pruebas experimentales con personas afectadas con temblores en las manos por ello el artículo se enfoca de manera cuantitativa ya que se toman las medidas inerciales por un dispositivo Razor IMU donde se captura las señales para su posterior análisis en la computadora, donde se halló su frecuencia característica de cada temblor según su nivel de estrés que contemplaba. Finalizando esta etapa con un simulador que se realizó en Matlab para replicar las señales de los temblores.

Posteriormente, se implementó el diseño físico del sistema de balanceo el cual se adaptó a la estructura de los actuadores y su parte electrónica. Por otra parte, se hace la transmisión de datos por medio del protocolo I2C de un dispositivo a otro para el accionamiento de los motores. De modo que se proyecta el controlador según a los datos obtenidos anteriormente, de forma adaptativa, de rápida acción y con un mínimo error; siendo así un PID con un algoritmo que cambia de sintonización al sentir las características de las señales externas generadas por la mano.

3.2 Análisis e interpretación de la información

Los resultados se organizan por tres secciones de diseño, la parte mecánica se realizó con el programa de SolidWorks 2016 para su incorporación física y un análisis de esfuerzo de las piezas basado en la escala de Von Mises; en la parte electrónica se manejó el programa Fritzing para la realización del esquema de conexiones electrónicas ya que contaba con la placa del dispositivo Razor IMU, y la última parte es la programación del algoritmo de control por medio de la IDE Arduino y su complemento con el simulador de temblores por Matlab, trabajando con un error en régimen estacionario máximo de 10%.

4 Diseño e implementación

4.1 Diseño mecánico

En este paso se diseña la suspensión de cardán que contempla el servomotor, por lo que consta de torque y velocidad. Por tanto, en el diseño se propone de tres ejes rotacionales donde son perpendiculares entre sí; con partes de apoyo para el servomotor y su material a emplear un plástico PLA al ser de fácil fabricación en la impresora 3D de los laboratorios de la UCB. Además, se toma los datos técnicos del actuador para su dimensionamiento teniendo en cuenta el giro libre de 180° . En la Figura 4: se muestra el ensamblaje de los servomotores.

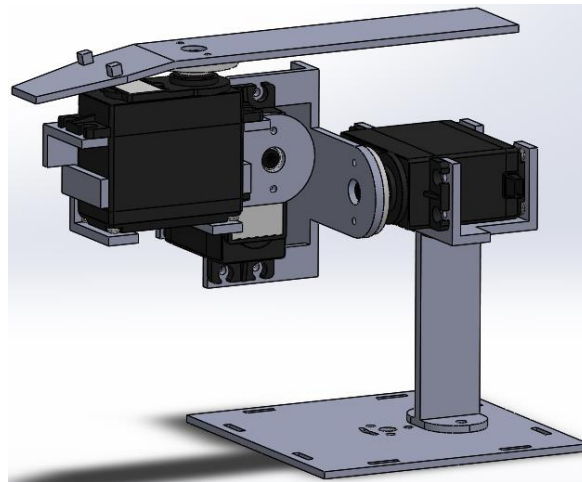


Figura 4: Ensamblaje de los servomotores. Fuente: Elaboración propia mediante SolidWorks, 2018.

Se diseña una base troncal para el soporte de los tres ejes, siendo un perfil I, esta pieza se conecta con una base cuadrada que generará temblores aleatorios.

Una vez que se tiene el diseño mecánico se realiza un análisis de esfuerzos mediante SolidWorks. Por consiguiente, se realiza en los tres ejes como se muestra en la Figura 5; gráfico a) eje X, b) eje Y, c) eje Z, en el cual se aplica peso en las áreas en las que se expondrá los esfuerzos significativos.

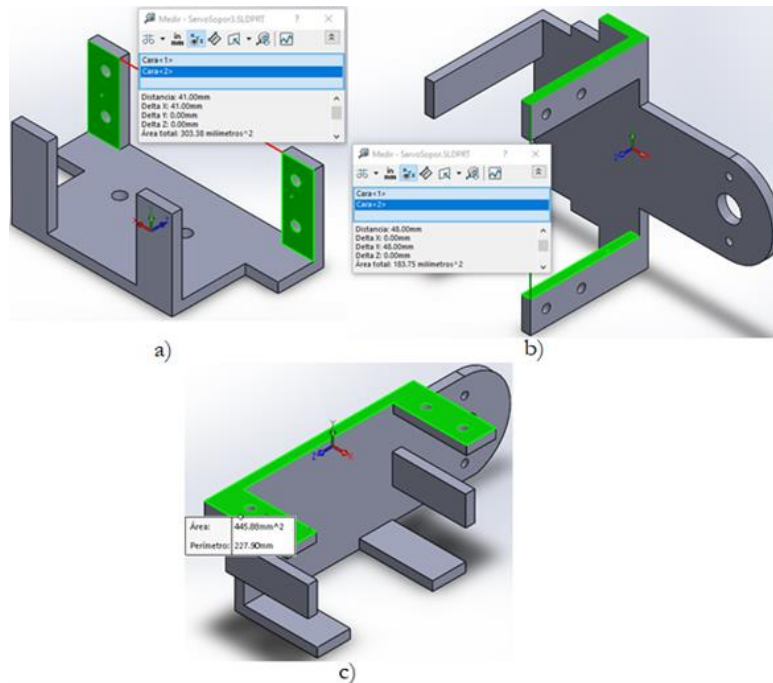


Figura 5: Área del eje X afectada por el esfuerzo. Fuente: Elaboración propia mediante SolidWorks, 2018.

Para el análisis en SolidWorks se realiza los cálculos de acuerdo al esfuerzo que sufrirá cada parte por lo que en la Figura 5: inciso a) eje X, se aplica un peso de tres servomotores más el material que soportará tal pieza, su resultado se muestra en la ecuación (16). Para el inciso b) eje Y se aplica un peso de forma similar pero solo con dos servomotores, ecuación (17). Por último, el inciso c) eje Z utiliza solo un servomotor de modo que la ecuación (18) lo describe.

$$P = \frac{m \cdot g}{A} = \frac{0,180 \text{ Kg} \cdot 9,77 \text{ m s}^{-2}}{0,00030338 \text{ m}^2} \quad (16)$$

$$P = 5.796,69 \text{ N m}^{-2}$$

$$P = \frac{m \cdot g}{A} = \frac{0,120 \text{ Kg} \cdot 9,77 \text{ m s}^{-2}}{0,00018375 \text{ m}^2} \quad (17)$$

$$P = 6.380,41 \text{ N m}^{-2}$$

$$P = \frac{m \cdot g}{A} = \frac{0,06 \text{ Kg} \cdot 9,77 \text{ m s}^{-2}}{0,00044588 \text{ m}^2} \quad (18)$$

$$P = 1.314,7 \text{ N m}^{-2}$$

Una vez que se procedieron a los cálculos se pasa al análisis de esfuerzo en SolidWorks donde se incluyen los resultados obtenidos de las ecuaciones anteriormente realizadas, donde se aplica una fuerza distribuida en las áreas afectadas, sin embargo, en la plataforma SolidWorks se emplea el material de plástico ABS al no contar exactamente con el material de fabricación PLA, pero se inspeccionó que tiene características mecánicas similares al PLA, por lo tanto, en la Figura 6: se muestra el análisis de cada eje respectivamente.

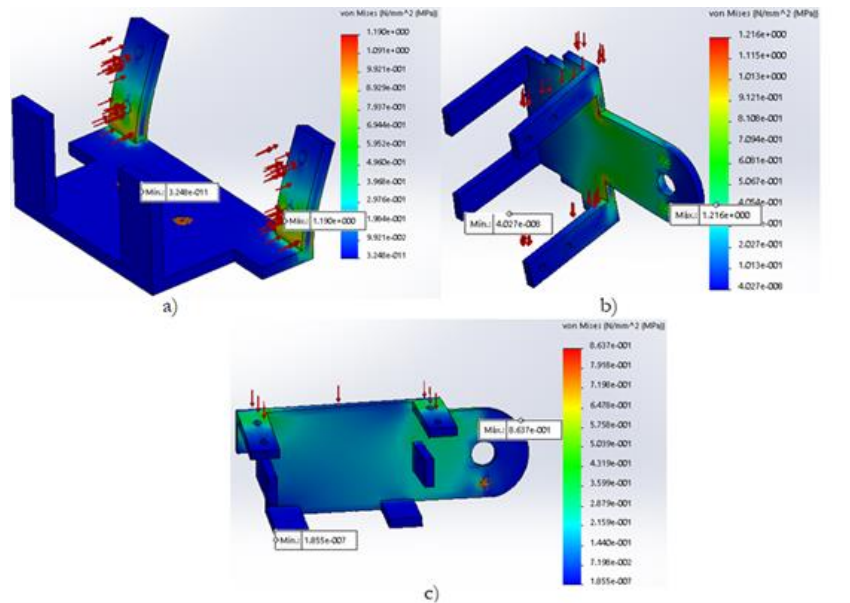


Figura 6: Análisis de esfuerzo en el eje X. Fuente: Elaboración propia mediante SolidWorks, 2018

El análisis de la Figura 6: el inciso a) eje X se demuestra por medio de una escala de colores la máxima energía de distorsión variando desde la parte azul (mínima) hasta la parte roja (máxima), donde se observa una máxima de 1.190 Mpa, es decir, que el área afectada pudiese tender a fallar si se le aplica una carga mayor a la propuesta en un área mínima de la pieza. Del inciso b) eje Y se tiene una tensión máxima de 1.216 Mpa, se puede señalar que el área donde se aplicó la presión no está expuesto a una falla mecánica de ruptura, sino en la sujeción de los tornillos al actuador. En el análisis del inciso c) eje Z se tiene un esfuerzo máximo de 0.8636 Mpa, de la misma manera en el área de interés no se encuentra el fallo sino en la sujeción de los tornillos al servomotor. El análisis del sistema mecánico se encuentra factible al utilizar el plástico PLA como material dúctil, por lo que las piezas no tenderán a estropearse con la carga aplicada para el presente trabajo.

Este sistema se considera como un mecanismo de robot de tres grados de libertad, los cuales son rotacionales y se denomina RRR (o 3R), por lo tanto, los servomotores se ubican de tal manera que tengan un rango de operación espacial sin restricciones, queriendo decir que se toma como sistema de coordenadas de referencia su parámetro inicial está a 90° horizontalmente paralelo al suelo, para que pueda girar sea en sentido horario o anti horario otros 90° .

Se tiene una rotación de $\theta=45^\circ$ y su eje de giro es $\hat{u}=i$, según la ecuación (14) se procede a la ecuación (19):

$$q_{x,\theta} = \cos\left(\frac{90}{2}\right) + \sin\left(\frac{90}{2}\right)i \quad (19)$$

$$q_{x,\theta} = 0,7071 + 0,7071i \quad (20)$$

Los parámetros del cuaternión $q_{x,\theta}$ se descompone en sus partes imaginarias i , j , k para posteriormente se reemplace en la matriz R .

$$q_r = 0,7071. \quad q_i = 0,7071. \quad q_j = 0. \quad q_k = 0.$$

En rotaciones el cuaternión $q_{x,\theta}$ se considera unitario con norma uno por lo que $s=1$. Los elementos de la matriz (21) se reemplazan por variables a, b, \dots, i para sistematizar la matriz de transformación homogénea, de modo que se tiene lo siguiente

$$R = \begin{bmatrix} 1-2s(q_j^2+q_k^2) & 2s(q_i q_j - q_k q_r) & 2s(q_i q_k + q_j q_r) \\ 2s(q_i q_j + q_k q_r) & 1-2s(q_i^2+q_k^2) & 2s(q_j q_k - q_i q_r) \\ 2s(q_i q_k - q_j q_r) & 2s(q_j q_k + q_i q_r) & 1-2s(q_i^2+q_j^2) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a & b & c \\ d & e & f \\ g & h & i \end{bmatrix} \quad (21)$$

En Matlab se crea una función de la matriz R (21) para que se reemplace directamente los parámetros del cuaternión de la ecuación (20) y obtener la matriz de rotación de $q_{x,\theta}$.

$$R = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0,7071 & -0,7071 \\ 0 & 0,7071 & 0,7071 \end{bmatrix} \quad (22)$$

Seguidamente, se parametriza la orientación del elemento terminal de cubierto según la metodología de Denavit Hartenberg (D-H) mencionada anteriormente en el documento, se debe tomar en cuenta las longitudes y sentido de giro de los ejes cumpliendo el sistema dextrógiro, en la Figura 7: se muestran las medidas de eje a eje.

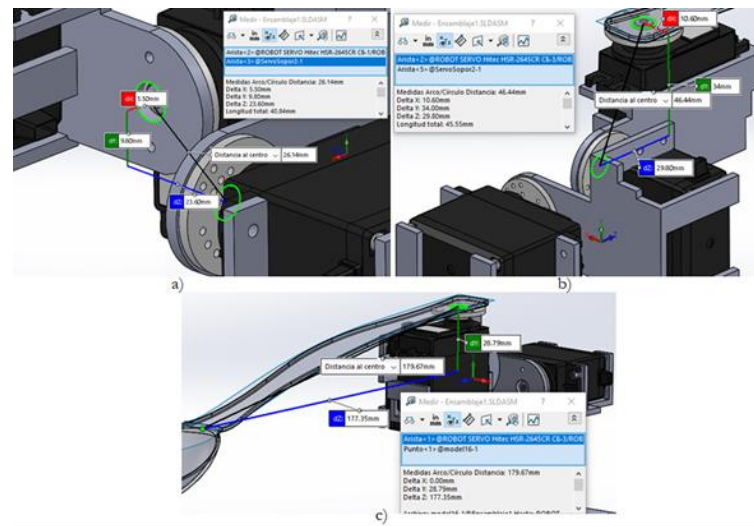


Figura 7: Longitudes de las articulaciones. Fuente: Elaboración propia mediante SolidWorks, 2018.

En la Figura 7: se presentan las longitudes de cada articulación, donde el inciso a) mide la distancia del eje X al eje Y. El inciso b) son las medidas de la articulación del eje Y al eje Z y finalmente el inciso c) las longitudes del eje Z al efector final.

En la Tabla 3 se presenta las constantes de cada articulación con tres variables de rotación θ_1 , θ_2 , θ_3 . La ultima articulación se descompone en un sistema de referencia auxiliar para la orientación del efector final en 3.1 y 3.2. De acuerdo con la ecuación (6) mencionada anteriormente solo se tiene las matrices de rotación de $Rot_{z_{n-1}}(\theta_n)$ y $Rot_{x_n}(\alpha_n)$ ya que los movimientos de traslación no se encuentran en el robot y por lo tanto las matrices de dicha ecuación (6) generan una matriz identidad de traslación, por lo tanto la matriz de transformación homogénea se convierte de la siguiente forma en la ecuación (23).

Tabla 3. Parámetros de D-H del robot 3R

Nº articulaciones	θ [grados]	d [mm]	α [grados]	r [mm]
1	$\theta_1 + \frac{\pi}{2}$	23,6	$+\frac{\pi}{2}$	9,8
2	$\theta_2 + \frac{\pi}{2}$	5,1	$+\frac{\pi}{2}$	29,8
3.1	$\theta_3 + \frac{\pi}{2}$	-28,79	$+\frac{\pi}{2}$	0
3.2	0	177,35	0	0

Fuente: Elaboración propia

$${}^{n-1}T_n = \text{Rot}_{z_{n-1}}(\theta_n) * \text{Rot}_{x_n}(\alpha_n) \quad (23)$$

A partir de la tabla de D-H se reemplaza los θ_n en la ecuación (8) y se obtiene la siguiente matriz $\text{Rot}_z(\theta_1)$.

$$\text{Rot}_z(\theta_1) = \begin{bmatrix} -\sin \theta_1 & -\cos \theta_1 & 0 & 0 \\ \cos \theta_1 & -\sin \theta_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (24)$$

Dado que el parámetro $\theta = \theta_n + \frac{\pi}{2}$ son iguales en las demás articulaciones, las matrices serán semejantes.

$$\text{Rot}_z(\theta_1) = \text{Rot}_z(\theta_2) = \text{Rot}_z(\theta_3) \quad (25)$$

Ahora se obtiene la matriz de rotación de x respecto al ángulo α_1 .

$$\text{Rot}_x(\alpha_1) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha_1 & -\sin \alpha_1 \\ 0 & \sin \alpha_1 & \cos \alpha_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (26)$$

Dado que el parámetro $\alpha_n = +\frac{\pi}{2}$ en las demás articulaciones son iguales, las matrices son.

$$\text{Rot}_x(\alpha_1) = \text{Rot}_x(\alpha_2) = \text{Rot}_x(\alpha_3) \quad (27)$$

Como resultado se debe multiplicar las matrices de rotación $\text{Rot}_{z_{n-1}}(\theta_n)$ y $\text{Rot}_{x_n}(\alpha_n)$ para que se obtenga la matriz de transformación T .

$$\text{Rot}_1 = \text{Rot}_z(\theta_1) * \text{Rot}_x(\alpha_1) \quad (28)$$

$$\text{Rot}_2 = \text{Rot}_z(\theta_2) * \text{Rot}_x(\alpha_2) \quad (29)$$

$$\text{Rot}_3 = \text{Rot}_z(\theta_3) * \text{Rot}_x(\alpha_3) \quad (30)$$

$$T = \text{Rot}_1 * \text{Rot}_2 * \text{Rot}_3 \quad (31)$$

Mediante Matlab se obtiene la matriz de transformación (31) que representa el elemento terminal girado respecto a un sistema fijo de referencia, y como resultado se presenta en la siguiente ecuación (32).

$$T = \begin{bmatrix} \cos \theta_1 * \cos \theta_3 - \sin \theta_1 * \sin \theta_2 * \sin \theta_3 & -\cos \theta_2 * \sin \theta_1 & \cos \theta_1 * \sin \theta_3 + \cos \theta_3 * \sin \theta_1 * \sin \theta_2 \\ \cos \theta_3 * \sin \theta_1 + \cos \theta_1 * \sin \theta_2 * \sin \theta_3 & \cos \theta_1 * \cos \theta_2 & \sin \theta_1 * \sin \theta_3 - \cos \theta_1 * \cos \theta_3 * \sin \theta_2 \\ -\cos \theta_2 * \sin \theta_3 & \sin \theta_2 & \cos \theta_2 * \cos \theta_3 \end{bmatrix} \quad (32)$$

Las variables $\theta_1, \theta_2, \theta_3$ se halla al igualar la matriz R (22) con la matriz T (32) y se obtiene la configuración de la orientación del efector final del robot.

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0,7071 & -0,7071 \\ 0 & 0,7071 & 0,7071 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta_1 * \cos \theta_3 - \sin \theta_1 * \sin \theta_2 * \sin \theta_3 & -\cos \theta_2 * \sin \theta_1 & \cos \theta_1 * \sin \theta_3 + \cos \theta_3 * \sin \theta_1 * \sin \theta_2 \\ \cos \theta_3 * \sin \theta_1 + \cos \theta_1 * \sin \theta_2 * \sin \theta_3 & \cos \theta_1 * \cos \theta_2 & \sin \theta_1 * \sin \theta_3 - \cos \theta_1 * \cos \theta_3 * \sin \theta_2 \\ -\cos \theta_2 * \sin \theta_3 & \sin \theta_2 & \cos \theta_2 * \cos \theta_3 \end{bmatrix}$$

$$0,7071 = \sin \theta_2$$

$$\theta_2 = \sin^{-1} 0,7071 = 45^\circ \quad (33)$$

$$\begin{aligned} 0,7071 &= \cos \theta_2 * \cos \theta_3 \\ \theta_3 &= \cos^{-1} \frac{0,7071}{\cos 45} = 0^\circ \end{aligned} \quad (34)$$

$$\begin{aligned} 0,7071 &= \cos \theta_1 * \cos \theta_2 \\ \theta_1 &= \cos^{-1} \frac{0,7071}{\cos 45} = 0^\circ \end{aligned} \quad (35)$$

El resultado θ_2 es la rotación que deberá hacer el robot en la articulación Y. Ahora bien, la siguiente matriz T (37) se presenta de manera generalizada para cualquier orientación conocida de un eje giratorio, para seguidamente recurrir a la configuración del robot para su orientación de la posición del efector final mediante la matriz R y se obtenga los ángulos $\theta_1, \theta_2, \theta_3$ respecto al sistema de referencia fijo.

$$T = \begin{bmatrix} (\cos \theta_1 * \cos \theta_3 - \sin \theta_1 * \sin \theta_2 * \sin \theta_3)_a & (-\cos \theta_2 * \sin \theta_1)_b & (\cos \theta_1 * \sin \theta_3 + \cos \theta_3 * \sin \theta_1 * \sin \theta_2)_c \\ (\cos \theta_3 * \sin \theta_1 + \cos \theta_1 * \sin \theta_2 * \sin \theta_3)_d & (\cos \theta_1 * \cos \theta_2)_e & (\sin \theta_1 * \sin \theta_3 - \cos \theta_1 * \cos \theta_3 * \sin \theta_2)_f \\ (-\cos \theta_2 * \sin \theta_3)_g & \sin \theta_2_h & (\cos \theta_2 * \cos \theta_3)_i \end{bmatrix} \quad (37)$$

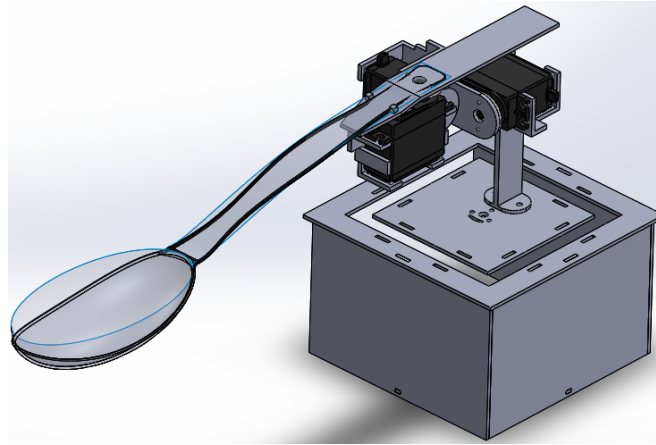


Figura 8: Ensamblaje del sistema mecánico. Fuente: Elaboración propia mediante SolidWorks, 2018.

La plataforma de la Figura 8: se utiliza para generar oscilaciones aleatorias con un motor sin escobillas que gira en la parte inferior, siendo así que se asemeje a la variabilidad de la frecuencia y amplitud de los trastornos de movimiento, por este medio se aplica la señal de entrada al sistema a controlar el cual debe estabilizar al cubierto.

Tras el diseño del sistema mecánico, se observa en los resultados de la tensión de Von Mises que el fallo elástico del material, se encuentran en áreas pequeñas y si la pieza comienza a ceder será el momento cuando el límite máximo sea igual al límite de tensión en la escala de colores de Von Mises, por lo que no hay riesgo de consideración en el análisis hecho. Mediante los cálculos de la matriz de rotación del cuaternión se logra que no ingrese a la singularidad de los ángulos y de esa manera se aplica a la matriz resultante homogénea para saber la configuración del robot y su posición del elemento terminal cuchara que viene dada por la ecuación (37).

4.2 Esquema electrónico

En esta etapa se describe el flujo de las señales para la distribución de información a los componentes utilizados, siendo que este comportamiento se realiza de manera retroalimentada por la posición en el espacio que ocupa el elemento terminal ya presentada en la etapa mecánica. El dispositivo que se puede destacar es el Razor IMU porque se presenta en el mercado internacional y un factor que se considera clave es el tamaño, ya que se lograría utilizar como módulo portátil pequeño, adecuado a la aplicación que se quiere dar en el presente artículo. En la siguiente Figura 9: se muestra la conexión entre el Arduino Nano y el Razor IMU para el control de los servomotores

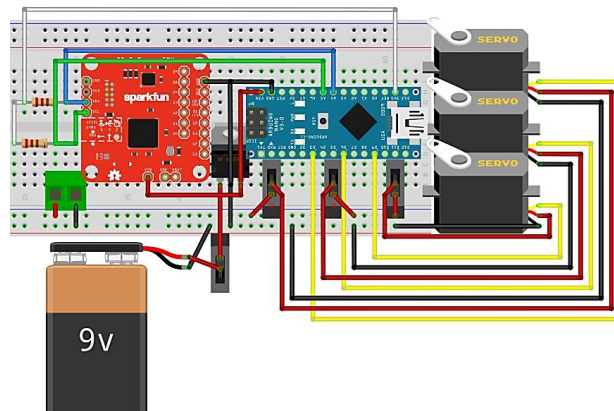


Figura 9: Esquema de conexión del sistema de balanceo. Fuente: Elaboración propia mediante Proteus, 2018.

En el circuito del sistema de balanceo de la Figura 9: la comunicación se realiza por medio del protocolo I2C, puesto que el microcontrolador Razor IMU no cuenta con salidas de señal PWM, por lo que se debe enviar los ángulos ya calculados al otro circuito integrado (IC), actuando de esta manera como el dispositivo maestro (Figura 10:). Además, se recomienda el uso de resistencias *pull-up* con un valor de $1\text{ K}\Omega$, en medio de la comunicación de SDA y SCL para aumentar la velocidad de transmisión a 400 Kbps.

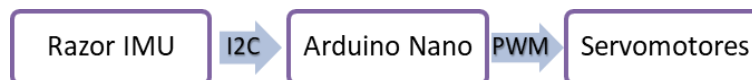


Figura 10: Diagrama de bloques de comunicación. Fuente: Elaboración propia.

Como resultado se aplica de manera física los microcontroladores en el cual se sitúan en el elemento terminal por lo que se tiene que tomar en cuenta el movimiento libre e independiente, por esa razón se los alimenta con una batería de 9 V por medio de un regulador de voltaje LM7805. Por otra parte, los servomotores MG995 de la empresa *tower pro* se operan a 6v con un torque de 11 Kg s⁻¹. De esta manera se logra que el circuito responda a la locomoción de las señales biomecánicas.

5 Evaluación y resultados

5.1 Análisis de señales y sistema de control

El sistema de control se descompone de forma sistemática en la integración de las partes, que en este caso se conforma por el sistema de balanceo como se muestra en el diagrama de bloques de la Figura 11:, donde el microcontrolador será el elemento en el que recae el control de las señales biomecánicas.

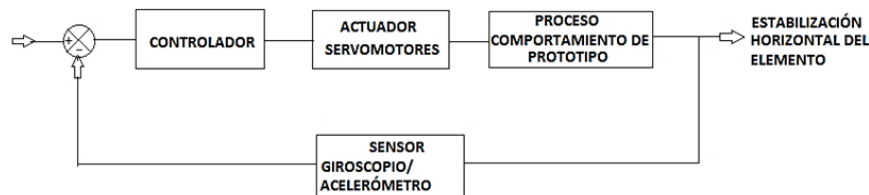


Figura 11: Diagrama de bloques del sistema de balanceo. Fuente: Elaboración propia.

5.1.1 Análisis del temblor

Las señales biomecánicas son procesos mecánicos del cuerpo, como locomoción, desplazamiento y presión, el cual en el presente trabajo se hace el estudio de los movimientos involuntarios de la mano. Por lo tanto, la medición se realiza sobre el sitio donde se origina las señales y requiere de un el microcontrolador con medidas inerciales para la obtención de los datos, sean frecuencia o amplitud del temblor, de modo que se procede en dos etapas. Siendo la primera con la adquisición de datos almacenados en el microSD que está incorporado en el dispositivo Razor IMU, para posteriormente procesarlos mediante Excel, seguido de la herramienta de Matlab para un análisis espectral de cada eje, y distinguir la frecuencia de la velocidad angular que se obtiene de los movimientos de la mano.

5.1.1.1 Espectro de Frecuencia

La señal de entrada al sistema se realiza en lazo abierto para que se observe el tipo de señal a controlar. De modo que se realiza a tres diferentes señales de temblor según su nivel de intensidad que son alta, mediana y leve, de esa manera adaptar el

controlador. Por consiguiente, se efectúa los cálculos correspondientes para la velocidad angular y se grafica la señal de elevada intensidad que capto el microcontrolador en la Figura 12:.

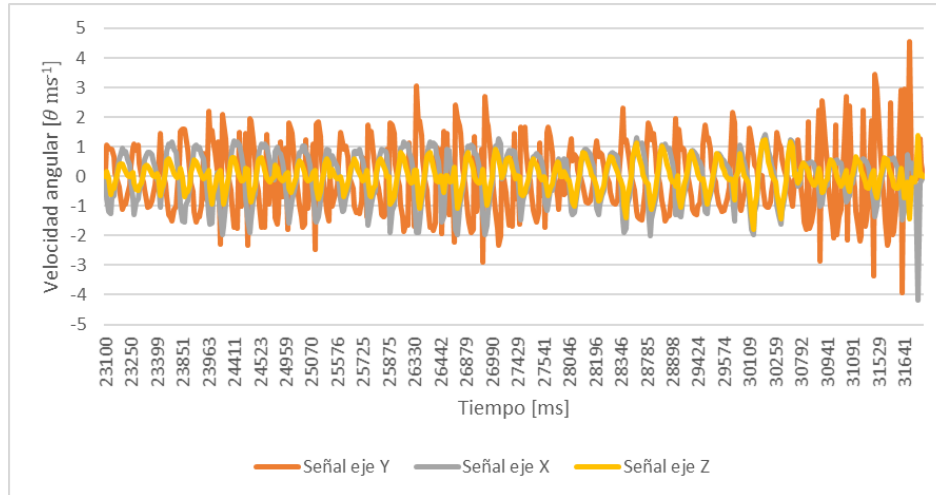


Figura 12: Señal de alta intensidad. Fuente: Elaboración propia mediante Excel, 2018.

De la Figura 12: se puede destacar una máxima velocidad angular en el eje Y de $\pm 4,5$ grados ms^{-1} , mientras que los demás ejes se mantienen dentro del rango menor a ± 2 grados ms^{-1} . La señal se capturo en un tiempo aproximado de 8,5 s y una vez obtenida la señal se traslada a Matlab, donde se realiza el procesamiento por medio de la transformada rápida de Fourier para la obtención de las frecuencias.

El algoritmo que se realiza en Matlab para pasar del dominio del tiempo al dominio de la frecuencia, se calcula la frecuencia de muestreo F_s , el tamaño de la señal T y por último la salida Y que se obtiene por la función $\text{fft}()$ de Matlab. De esta manera se puede observar en las siguientes figuras la frecuencia de cada eje respectivamente. En la Figura 13: se muestra el inciso a) eje X, b) eje Y y c) eje Z.

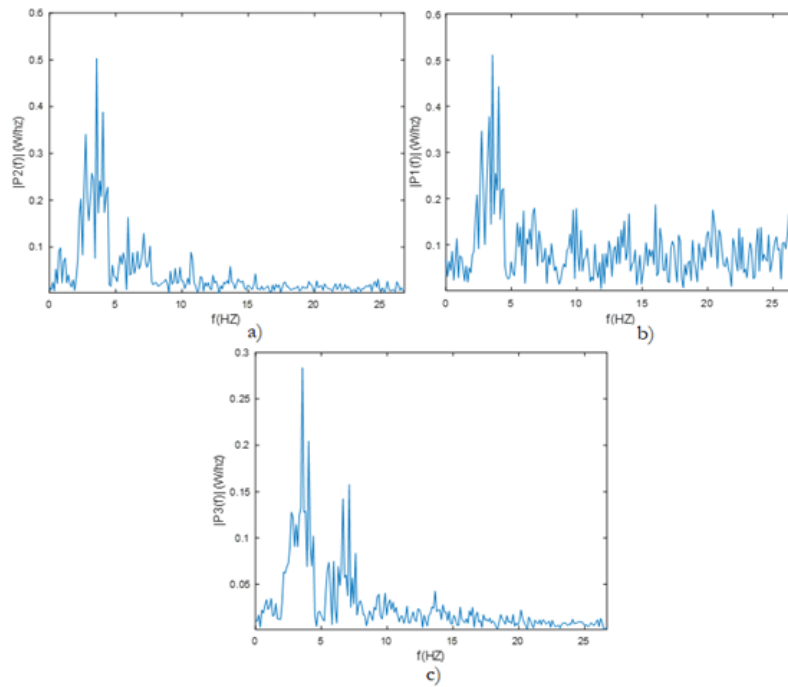


Figura 13: Espectro de frecuencia. Fuente: Elaboración propia mediante Matlab, 2018.

En la Figura 13: la frecuencia del inciso a) eje X se observa que cae alrededor de los 4 Hz con una potencia espectral $0,5 \text{ W Hz}^{-1}$, pero en dicho espectro también se encuentra un leve armónico a los 6 Hz además del ruido que contiene la señal. Ahora bien, en el inciso b) eje Y se encuentra de igual manera una frecuencia de 4 Hz, pero se hace más notable el ruido en la señal, y por último en el inciso c) eje Z se tiene una frecuencia de 4 Hz con una potencia de $0,28 \text{ W Hz}^{-1}$, pero se presenta un notable armónico alrededor de los 6 Hz, el cual hace que el estudio de esta señal de alta intensidad se deba realizar con un filtrado mediante un algoritmo en el IDE de Arduino.

Se elabora otra práctica como se mencionó anteriormente con los mismos métodos de procesamiento de señales para analizar el temblor. En la Figura 14: se observa el temblor con una señal de intensidad media a frecuencia variable, cuando el paciente tiene un nivel de estrés moderado.

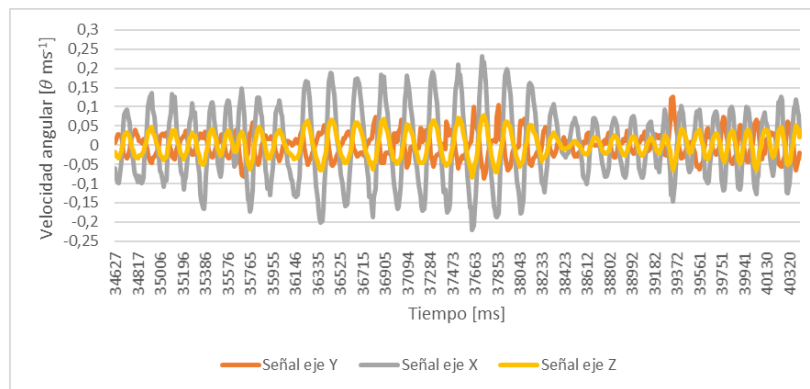


Figura 14: Señal de moderada intensidad. Fuente: Elaboración propia mediante Excel, 2018.

En la Figura 14: se observa el eje X con una velocidad angular más elevada que los otros dos ejes, donde su pico más alto es $\pm 0,23$ grados ms^{-1} , en un tiempo de captura de 5,7 s. En la Figura 15: se realiza el espectro de frecuencia.

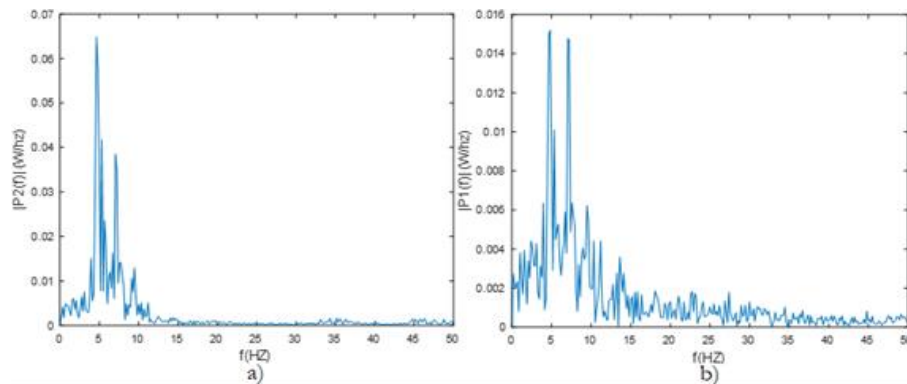


Figura 15: Espectro de frecuencia. Fuente: Elaboración propia mediante Matlab, 2018.

En el análisis de la Figura 15: se enfocó a dos ejes, inciso a) eje X con frecuencia de 5 Hz y potencia espectral de $0,066 \text{ W Hz}^{-1}$, sin embargo, se muestra también un leve ruido junto a un armónico en los 7Hz. Ahora para el caso del inciso b) eje Y posee una misma frecuencia de 5 Hz con $0,0148 \text{ W Hz}^{-1}$, pero con un ruido y armónico notables.

Por otra parte, se realiza un estudio con un nivel de estrés bajo el cual se muestra en la Figura 16:, donde posteriormente se hace el análisis como los casos anteriores.

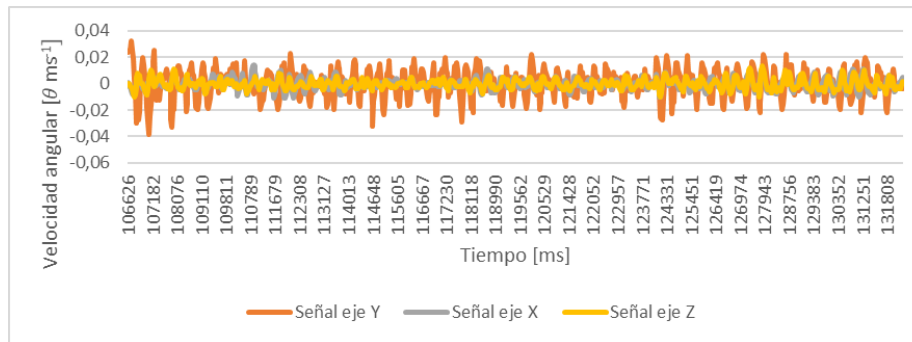


Figura 16: Señal de baja intensidad. Fuente: Elaboración propia mediante Excel, 2018.

De la Figura 16: se puede destacar que la variabilidad del eje Y es más prominente con una velocidad angular máxima de $\pm 0,03$ grados ms^{-1} , la medición se realiza en un rango de tiempo de 25 s para la captura de la señal, se toma esa duración por ser de baja amplitud. En la Figura 17: se muestra su espectro.

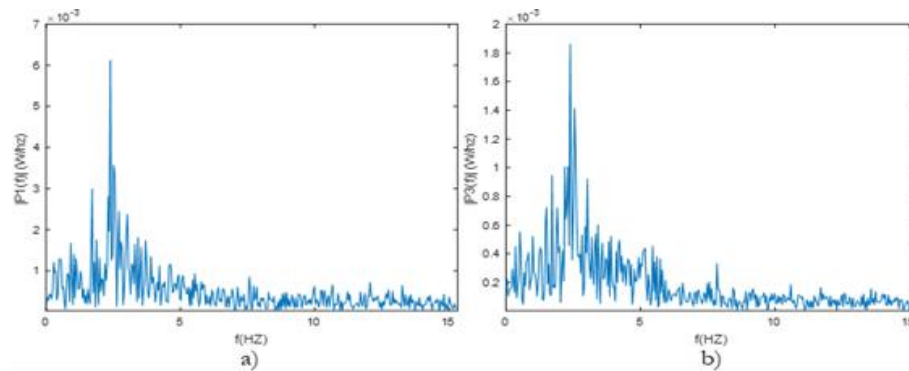


Figura 17: Espectro de frecuencia. Fuente: Elaboración propia mediante Matlab, 2018.

La frecuencia resultante de la Figura 17:, el inciso a) eje Y y del inciso b) eje Z es de alrededor de 2,5 Hz con una potencia espectral baja de 0,006 y 0,0018 W Hz^{-1} respectivamente, además de mostrar ruido en las señales, siendo así que se debería realizar un filtrado para resaltar la frecuencia que caracteriza al temblor y lograr posteriormente que se aplique el controlador.

5.1.2 Simulador en Matlab

En Matlab se añade un simulador para que represente la señal que se adquirió para modelar el comportamiento en el prototipo. Para lograr este procedimiento se

extrae los resultados de Excel. En la Figura 18: se observa el simulador del sistema de balanceo en tres eslabones de cada eje respectivamente, se diseña de tal forma como la Figura 4; donde la barra más larga de la Figura 18: es el eje Z donde estará el cubierto.

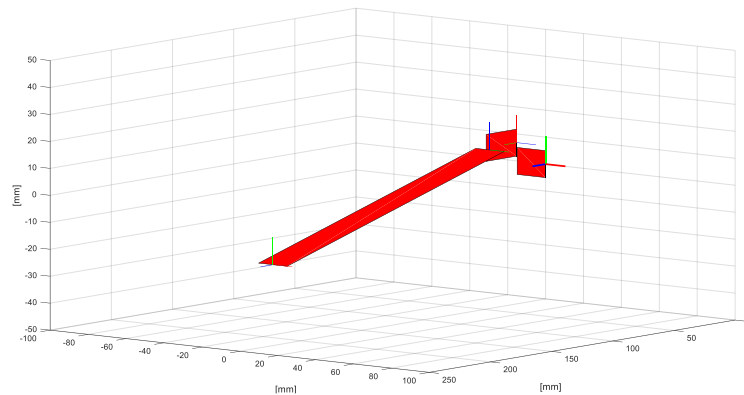


Figura 18: Simulador del temblor en el prototipo. Fuente: Elaboración propia mediante Matlab, 2018.

Las ecuaciones que se utiliza en dicho programa son la matriz de rotación del cuaternión Ec. (21) que es y la matriz de transformación homogénea Ec. (32); de esa manera se logra el procedimiento de la cinemática inversa del robot y obtener la configuración de los movimientos del mismo. Cabe resaltar que se implementa este programa inicial y solo sirve para la visualización del sistema de balanceo.

5.1.3 Sistema de control

Tras analizar las señales del temblor se realiza en lazo cerrado el controlador por sintonía de Ziegler Nichols, dicho procedimiento se hace por medio de una programación en el microcontrolador, donde se proyecta un algoritmo en el entorno de desarrollo integrado (IDE) de Arduino, ya que los dispositivos utilizados presentan librerías para el uso de su *firmware* respectivamente. Dicho programa se ejecuta cada vez que entran nuevos datos de medidas inerciales, cabe señalar que al inicio del programa se declaran las variables tomando un tiempo de retardo para no almacenar datos erróneos de la IMU.

Al momento que se estudió las señales del temblor se realizó la sintonía por tablas de Ziegler Nichols donde se halló inestabilidad en señales con alta y moderada intensidad, pero dando resultado en señales con baja intensidad, como se muestra en la siguiente Figura 19:.

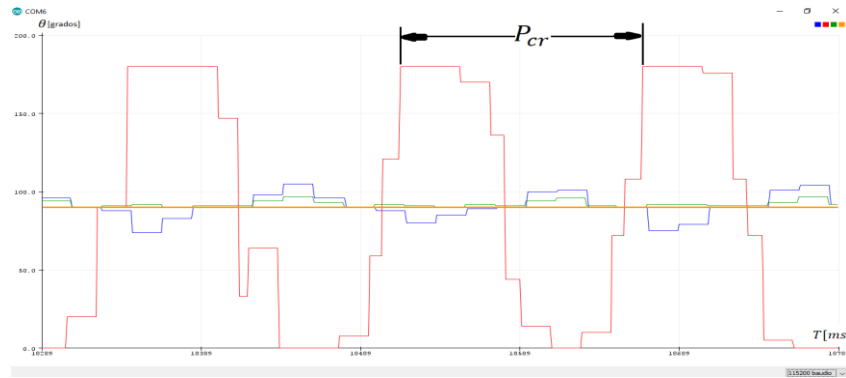


Figura 19: Señal oscilante del sistema en lazo cerrado. Fuente: Elaboración propia mediante IDE de Arduino, 2018.

En la Figura 19: se observa la oscilación sostenida del prototipo para posteriormente realizar los cálculos, en la cual se encuentra su oscilación con periodo crítico y la variable $K_{cr}=2$ que se realizó por las pruebas experimentales, por lo tanto se procede hallar sus parámetros de acuerdo a la Tabla 2 ya antes mencionada.

A continuación, se describen las ecuaciones para el desarrollo de la función de transferencia del sistema.

Parámetro obtenido experimentalmente P_{cr} , K_{cr} :

$$K_{cr}=2. P_{cr}=485 \text{ ms.}$$

Por lo tanto, su función de transferencia según la ecuación (4) que se mencionó anteriormente en el documento será:

$$G_c(s)=0,075(2)(0,485) \frac{\left(s+\frac{4}{0,485}\right)^2}{s} \quad (38)$$

$$G_c(s)=0,07275 \frac{(s+8,247)^2}{s} \quad (39)$$

Para el controlador PID experimental, donde se sabe que $K_{cr}=2$ y $P_{cr}=485 \text{ ms}$, se reemplaza sus parámetros de acuerdo a la Tabla 9:

$$K_p=0,6K_{cr}=1,2 \quad (40)$$

$$T_i=0,5P_{cr}=0,2425 \text{ s} \quad (41)$$

$$T_d=0,125P_{cr}=0,06063 \text{ s} \quad (42)$$

Los parámetros de Ziegler Nichols se implementan en el algoritmo que se realizó en la plataforma de Arduino y se ejecutan de nuevo las pruebas experimentales. En

la Figura 20: se observa la estabilidad de los tres ejes (x, y, z) a un *setpoint* de 90° , con un leve margen de error 10%.

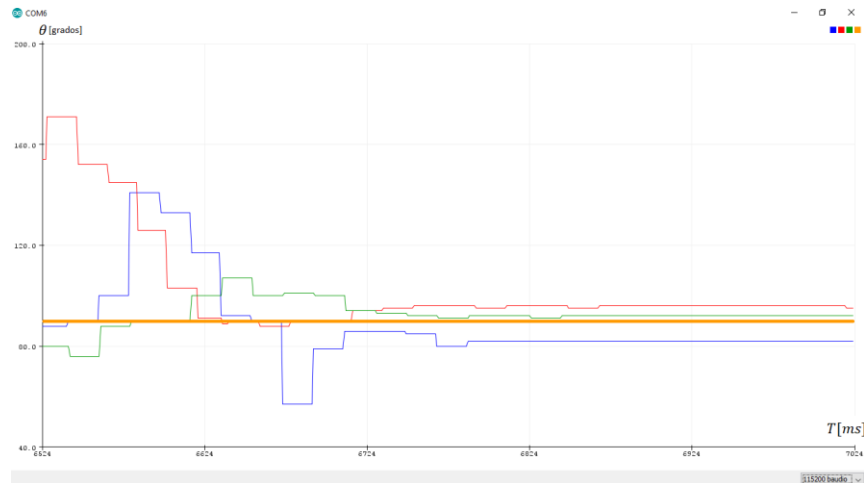


Figura 20: Sistema con el controlador PID adaptativo tuning. Fuente: Elaboración propia mediante IDE de Arduino, 2018.

Mediante la IDE de Arduino se logra sintonizar de manera rápida ya que cuenta con las librerías del PID, tomando uno de los métodos que se menciona en su página web de Arduino, el cual es el PID adaptativo *tuning*, de tal manera que resulta útil para esta aplicación para controlar el elemento terminal.

El resultado de la tercera instancia se realiza por dos partes, uno es el análisis de las frecuencias de las señales, que se destacó su frecuencia de cada temblor, y la otra parte, gracias a la programación del algoritmo en Arduino se establece una manera de fácil entendimiento y conjetura para que se logre optimizar el código en cualquier instante de tiempo. En la siguiente Figura 21: se muestra el prototipo completo.

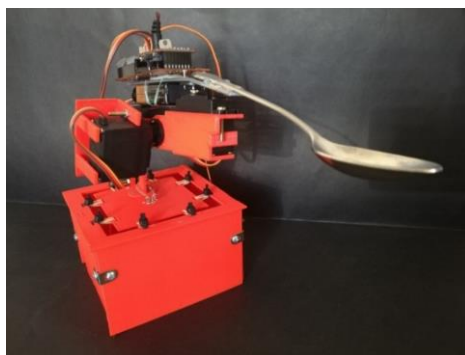


Figura 21: Prototipo del sistema de balanceo. Fuente: Elaboración propia.

Finalmente se dio un control sobre señales con baja frecuencia ya que estos no presentan significativa variabilidad y por lo tanto el prototipo mantiene estable el elemento de cubierto. El costo del prototipo fue de aproximadamente \$us 299, siendo este precio competitivo frente a Gyenno spoon con aproximadamente \$us 185 y Liftware con \$us 195.

6 Conclusiones

El sistema de balanceo se destacó por varias etapas de diseño y desarrollo mecatrónico, siendo estas evaluadas de manera mecánica, electrónica y de control del prototipo. En este caso, el prototipo es el sistema que combina tres ejes no coaxiales como un mecanismo de cardán, y en consecuencia el cubierto aplicado a la parte final del sistema de balanceo se mantiene estable con frecuencias bajas y presenta inestabilidad en frecuencias arriba de los 5 Hz.

Para analizar los temblores de las personas se discurrió por la literatura que describen los tratamientos y análisis de los trastornos de movimiento y se dedujo que difieren sus características de estudio dependiendo el tipo de temblor que se presenta en el sujeto afectado. Por ese motivo se presentan dificultades en su medición a estas señales realizadas por la locomoción del cuerpo humano, lo cual hace que la proyección del controlador deba ser más robusta.

En el diseño de la parte mecánica se determinó el mecanismo que combina tres ejes rotacionales entre si perpendicularmente para la orientación del cubierto en un espacio tridimensional, y gracias a los cuaterniones no se entra al bloqueo de cardán o cancelamiento de ángulos. Por medio de una plataforma se obtuvo simulaciones de los temblores estocásticos, y en consecuencia el conjunto de elementos físicos resultó adecuado para los temblores a tratar. Como segunda etapa, la electrónica del sistema se logró realizar de manera sistemática al dividir en un área de cálculo y procesamiento de las señales externas y la otra área enfocada a la actuación de los servomotores. De este modo se integró las tareas de las dos primeras instancias resultando ser un sistema lógico de actuación. Una vez realizada la parte física del prototipo se pasa al sistema de control.

Los temblores, al ser señales inestables y altamente oscilatorias, se vio necesario proyectar un sistema de control para estabilizar el prototipo, el cual resultó ser solo favorable para señales con baja intensidad ya que las otras señales tienen significativa variabilidad. En esta etapa del trabajo primeramente se procesó las señales en lazo abierto, y una vez que se tuvo las características de las señales, se aplica el segundo método de Ziegler Nichols en lazo cerrado, para eso se desarrolló una programación secuencial donde se aplica el algoritmo del controlador PID adaptativo *tuning*, de esta manera se obtiene la estabilidad del cubierto con un leve margen de error inferior al 10%.

El prototipo que se realizó no se aplica para el diario vivir por el momento, ya que posee un tamaño considerable, por lo que sirve para poder proyectar controladores que sirvan para todos los casos en el que la persona presenta un temblor directo en las manos con amplitudes no mayores a ± 5 grados, en futuras aplicaciones primordialmente se hará una reducción de tamaño al prototipo para que sea cómodo para el usuario en su alimentación autónoma.

7 Discusión y trabajo futuro

Cabe notar que al tratar con señales variantes en el tiempo se recomienda que se implemente el filtro adaptivo WFLC según Riviere, Rader & Thakor (1998), y realizar un control adaptivo libre de modelo (MFAC) planteado por Calla (2016), junto con el simulador de Matlab que se planteó, para así proyectar de forma inmediata el controlador y filtro, como consecuencia el elemento cubierto se mantendrá estable con la adecuada sintonización a cualquier temblor que afecta a la persona.

Referencias Bibliográficas

- [1] ÁLVAREZ, P. (2012). Medición del temblor fisiológico por medio de acelerometría. Trabajo de grado en licenciatura Mecatrónica. Universidad Militar Nueva Granada, Bogota D.C.
- [2] BARRIENTOS, A., PEÑÍN, L. F., BALAGUER, C., & ARACIL, R. (2007). Fundamentos de robótica (2ª). México: McGraw Hill.
- [3] BELDA, J. M. (2009). Principios biomecánicos para la supresión del temblor por medios ortésicos. Tesis Doctoral, Universidad Politécnica de Valencia. Valencia.
- [4] CALLA, E. (2016). Avaliação do desempenho e sintonia de controladores livre de modelo: projetos e simulações. Tesis de Maestría. Florianópolis.
- [5] CHÁVEZ, L. E., ONTIVEROS, U. M., & CARRILLO, R. J. (2013). La enfermedad de Parkinson: neurología para psiquiatras. Salud Mental, vol. 36, N° 4, pp. 315-324.
- [6] CORONA, L., ABARCA, G., & MARES, J. (2014). Sensores y actuadores: aplicaciones con Arduino. México: Grupo Editorial Patria.
- [7] CRAIG, J. J. (2006). Robótica (3ª). México: Prentice-Hall.
- [8] FINDLEY, L., & CAPILDEO, R. (1984). Movement Disorders: Tremor. London: Macmillan.

- [9] GARCÍA, A. (2 de Diciembre de 2016). Qué es y cómo funciona un servomotor. Obtenido de PANAMAHITTEK:
<http://panamahitek.com/que-es-y-como-funciona-un-servomotor/>
- [10] GARCÍA, A. A., & QUERO, J. (2012). Trastornos del movimiento. En García-Alix, & Quero, Evaluación neurológica del recién nacido (págs. 726-767). Madrid: Díaz de Santos.
- [11] HERNÁNDEZ, M., ORTIZ, M. B., CALLES, C. A., & RODRÍGUEZ, J. C. (2015). Robótica: análisis, modelado, control e implementación. Victoria: OmniaScience.
- [12] INGLE, V. K., & PROAKIS, J. G. (2012). Digital signal proccesing using Matlab (3ª). Stamford: Cengage Learning.
- [13] JIA, Y.-B. (10 de Septiembre de 2015). Quaternions and Rotations. Notes.
- [14] KUIPERS, J. B. (1999). Quaternions and rotation sequences a primer with applications to orbits, aerospace, and virtual reality (1ª). New Jersey: Princeton University Press.
- [15] MATHWORKS. (18 de Marzo de 2018). Instrumentos Quirúrgicos y Robots. Obtenido de MathWorks Web Site:
<https://es.mathworks.com/solutions/medical-devices/surgical-robotic-instruments.html>
- [16] OGATA, K. (1998). Ingeniería de control moderno (3ª). México: Prentice-Hall.
- [17] OLLERO, A. (2001). Robótica: manipuladores y robots móviles. Barcelona: Marcombo.
- [18] REZA, V. A., ABDO, M., & REZA, T. A. (2013). Fuzzy Stabilization Loop of One Axis Gimbal System. International Journal of Computer Applications, vol. 77, N° 3, pp. 6-13.
- [19] RIVIERE, C. N., & THAKOR, N. V. (1996). "Modeling and Canceling Tremor in Human-Machine Inteefaces". IEEE Engineering in medicine and biology, 29-36.
- [20] RIVIERE, C., RADER, S., & THAKOR, N. (1998). "Adaptive Canceling of Physiological Tremor for Improved Precision in Microsurgery". IEEE Transactions on biomedical engineering, 839-846.
- [21] RODRÍGUEZ, F., & LÓPEZ, M. J. (1996). Control adaptativo y robusto. Sevilla: (s.e.).
- [22] RODRÍGUEZ, M., GÁMEZ, O., HERNÁNDEZ, T., ECHAVARRÍA, S., & BIZET, O. (2012). "Morbilidad por trastornos del movimiento en la

consulta de Neurología". Hospital General Dr. Juan Bruno Zayas Alfonso, Santiago de Cuba, Cuba.

- [23] SACHINDRA, R., & MOHAMMED, Z. (2017). Analysis and Control of Hand Tremor Using IOT. International Journal for Modern Trends in Science and Technology, vol. 3, N° 5, pp. 62-67.
- [24] SPARKFUN. (1 de Diciembre de 2016). 9DoF Razor IMU M0 Hookup Guide. Obtenido de Sparkfun Start Something:
<https://learn.sparkfun.com/tutorials/9dof-razor-imu-m0-hookup-guide>
- [25] TORRENTE, O. (2013). Arduino: Curso práctico de formación. España: Alfaomega.
- [26] TURKISTANI, A. (2017). Characterization of Postural Tremor in Essential Tremor Using a Seven Degree of Freedom Model. Tesis de Master of Science, Western Michigan University, Michigan, EEUU.