



UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS  
PRIMER CLAUSTRO UNIVERSITARIO DE COLOMBIA  
T U N J A



ingenio Magno

8  
No. 1



OPEN ACCESS  
descarga gratuita

<http://revistas.ustatunja.edu.co/index.php/ingeniomagno>

ISSN (versión impresa)

2145-9282

ISSN (en línea)

2422-2399

Enero-junio de 2017, vol. 8, no. 1

Universidad Santo Tomás

Tunja, Boyacá

Publicación semestral

Hecho el depósito que establece la ley

© Derechos reservados

Universidad Santo Tomás

Suscripción y canje

Unidad de Investigación

Cll. 19 No. 11-64

Universidad Santo Tomás, Tunja-Colombia

PBX: 744 0494

Línea gratuita: 018000 932340

desde cualquier lugar del país

<http://revistas.ustatunja.edu.co/index.php/ingeniomagno>

Los conceptos expresados en los artículos son de exclusiva responsabilidad de sus autores y no comprometen a la Institución o a la publicación.

División de Arquitectura e Ingenierías

INGENIO MAGNO	Tunja Colombia	Vol. 8 No. 1	pp. 1-172	Enero- junio	2017
---------------	-------------------	-----------------	-----------	-----------------	------



UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS  
PRIMER CLAUSTRO UNIVERSITARIO DE COLOMBIA  
T U N J A



## Directivos

P. Jorge Ferdinando RODRÍGUEZ RUIZ, O.P.  
Rector

P. José Antonio BALAGUERA CEPEDA, O.P.  
Vicerrector Administrativo-Financiero

P. Javier Antonio CASTELLANOS, O.P.  
Vicerrector Académico

P. Samuel Elías FORERO BUITRAGO, O.P.  
Decano de División de Ingeniería y Arquitectura

Jimena BOHÓRQUEZ HERRERA, Ph.D.  
Directora Unidad de Investigaciones

Édgar Andrés GUTIÉRREZ CÁCERES, Esp.  
Director Centro de Investigaciones en Ingeniería  
San Alberto Magno - (CIAM)

## Editor

Fredy Andrés Aponte Novoa, M.Sc.  
Centro de Investigación en Ingeniería Alberto Magno  
(CIAM)  
[ingeniomagno@ustatunja.edu.co](mailto:ingeniomagno@ustatunja.edu.co)

## Equipo Editorial

Edwin Blasnilo Rúa Ramírez, M.Sc.  
Coeditor Universidad Santo Tomás, Tunja, Colombia  
edwin.rua@usantoto.edu.co

José Ricardo Casallas Gutiérrez, M.Sc.  
Coeditor Universidad Santo Tomás, Tunja, Colombia  
jose.casallas@usantoto.edu.co

John Fredy Guzmán Vargas  
Profesional en Filosofía y Letras  
Corrector de estilo, redactor  
fredyguzmanvargas@gmail.com

Albany Milena Lozano Násner, M.Sc.  
Traducción español-portugués  
mlnasner@gmail.com

Departamento de Idiomas  
Traducción español-inglés  
Universidad Santo Tomás, Tunja, Colombia  
coordinacion.idiomas@ustatunja.edu.co

David Enrique González Camargo  
Administrador OJS  
Universidad Santo Tomás, Tunja, Colombia  
ing.investigacion@ustatunja.edu.co

## Comité Científico

Antonio Moreira Teixeira, Ph.D.  
Universidad de Aberta (Lisboa, Portugal)  
antonio.teixeira@uab.pt

Electo Eduardo Silva Lora, Ph.D.  
Univerdidad Federal de Itajubá (Itajubá M.G., Brasil)  
electo@unifei.edu.br

María Julia Mazzarino, Ph.D.  
Universidad de Buenos Aires (Buenos Aires, Argentina)  
mmazzari@crub.uncoma.edu.ar

Antonio Rico Sulayes, Ph.D.  
Universidad de las Américas Puebla (Puebla, México)  
antonio.rico@udlap.mx

Carlos Enrique Montenegro Marín, Ph.D.  
Universidad Distrital Francisco José de Caldas (Bogotá  
D.C., Colombia)  
cemontenegrom@udistrital.edu.co

César Darío Guerrero Santander, Ph.D.  
Universidad Autónoma de Bucaramanga (Bucaramanga  
- Santander, Colombia)  
cguerrer@unab.edu.co

## Comité Editorial de la Revista

Antonio José Bula Silvera, Ph.D.  
Universidad Católica del Norte (Barranquilla - Atlántico,  
Colombia)  
abula@uinorte.edu.co

Wilson Javier Pérez Holguín, Ph.D.  
Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia  
(Tunja - Boyacá, Colombia)  
wilson.perez@uptc.edu.co

José Carlos Escobar Palacios, Ph.D.  
Investigador Universidad Federal de Itajubá (Itajubá  
M.G., Brasil)  
jocesobar@unifei.edu.br

Camilo Andrés Lesmes Fabian, Ph.D.  
Universidad Santo Tomás (Tunja - Boyacá, Colombia)  
camilo.lesmes@usantoto.edu.co

## Impresión

Editorial Jotamar Ltda.  
Calle 57 No. 3-39  
Tel.: (8) 745 7120  
editorialjotamar@yahoo.com  
Tunja - Boyacá - Colombia

# Caracterización de unidades de medición inercial (IMUs) en estática y dinámica

## Characterization of inertial measurement units (IMUs) in static and dynamic ways

## Caracterização de imus em estática e dinâmica

Para citar este artículo / To reference this article / Para citar este artigo: Luengas Contreras, L., López Ávila, B. y Jiménez Espinosa, J. (2017). Caracterización de unidades de medición inercial (IMUs) en estática y dinámica. *Ingenio Magno*, 8(1), 92-102.

### **Lely Luengas-Contreras**

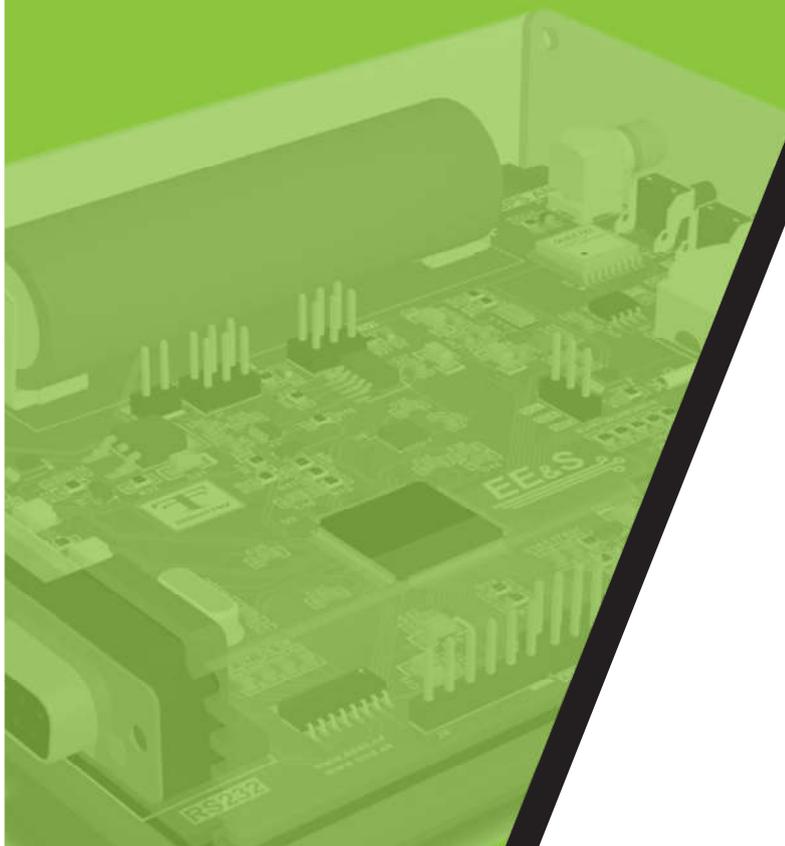
Universidad Distrital Francisco José de Caldas,  
Facultad Tecnológica,  
Electrónica, Grupo de Investigación DIGITI  
[laluengasc@udistrital.edu.co](mailto:laluengasc@udistrital.edu.co)

### **Brenda López-Ávila**

Universidad Distrital Francisco José de Caldas,  
Facultad Tecnológica, Electrónica,  
Grupo de Investigación DIGITI  
[balopeza@correo.udistrital.edu.co](mailto:balopeza@correo.udistrital.edu.co)

### **Jinneth Jiménez-Espinosa**

Universidad Distrital Francisco José de Caldas,  
Facultad Tecnológica,  
Electrónica,  
Grupo de Investigación DIGITI  
[jdjimeneze@correo.udistrital.edu.co](mailto:jdjimeneze@correo.udistrital.edu.co)



## Resumen

En la actualidad, para efectuar análisis y mediciones en el campo del movimiento humano, se hace uso de sistemas basados en unidades de medición inercial (IMUs, por sus siglas en inglés). Una IMU posee acelerómetros, giroscopios y brújulas en su interior, por lo que permite medir y reportar cambios de posición y velocidad asociados con fenómenos de peso experimentados por una masa de prueba que se encuentra en el marco de referencia del dispositivo. Con el fin de caracterizar el sistema basado en IMUs de la empresa Technaid SL, existente en la Facultad Tecnológica de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Bogotá, Colombia, se propuso generar resultados de su comportamiento de manera estática y dinámica; para ello, se obtuvieron datos a partir de la toma de muestras, siguiendo un protocolo establecido; posteriormente se realizó el estudio de los datos por medio de pruebas estadísticas adecuadas a los resultados; finalmente se realizó el cálculo de error absoluto, error relativo, repetibilidad y reproducibilidad (datos inexistentes en las características técnicas del equipo y necesarios en investigaciones de movimiento). Este artículo da cuenta del procedimiento realizado para llegar a los resultados de mediciones: se obtuvo un error absoluto de  $0,348^\circ$  en estática y  $1,53^\circ$  en dinámica, lo que permite concluir que los sensores se desempeñan con un margen de error mínimo tanto para situaciones dinámicas como estáticas y, por ende, dan fiabilidad para su uso futuro.

**Palabras clave:** acelerómetros, caracterización de sensores, dinámica, error de medición, estática, IMUS.

## Abstract

Currently, systems based on inertial measurement units (IMUs) are used in order to perform analysis and measurements in the field of human movement. An IMU has accelerometers, gyros and compasses inside, which allow it to measure and report changes in position and speed associated with weight phenomena experienced by a test mass found in the device reference frame. In order to characterize the system based on IMUs of the company Technaid SL, existing in the Technological Faculty of the Francisco José de Caldas District University, Bogotá, Colombia, it was proposed to generate results of its behavior in a static and dynamic way; for this, data was obtained from the sampling, following an established protocol; the study of the data was then performed by means of statistical tests adequate to the results; finally, the calculation of absolute error, relative error, repeatability and reproducibility (data that did not exist in the technical characteristics of the equipment and required in motion investigations) was performed. This article gives an account of the procedure carried out in order to arrive at the measurement results: An absolute error of  $0,348^\circ$  in static conditions and  $1,53^\circ$  in dynamic conditions was obtained, which allows us to conclude that the sensors perform with a minimum margin of error both for dynamic and static situations and, therefore, ensure reliability in its future use.

**Keywords:** accelerometers, characterization of sensors, dynamics, measurement error, static, IMUS.

## Resumo

Na atualidade, para fazer análises e medidas no campo do movimento humano, o uso de sistemas baseados em unidades de medição inercial (IMUs) é feito. Um IMU possui acelerômetros, giroscópios e bússolas inclusos, permitindo medir e relatar as mudanças de posição e velocidade associadas aos fenômenos de peso experimentados por uma massa de teste que se encontra no quadro de referência do dispositivo. Para caracterizar o sistema baseado em IMUs da empresa Technaid SL da Faculdade Tecnológica da Universidade do Distrito Francisco José de Caldas, Bogotá, Colômbia, foi proposto gerar resultados do comportamento de forma estática e dinâmica; para isso, os dados foram obtidos a partir da amostragem, seguindo um protocolo estabelecido; O estudo dos dados foi portanto realizado por meio de testes estatísticos adequados aos resultados; e depois, o cálculo do erro absoluto, erro relativo, repetibilidade e reprodutibilidade (dados que não existiam nas características técnicas do equipamento e exigido em pesquisas de movimento) foi feito. Este artigo fornece uma descrição do procedimento realizado para conseguir aos resultados das medições: obteve-se um erro absoluto de  $0,348^\circ$  em estática e  $1,53^\circ$  de dinâmica, o que permite concluir que os sensores executam com uma diferença de erro mínima tanto para situações dinâmicas como estáticas e, portanto, dar confiabilidade para o uso future do mesmo.

**Palavras chave:** acelerômetros, caracterização de sensores, dinâmica, erro de medição, estático, IMUS.

## I. Introducción

Teniendo como punto de apoyo y partida que el sistema Tech IMU CV.4<sup>®</sup> está basado en IMUs (Technaid S.L., España) y permite hacer estudios apropiados para determinar movimientos, la posición de un cuerpo y conocer su aceleración en todo instante de tiempo, se propuso investigar el comportamiento de estos sensores tanto en estática como en dinámica, ya que se desconoce la exactitud de los datos arrojados por el sistema. Este valor es carente en sus características técnicas, lo que limita a los usuarios al realizar estudios y no poder contar con el grado de error trabajado por el equipo de medición. El equipo es de propiedad del Laboratorio de Electrónica de la Facultad Tecnológica de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Bogotá, Colombia;

a él acceden estudiantes y docentes interesados en el tema de análisis de movimiento humano, que realizan investigaciones para dar respuesta a interrogantes planteados por diferentes sectores, tales como salud, comercio, entretenimiento, por nombrar algunos.

La caracterización del sistema se realizó siguiendo una metodología propuesta, donde inicialmente se identificaron variaciones en los ejes X, Y y Z, luego se diseñó y empleó un protocolo de medición para la toma de datos, su estudio e integración, así como representaciones gráficas y almacenamiento; paso seguido, se recogieron los datos sobre estos ejes, y finalmente se realizó el análisis estadístico de los datos mediante gráficas y tablas de resultados.

## II. Marco teórico

### A. Sistemas de captura de movimiento

La captura de movimiento puede ser útil para analizar, generar reportes y reproducir virtualmente movimientos humanos. Esto permite la recopilación de información confiable para diversas tareas; por ejemplo, programar una prótesis biomecánica para tener una mayor naturalidad en sus movimientos o animar *sliders* para controlar expresiones faciales (Carballo, Barrero y Villazón, 2016; Luengas, Gutiérrez y Camargo, 2017). Existen diversas formas de captura y análisis de movimiento; entre ellas está el seguimiento a través de imágenes de una serie de puntos de interés en el espacio y tiempo para obtener una representación tridimensional (3D) digital del movimiento (Bravo, Rengifo y Agredo, 2016; Luengas, 2013); así se permite la traducción del movimiento en un formato digital (Carballo *et al.*, 2016).

Otra forma de captura y análisis de movimientos es empleando sensores inerciales IMUs (acelerómetros, giróscopos y magnetómetros). Estos sensores permiten tomar datos de ángulos entre segmentos corporales, así como su posición y velocidad; de esta forma se pueden digitalizar movimientos reales y crear una animación de una simulación de manera fácil e intuitiva (Motion Capture, 2015).

El uso de los IMUs ha llevado a tener aplicaciones para determinar riesgos y beneficios vitales en seres vivos; tal es el caso del estudio biomecánico de la propulsión de una silla de ruedas manual en pacientes con lesión de la médula espinal (Quinones-Uriostegui *et al.*, 2014).

Otra aplicación ha sido la evaluación de la capacidad de los sensores inerciales y magnéticos para rastreo de movimiento 3D (TechMCS, Technaid SL, Madrid, España), donde se ob-

servó que la integración de datos de un giroscopio es una función de la complejidad de movimiento. El uso de IMUs ha permitido desarrollar proyectos de intervenciones neurorrobótica y neuroprótesis para la rehabilitación y la compensación funcional de la función motora en las extremidades superiores e inferiores de individuos que sufren un accidente cerebrovascular (Canela, Ama y Pons, 2013). A pesar de que en la actualidad los sistemas de captura de movimiento basados en IMUs han cobrado gran relevancia debido a su bajo costo y facilidad de uso, y uno de los equipos comerciales que los utilizan es el *Technaid*, se desconoce el índice de error que arroja.

### B. Unidad de medición inercial

Una unidad de medición inercial o IMU (del inglés Inertial Measurement Unit) es un dispositivo electrónico que mide e informa acerca de la velocidad, orientación y fuerzas gravitacionales de un aparato, usando una combinación de acelerómetros y giróscopos (SmartDreams, 2010). El término IMU es usado ampliamente para referirse a una caja que contiene tres acelerómetros y tres giróscopos. Los acelerómetros están puestos de forma tal que sus ejes de medición son ortogonales entre sí; estos miden la aceleración inercial, también conocida como *fuerzas G*. Los tres giróscopos están puestos en un patrón ortogonal similar, en función de medir la posición rotacional en referencia a un sistema de coordenadas seleccionadas en forma arbitraria (Colin, 2011).

### C. Caracterización

Con el fin de evaluar el comportamiento del sistema Tech IMU CV.4<sup>®</sup>, se efectuó un análisis a los datos obtenidos en las pruebas estadísticas; de este modo, se consiguieron valores de repetibilidad ( $r$ ), reproducibilidad ( $R$ ) (Minitab 17, 2015), error absoluto (EA) y error relativo (ER) (Arriagada y Peralta, 2008).

### III. Materiales y Métodos

Se empleó el sistema Tech MCS<sup>®</sup>, creado por la empresa española Technaid S.L, existente en la Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Bogotá, Colombia, este sistema ha sido especialmente diseñado para la captura y el análisis de los registros de movimientos del cuerpo humano, en estática y en dinámica, en tiempo real y para cualquier tipo de actividad. Es un sistema portátil, robusto y ergonómico, de manejo intuitivo gracias a su teclado de membrana; maneja 16 sensores inerciales, mediante 4 ranuras conectadas con cable CAN, que derivan en 4 ramificaciones, como se muestra en la figura 1. Las especificaciones dadas por el fabricante se listan en la tabla 1

**Tabla 1.** Especificaciones técnicas del sistema Tech MCS V.3

Frecuencia de muestreo de 10 a 500 Hz.
Comunicación por USB o Bluetooth.
Posibilidad de almacenar los datos en una MicroSD de 8 GB.
Señales acústicas y luminosas.
Disparador de entrada y salida para sincronizar con otros dispositivos.
Tamaño de 15 × 10 × 6 cm en caja de plástico resistente.
SDK para desarrollar aplicaciones en Windows y Matlab/Simulink.
Software Tech MCS Studio compatible con Windows 7/8/10.
Alimentación con 4 baterías (AA Ni-MH) o con adaptador (5VDC @ 3A).

Fuente: TECNAID (2013).



Figura 1. Sistema Tech MCS<sup>®</sup>

Fuente: TECNAID (2013).

El sistema Tech MCS se basa en los acelerómetros Tech MCS V.3; cuenta además con el Tech HUB, dispositivo concentrador que permite conectar y sincronizar hasta 16 Tech IMU CAN de forma simultánea; esto aplica para soluciones en red donde se requiere la medida en varios puntos del sistema (Motion Capture System, 2004). Los datos registrados por el Tech HUB se pueden observar mediante el *software* Tech MCS Studio establecido y dispuesto para el análisis de datos y resultados, lo que permite determinar los movimientos, las posturas, las inclinaciones y las diversas formas de análisis planteadas en los objetivos de un estudio. El *software* permite exportar los datos a un archivo plano en diferentes formatos.

Como se observa en las características dadas por el fabricante, no se dan los valores de error ni de incertidumbres que presenta el sistema, por lo que se decidió hallar la repetibilidad, la reproducibilidad, el error absoluto y el error relativo.

Para la caracterización de los sensores se identificaron los ejes en los que se obtienen los resultados gráficamente, teniendo en cuenta que el *software* permite registrar la posición de los IMUs y la medición de los ángulos en los ejes X, Y y Z. Se usaron dos sensores tanto para las pruebas de estática

como de dinámica. En estática se usó un IMU como referencia ubicado sobre una superficie sin inclinación, de manera tal que fuese posible variar el segundo IMU según el eje por medir; el registro se realizó durante un minuto.



Figura 2. Ubicación de los sensores para la prueba estática.

En dinámica, de igual manera se mantuvo un sensor como referencia, y con el otro sensor se procedió a efectuar el movimiento utilizando una rampa con pendiente conocida, tomando como punto de inicio la parte superior, y de ahí se desliza el IMU en descenso por la rampa.

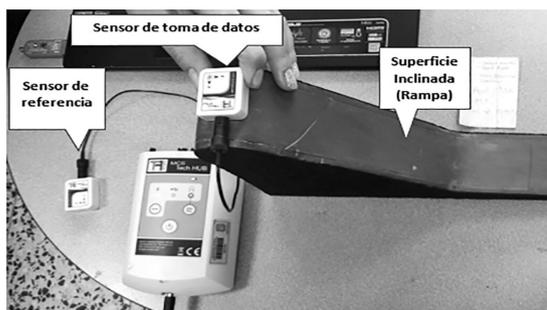


Figura 3. Ubicación de los sensores para la prueba dinámica  
Fuente: autores.

En estática se hizo variación de la posición en cada uno de los ejes X, Y y Z; se tomó el ángulo de 0° con los dos sensores reposando sobre una superficie sin inclinación; luego, la posición del sensor de medición se varió hasta un máximo de 90°, se regresó a la posición de 0° y se varió hasta un mínimo de -90°; se

repitió este procedimiento tres veces por cada eje (X1, X2, X3, Y1, Y2, Y3, Z1, Z2, Z3). Para ello, se siguió la metodología de investigación de Hernández-Sampieri *et al.* (2006), donde postula la necesidad de realizar tres pruebas para validar una prueba.

Se obtuvieron entonces 27 muestras; 9 de ellas corresponden a la medición cuando el sensor estaba estático, con un valor teórico de 0°; otras 9 corresponden a cuando el sensor estaba estático, pero midiendo un valor teórico de 90°; y 9 más corresponden a cuando se está midiendo -90°.

En dinámica se efectuó la medida en los tres ejes, X, Y y Z, a partir de lo cual se logró una variación de ángulos tanto positivos como negativos; se tomaron tres medidas por cada eje, teniendo en cuenta la inclinación que permitía la rampa; de esta manera, se obtuvieron 18 muestras.

Con los datos obtenidos se aplicó la prueba estadística de Kolmogorov-Smirnov (KS) mediante el uso del *software* de hojas de cálculo de Microsoft Excel, en las 45 muestras; se observó que los datos siguen una distribución normal, razón por la cual se utilizó la prueba ANOVA realizada en el *software* matemático MATLAB y se determinó que los datos de las mediciones no corresponden a la misma población; en consecuencia, se propuso analizar los porcentajes de error absoluto, error relativo, y los valores correspondientes a varianza, desviación estándar, repetibilidad y reproducibilidad.

## IV. Resultados

### A. Resultados para la prueba estática

Se empleó el test de normalidad KS para cada una de las mediciones de los ejes X, Y y Z

cuando se midió un ángulo teórico de 0°, 90° y -90°, con tres mediciones de cada valor teórico; se realizó el análisis de las frecuencias observadas de forma gráfica mediante histogramas.

En la figura 2 se muestra la distribución de los datos en X, Y y Z, que corresponden a una de las tres mediciones: cuando el ángulo es 0°, como se muestra en A; cuando es 90°, se muestra en B; cuando es -90°, se muestra en C. En el histograma se grafica la frecuencia observada y la frecuencia observada relativa.

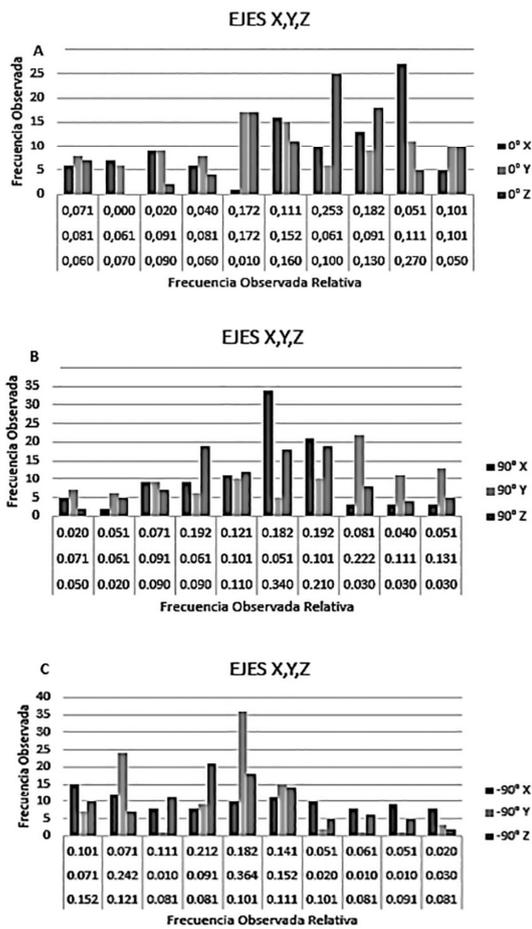


Figura 4. Distribución de los datos de una muestra para X, Y y Z midiendo los ángulos teóricos de 0°, 90° y -90°

Las tablas 2, 3 y 4 presentan los valores de tendencia central y de dispersión que corresponden al promedio de las tres muestras tomadas para cada uno de los ejes X, Y y Z, cuando el ángulo teórico es 0°, 90° y -90°, respectivamente.

Tabla 2. Valores de tendencia central y de dispersión para los ejes X, Y y Z cuando el sensor se encuentra midiendo un ángulo teórico de 0°

Eje	Media	Desviación	Mínimo	Máximo
X	0,178	0,061	0,063	0,280
Y	0,267	0,047	0,168	0,345
Z	0,148	0,049	0,173	0,152

Tabla 3. Para un ángulo de 90° se muestra los valores de tendencia central y de dispersión para los ejes X, Y y Z

Eje	Media	Desviación	Mínimo	Máximo
X	86,008	1,192	83,521	87,733
Y	90,501	0,051	90,406	90,580
Z	90,232	0,177	89,857	90,594

Tabla 4. Valores de tendencia central y de dispersión para los ejes X, Y y Z cuando el sensor se encuentra midiendo un ángulo teórico de -90°

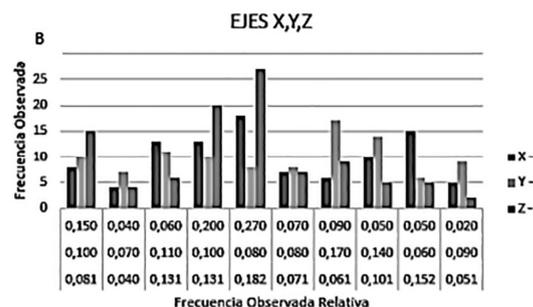
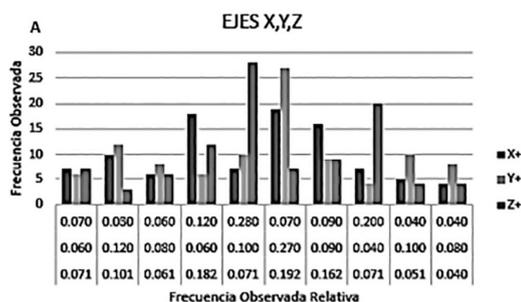
Eje	Media	Desviación	Mínimo	Máximo
X	-85,668	0,215	-85,994	-85,265
Y	-91,485	0,208	-91,857	-90,945
Z	-90,453	0,101	-90,686	-90,246

Después de aplicar el test de KS, se comprobó que los datos tienen una distribución normal; se observa que los valores de la media, el mínimo y el máximo son muy cercanos en las mediciones cuando el sensor se encuentra midiendo  $0^\circ$ ,  $90^\circ$  y  $-90^\circ$  en las muestras X1, X2, X3, Y1, Y2, Y3, Z1, Z2 y la desviación en las muestras tiene un valor promedio de 0,234. Posteriormente, se empleó la prueba ANOVA para verificar si las muestras obtenidas en cada uno de los ejes y en las tres mediciones provienen de la misma población (error cero); se encontró que no muestran un comportamiento significativo ( $p < 0$ ).

### B. Resultados para la prueba dinámica

Para realizar el análisis de los datos obtenidos en la prueba dinámica, inicialmente se empleó el test de normalidad KS de forma similar a como se utilizó en el análisis de la prueba en estática; pero, en contraste, se analizaron tres muestras por cada eje X, Y y Z, a partir de lo cual se obtuvieron datos tanto positivos como negativos, que tienen un referente teórico correspondiente a la inclinación de la rampa empleada, ya que el sensor se encontraba deslizando.

En la figura 3 se muestra la distribución de los datos en X, Y y Z, que corresponden a una de las tres mediciones.



**Figura 5.** Se evidencia la distribución de los datos de una de las muestras X, Y y Z positivo en A, y X, Y y Z negativo en B

En las tablas 5 y 6 se muestran los valores de tendencia central y de dispersión, que corresponden al promedio de las tres muestras tomadas en los ejes X, Y y Z.

**Tabla 5.** Para los ejes positivos X, Y y Z se muestran los valores de tendencia central y de dispersión

Eje+	Media	Desviación	Mínimo	Máximo
X	57,231	0,071	57,090	57,378
Y	66,626	6,114	55,984	77,342
Z	56,714	0,335	55,640	57,254

**Tabla 6.** Valores de tendencia central y de dispersión para los ejes X, Y y Z negativos

Eje-	Media	Desviación	Mínimo	Máximo
X	-55,801	0,229	-56,145	-55,165
Y	-88,586	4,682	-97,280	-80,865
Z	-50,987	0,316	-51,523	-50,197

Al aplicar el test K-S, se encontró que los datos tienen una distribución normal, con una desviación promedio de 1,958. Después se

empleó la prueba ANOVA y se confirmó que los datos no corresponden a una misma población, por lo que se realizó el análisis del error de la prueba arrojado por el sistema.

## V. Análisis de resultados

Para la caracterización de los sensores se identificaron los movimientos en los que se obtienen las variaciones angulares de cada eje. Se realizó la caracterización del comportamiento de los sensores de la prueba tanto en estática como en dinámica. Teniendo en cuenta el valor de la media, se calculó el valor referente al error absoluto, el porcentaje de error relativo, la varianza, la repetibilidad y la reproducibilidad

### A. Caracterización de los sensores en la prueba estática

Se realizó el análisis de caracterización para determinar las desviaciones de la media en los ejes X, Y y Z, al medir un ángulo teórico de 0°, 90° y -90°, lo que proporcionó un valor de error, repetibilidad y reproducibilidad del equipo; estos datos para los ejes X, Y y Z, cuando el sensor se encuentra estático midiendo 0°, 90° y -90°, están en la tabla 7.

Para realizar el cálculo del error, se tuvo en cuenta el valor de la media, tomado como el valor teórico; en el caso de las mediciones de 0°, se tomó como valor experimental el promedio de los valores máximo y mínimo; por su parte, para los datos con mediciones de 90°, se tomó el valor del máximo, en tanto para los datos con mediciones de -90° se empleó el valor del mínimo.

En la tabla 7 se observa que los datos siguen una variación uniforme correspondiente a la misma medición; se puede inferir, entonces, un coeficiente de repetibilidad mínimo y un

coeficiente de reproducibilidad mayor, lo que significa que la prueba se puede repetir más de tres veces y se obtendrán valores similares; además, el grado de error es consecuencia de la calibración del equipo y es mínimo.

**Tabla 7.** Error absoluto (EA), error relativo (ER), varianza ( $\sigma^2$ ), repetibilidad (r) y reproducibilidad (R) para cada una de las tres pruebas de los ejes respectivos (X, Y y Z)

	EA	ER	$\sigma^2$	r	R
X0	0,011	6,474	0,005	0,069	0,029
Y0	0,011	4,247	0,003	0,054	0,046
Z0	0,014	8,890	0,003	0,052	0,026
X90	1,724	1,974	1,710	1,308	14,897
Y90	0,079	0,087	0,003	0,052	15,675
Z90	0,362	0,400	0,033	0,181	15,617
X-90	0,326	0,379	0,048	0,219	14,838
Y-90	0,372	0,404	0,088	0,297	15,846
Z-90	0,234	0,258	0,010	0,102	15,667
Prom.	0,348	2,568	0,211	0,259	10,293

### B. Caracterización de los sensores en la prueba dinámica

Se realizó el análisis de manera similar a estática para comprobar la desviación de las mediciones en los ejes X, Y y Z positivos y X, Y y Z negativos; a partir de ellos se obtuvieron los resultados que se muestran en la tabla 8.

**Tabla 8.** Error absoluto (EA), error relativo (ER), varianza ( $\sigma^2$ ), repetibilidad (r) y reproducibilidad (R) para cada una de las tres pruebas de los ejes respectivos (X, Y y Z) positivos (+) y negativos (-)

	EA	ERP	$\sigma^2$	r	R
X+	0,147	0,259	0,005	0,072	9,913
Y+	2,884	4,468	42,966	6,555	11,534
Z+	0,540	0,938	0,136	0,369	9,823
X-	0,343	0,616	0,070	0,264	9,665
Y-	4,747	5,981	23,630	4,861	15,341
Z-	0,536	1,055	0,101	0,318	8,831
Prom.	1,533	2,219	11,151	2,073	10,851

## VII. Conclusiones

- El protocolo diseñado y utilizado permitió efectuar pruebas integrales, procedimientos y resultados comprobables. Para las pruebas se reportaron datos de ángulos, los cuales varían en magnitud y dirección según la posición en que se encuentre el sensor.
- Los resultados obtenidos mostraron una distribución normal, lo que se comprobó mediante la prueba de datos de K-S, pero probaron no pertenecer al mismo grupo poblacional. En consecuencia, se debieron analizar desviaciones mediante la caracterización por medio de error absoluto, relativo, repetibilidad y reproducibilidad.
- Los resultados de la caracterización realizados por medio de la prueba de error absoluto y error relativo mostraron un valor promedio de error absoluto de 0,348° en estática y de 1,532° en dinámica, y un

porcentaje de error relativo de 2,5% en estática y de 2,2% en dinámica. Los valores obtenidos de repetibilidad (r) y reproducibilidad (R) muestran que el sistema presenta proximidad de concordancia entre las mediciones. Lo anterior llevó a comprobar que se tiene fiabilidad en el uso del equipo; por consiguiente, es adecuado para pruebas en sujetos, por lo que se pretende iniciar una investigación sobre bipedestación estática en estudiantes de la Facultad Tecnológica de la Universidad Francisco José de Caldas.

- Como primera práctica, se lograron identificar los tres ejes de variación de los sensores IMU Technaid y observar su comportamiento.

## Referencias

- Arriagada, E. y Peralta, D. V. (2008). Error absoluto, error relativo. Recuperado de <https://goo.gl/qNGm63>
- Bakieva, M., Such, G. y Jornet, J. Y. (2010). SPSS: ANOVA de un factor. Recuperado de [http://www.uv.es/innomide/spss/SPSS/SPSS\\_0702b.pdf](http://www.uv.es/innomide/spss/SPSS/SPSS_0702b.pdf)
- Bravo, D. A., Rengifo, C. F. y Agredo, W. (2016). Comparison of two Motion Capture Systems by means of joint Trajectories of human gait. *Revista Mexicana de Ingeniería Biomédica*, 37(2).
- Canela, M., Ama, A. J. y Pons, J. L. (2013). Converging clinical and engineering research on neurorehabilitation. *Converging Clinical & Engineering Research on NR*, 1, 255-258.
- Capture, M. (2015). Tu propio sistema de captura de movimiento – Motion Capture. Recuperado de <https://coatayork1.wordpress.com/2015/04/15/tu-propio-sistema-de-captura-de-movimiento/>

- Carballo, M., Barrero, M. y Villazón, A. (2016). FiMAN: Sistema computarizado para análisis de movimientos digitales. *Revista Investigación & Desarrollo*, 1(16).
- Colin, R. (2011). GPS system with IMUs tracks first responders. Recuperado de [http://www.eetimes.com/document.asp?doc\\_id=1259727](http://www.eetimes.com/document.asp?doc_id=1259727)
- Hernández-Sampieri, R., Fernández-Collado, C. y Baptista-Lucio, P. (2006). *Metodología de la investigación*. Ciudad de México: McGraw-Hill.
- Luengas, L. A. (2013). *Laboratorio virtual de destilación apoyado en un sistema de captura de movimiento*. Bogotá: Universidad Distrital Francisco José de Caldas.
- Luengas, L. A., Gutiérrez, M. A. y Camargo, E. (2017). *Alineación de prótesis y parámetros biomecánicos de pacientes amputados trans-tibiales*. Bogotá: Universidad Distrital Francisco José de Caldas.
- Minitab 17 (2015). Repetibilidad y reproducibilidad en sistemas de medición. Recuperado de <http://support.minitab.com/es-mx/minitab/17/topic-library/quality-tools/measurement-system-analysis/gage-r-r-analyses/repeatability-and-reproducibility/>
- Motion Capture (2015). Tu propio sistema de captura de movimiento. Recuperado de <https://coatayork1.wordpress.com/2015/04/15/tu-propio-sistema-de-captura-de-movimiento/>
- Motion Capture System (2004). Technaid - Leading Motion. Recuperado de <http://www.technaid.com/es/productos/motion-capture-system/>
- Quinones-Uriostegui, I., Bernal-Yescas, F., Tovar-Sandoval, J., Vela-Pena, M. y Bourdon-Santoyo, E. (2014). Biomechanical analysis of the propulsion of the manual wheelchair in patients with spinal cord injury. *Health Care Exchanges (PAHCE)*, 2014 Pan American. Recuperado de <https://doi.org/10.1109/PAHCE.2014.6849643>
- Sealey, W. y Student, G. (1937). t-Student y F-Snedecor, 1-7. Recuperado de <http://virtual.uptc.edu.co/ova/estadistica/docs/libros/tstudent.pdf>
- SmartDreams (2010). Unidad de Medición Inercial (IMU). Recuperado de <http://smartdreams.cl/unidad-de-medicion-inercial-imu/>
- TECNAID (2013). Captura, análisis de movimiento y ayudas técnicas. Recuperado de <http://www.technaid.com/wp-content/uploads/2016/05/Especificaciones-Técnicas-Tech-MCS-V3-ES.pdf>