



Universidad de Valladolid



**ESCUELA DE INGENIERÍAS
INDUSTRIALES**

UNIVERSIDAD DE VALLADOLID

ESCUELA DE INGENIERÍAS INDUSTRIALES

Grado en Ingeniería en Tecnologías Industriales

**Propuesta de una metodología para
estimar los ángulos entre la cabeza y el
torso mediante sensores inerciales.**

Autor:

Acevedo Eustaquio, Sara

Tutores:

Lorenzana Ibán, Antolín

Magdaleno González, Álvaro

Departamento C.A., I.T., M.M.C. y

Teoría de Estructuras

Valladolid, julio 2023.



AGRADECIMIENTOS

Me gustaría dar gracias a todas esas personas que me han acompañado durante estos años de carrera y que han participado en mi formación como Ingeniera Industrial.

En primer lugar, me gustaría agradecer este trabajo a mi tutor, Antolín y a todos los miembros de su equipo que han colaborado para sacar adelante dicho trabajo, por mostrar su apoyo cuando aparecían complicaciones. En especial me gustaría dar las gracias a Guille Fernández por su constante disponibilidad, el tiempo dedicado, su ayuda a la hora de resolver problemas y facilitarme en gran medida las cosas.

Por otra parte, me gustaría dar las gracias a mi padre, a mi madre y a mi hermano Mario por estar presentes durante toda mi educación y mostrar su apoyo incondicional a lo largo de toda mi vida.

Para terminar, dar gracias a mis amigos más cercanos y resto de familiares que se han preocupado por mí, me han animado en los momentos más difíciles y han hecho que todo salga adelante de la mejor manera posible.

Por ello, muchas gracias.

RESUMEN

Este Trabajo de Fin de Grado pretende explorar el campo de la biomecánica mediante el análisis de los ángulos relativos de dos articulaciones utilizando unidades de medida inerciales (IMU, de sus siglas en inglés). Mediante el uso de estas IMUs, se pretende obtener datos precisos que posteriormente serán analizados y procesados con el objetivo de obtener los movimientos relativos entre la cabeza y el torso, con el propósito de analizar la cinemática de las articulaciones del cuello.

Para ello ha sido necesario familiarizarse con la instrumentación requerida y sus modos de uso, para posteriormente realizar un número adecuado de ensayos para establecer una metodología válida. Esta investigación se lleva a cabo con la finalidad de desarrollar un procedimiento aplicable en la formación de socorristas, específicamente en situaciones donde se requiere rescatar a víctimas con lesiones en la médula espinal. Se concluye que se puede conseguir el objetivo, con la precisión suficiente y con independencia de la posición espacial del sujeto.

PALABRAS CLAVE

Biomecánica, ángulos de Euler, unidades de medida inerciales (IMUs), sistema de referencia.

ABSTRACT

This Bachelor's Thesis aims to explore the field of biomechanics through the analysis of the relative angles of two joints using inertial measurement units (IMUs). By using these IMUs, precise data is intended to be obtained, which will later be analysed and processed in order to obtain the relative movements between the head and the thorax, with the purpose of analysing the kinematics of the neck joints.

To achieve this, it has been necessary to become familiar with the required instrumentation and its modes of use, and subsequently conduct an adequate number of trials to establish a valid methodology. This research is carried out with the aim of developing a procedure applicable in the training of lifeguards, specifically in situations where rescuing victims with spinal cord injuries is required. It is concluded that the objective can be achieved with sufficient accuracy, regardless of the spatial position of the subject.

KEY WORDS

Biomechanics, Euler angles, Inertial Measurement Units (IMUs), reference system.



ÍNDICE DE CONTENIDOS

CAPÍTULO 1. Introducción y objetivos.	1
1.1. Introducción.....	1
1.2. Antecedentes y motivación.	5
1.3. Objetivos.	5
CAPÍTULO 2. Fundamento teórico.....	7
2.1. Ángulos de Euler.	7
2.2. Matriz de rotación del sólido en la referencia tierra (L).	11
2.3. Transformaciones y rotación.	14
2.4. Rotación relativa de un sólido respecto de otro. Sólido referencia y sólido satélite.....	15
CAPÍTULO 3. Instrumentación.	19
3.1. Características.	19
3.2. Funcionamiento de los sensores Xsens DOT.	21
CAPÍTULO 4. Metodología y calibración.....	25
4.1. Toma de datos.....	25
4.2. Verificación de la calibración de los tres ángulos de Euler.....	27
4.3. Validación con giros controlados.	39
CAPÍTULO 5. Aplicación al ámbito biomecánico.	55
5.1. Biomecánica del cuello.....	55
5.2. Lesiones cervicales.....	58
5.3. Aplicación a la formación de socorristas.....	59
CAPÍTULO 6. Aplicación realista a una persona.....	61
6.1. Unidad de medida inercial situada en la coronilla.	61
6.2. Unidad de medida inercial situada en la frente.....	65
6.3. Unidades de medida inerciales situadas en el tórax y en la frente.....	68
CAPÍTULO 7. Conclusiones y líneas futuras.....	73
7.1. Conclusiones.	73
7.2. Líneas futuras.	75
7.3. Consideraciones adicionales.....	77
REFERENCIAS.....	79
ANEXO 1. Parte operativa de los sensores Xsens DOT.....	85
Aplicación Xsens DOT para dispositivo móvil.....	85
ANEXO 2. Aplicación a la evaluación de la metodología de rescate.	105
Técnicas de rescate.....	105
Método experimental.	106

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Sistema de seguimiento óptico con marcadores [6].	2
Figura 2. Dispositivos Xsens DOT de la empresa Movella [7].	3
Figura 3. Medición de ángulos articulares [8].	4
Figura 4. Vértabras cervicales [10].	4
Figura 5. Primera rotación de los ángulos de Euler, ψ .	8
Figura 6. Segunda rotación de los ángulos de Euler, θ .	8
Figura 7. Tercera rotación de los ángulos de Euler, ϕ . Secuencia Z-Y'-X''.	9
Figura 8. Tercera rotación de los ángulos de Euler, ϕ . Secuencia Z-Y'-Z''.	10
Figura 9. Sensores Xsens DOT en su estuche de carga [23].	20
Figura 10. Sistema de coordenadas del sensor Xsens DOT [23].	22
Figura 11. Representación de los sistemas de referencia fijo y móvil.	23
Figura 12. Interfaz de Microsoft Excel.	26
Figura 13. Cálculo del tiempo (s).	27
Figura 14. Posición de los sensores en la caja.	28
Figura 15. Valor constante de la rotación alrededor del eje Y.	29
Figura 16. Rotación alrededor del eje X.	30
Figura 17. Rotación alrededor del eje Y.	32
Figura 18. Rotación alrededor del eje Z.	33
Figura 19. Rotación alrededor del eje Z calibrada.	36
Figura 20. Rotación alrededor del eje Z tras el reinicio de los sensores.	37
Figura 21. Rotación alrededor del eje Z tras el reinicio de los sensores calibrado.	37
Figura 22. Ajuste de la rotación alrededor del eje Z a 0 grados.	38
Figura 23. Calibración de la rotación alrededor del eje Z.	40
Figura 24. Rotación alrededor del eje Y.	41
Figura 25. Rotación alrededor del eje X.	41
Figura 26. Rotación alrededor del eje Z.	41
Figura 27. Ángulos registrados para la secuencia $Y\pm45$, $X\pm45$, $Z\pm45$, $X+90$, $Z\pm45$, $X\pm45$, $Y\pm45$.	43
Figura 28. Ángulos transformados correspondientes a la secuencia $Y\pm45$, $X\pm45$, $Z\pm45$, $X+90$, $Z\pm45$, $X\pm45$, $Y\pm45$.	44
Figura 29. Posición de las dos IMUs en el sólido rígido.	45
Figura 30. Ángulos registrados para la secuencia $Y\pm45$, $X\pm45$, $Z\pm45$ por la IMU situada en la cara superior horizontal.	45
Figura 31. Ángulos registrados para la secuencia $Y\pm45$, $X\pm45$, $Z\pm45$ por la IMU situada en la cara lateral.	46
Figura 32. Ángulos transformados correspondientes a la secuencia $Y\pm45$, $X\pm45$, $Z\pm45$ por la IMU situada en la cara lateral.	47
Figura 33. Posición de los sensores para el test 3.	48
Figura 34. Primer movimiento, giro en torno al eje Y de 45 grados.	49
Figura 35. Segundo movimiento, giro en torno al eje Z de 45 grados.	49
Figura 36. Tercer movimiento, giro en torno al eje X de 45 grados.	50
Figura 37. Ángulos registrados por la IMU situada en el sólido inferior.	50

Figura 38. Ángulos registrados por la IMU situada en la cara superior horizontal del sólido superior.....	51
Figura 39. Ángulos registrados por la IMU situada en la cara frontal del sólido superior.....	51
Figura 40. Referencia IMU situada en el sólido inferior y relativo IMU situada en la cara frontal del sólido superior.	52
Figura 41. Referencia IMU situada en el sólido inferior y relativo IMU situada en la cara superior horizontal del sólido superior.	53
Figura 42. Referencia IMU situada en la cara frontal del sólido superior y relativo IMU situada en la cara superior horizontal del sólido superior.	54
Figura 43. Movimientos de flexión (izquierda) y extensión (derecha) [29].	56
Figura 44. Movimiento de rotación [29].	57
Figura 45. Movimiento de flexión lateral [29].	57
Figura 46. Posicionamiento de la unidad de medida inercial sobre la coronilla.	62
Figura 47. Movimiento de extensión.	63
Figura 48. Movimiento de flexión.....	63
Figura 49. Movimiento de rotación a la derecha.	63
Figura 50. Movimiento de rotación a la izquierda.	63
Figura 51. Movimiento de flexión lateral derecha.	63
Figura 52. Movimiento de flexión lateral izquierda.....	63
Figura 53. Rotaciones con la unidad de medida inercial en la coronilla.	64
Figura 54. Posicionamiento de la unidad de medida inercial en la frente.	65
Figura 55. Rotaciones con la unidad de medida inercial situada en la frente de la persona.	66
Figura 56. Posicionamiento de las IMUs en la coronilla, en la frente y en el tórax.	68
Figura 57. Secuencia de movimiento con el tórax erguido.	69
Figura 58. Secuencia de movimiento con el tórax inclinado hacia delante.....	69
Figura 59. Secuencia de movimiento con el tórax torsionado.....	69
Figura 60. Secuencia de movimiento con el tórax inclinado de lado	69
Figura 61. Rotaciones registradas por la IMU situada en la coronilla del sujeto.	70
Figura 62. Rotaciones registradas por la IMU situada en la frente del sujeto.....	70
Figura 63. Rotaciones registradas por la IMU situada en el tórax del sujeto.	71
Figura 64. REF IMU situada en el tórax y SAT IMU situada en la frente.....	72
Figura 65. REF IMU situada en el tórax y SAT IMU situada en la coronilla.	72
Figura 66. Animación de un avatar a partir de los datos registrados.	76
Figura 67. Pantalla inicial de la aplicación Xsens DOT.....	86
Figura 68. Conexión de los sensores.....	87
Figura 69. Detalles de un sensor.....	87
Figura 70. Selección de la frecuencia de salida.	88
Figura 71. Selección del perfil de filtro.....	88
Figura 72. Pestaña “Measure & Collect”	90
Figura 73. Modos de grabación.	91
Figura 74. Modo de grabación “Sensor Fusion Data”.	92
Figura 75. Modo de grabación “Inertial Data”.	92
Figura 76. Modo de grabación “Custom Modes”.....	92



Figura 77. Gráficas en el modo “Real-time Streaming (Live mode)”	93
Figura 78. Modo de grabación “Recording (offline mode)”	94
Figura 79. Configuración del temporizador.....	95
Figura 80. Grabación.....	96
Figura 81. Selección archivos de grabación a exportar.	97
Figura 82. Selección ángulos de Euler.....	98
Figura 83. Exportar datos.....	99
Figura 84. Finalización de la exportación de los datos.	100
Figura 85. Pantalla inicial.....	101
Figura 86. Selección de archivos a exportar.....	101
Figura 87. Selección de datos a exportar.	102
Figura 88. Archivos exportados correctamente.....	102
Figura 89. Tercera pestaña “Advanced”	103
Figura 90. Opciones de “Settings”	104
Figura 91. Opciones “Power options”	104
Figura 92. Técnica de rescate A, sujeción del cuello con las manos.	105
Figura 93. Collarín cervical [40].....	106
Figura 94. Posición de los IMUs en el cuerpo de la víctima.....	107
Figura 95. Colocación del tablero de rescate.	107



ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Patrones LED de Xsens DOT v2 [23].	20
Tabla 2. Calibración de los valores de los ángulos de rotación alrededor del eje Z. ..	35
Tabla 3. Precisión de sincronización [23].	89
Tabla 4. Plataformas compatibles con el software [37].	104

CAPÍTULO 1. Introducción y objetivos.

1.1. Introducción.

En las últimas décadas ha tenido lugar un notable avance en el ámbito de la tecnología portátil. La sociedad se ha sumergido oficialmente en lo que se conoce como la cuarta revolución industrial o Industria 4.0. Esta última revolución ha llevado a cabo una adopción importante de tecnologías basadas en sensores, siendo el Internet de las Cosas (IoT) el principal impulsor de este cambio radical.

Como resultado, los límites entre los mundos físico, biológico y tecnológico se están fusionando. Una aplicación directa de esta situación es la tecnología de seguimiento del movimiento humano para llevar a cabo análisis importantes en ámbitos como la medicina, el ejercicio y la salud, lo cual amplía los límites de la interacción digital humana [1].

La ciencia que estudia la mecánica del movimiento de los seres humanos se denomina biomecánica. Es una ciencia que pertenece a la rama de la bioingeniería e ingeniería biomédica cuyo objetivo principal es examinar y describir el movimiento del cuerpo humano, así como analizar las fuerzas que actúan sobre la estructura biológica y los efectos producidos por esas fuerzas.

Esta ciencia emplea los principios y conocimientos de disciplinas como la mecánica, la ingeniería, la anatomía, la histología y la fisiología para investigar y comprender el movimiento humano [2]. Existen distintas ramas de esta ciencia, entre ellas destacan la biomecánica médica, ocupacional, fisioterapéutica, deportiva y forense [3].

La biomecánica médica se enfoca en el análisis de enfermedades y trastornos que afectan al cuerpo humano con el objetivo de evaluar, mitigar o reparar los daños causados. Lleva a cabo un estudio detallado de las patologías y busca mejorar la calidad de vida de los pacientes.

La biomecánica ocupacional utiliza los principios de la biomecánica del cuerpo humano para adaptar las condiciones de trabajo a las necesidades y capacidades del individuo. Este campo de estudio examina la interacción entre el cuerpo humano y los elementos presentes en diferentes entornos, ya sea en el hogar, en el automóvil, al manejar herramientas o en el lugar de trabajo. El objetivo es optimizar la ergonomía y prevenir lesiones relacionadas con la actividad laboral.

La biomecánica fisioterapéutica se centra en la evaluación de disfunciones del sistema musculoesquelético en seres humanos. A través de un análisis biomecánico se observan, tratan y reducen las alteraciones en el movimiento y la postura.

La biomecánica deportiva se dedica al estudio del movimiento humano durante la práctica deportiva con el fin de desarrollar técnicas de entrenamientos, diseñar complementos, equipamientos y materiales de altas prestaciones con el objetivo de mejorar el rendimiento deportivo y prevenir lesiones relacionadas con el deporte.

Por último, la biomecánica forense se centra en el estudio del movimiento humano para analizar los mecanismos de lesión en casos de accidentes, colisiones, impactos u otras acciones que involucren un esfuerzo considerable [3].

Por consiguiente, adquirir un conocimiento profundo de la biomecánica y la carga asociada a cada elemento involucrado en ella resultará altamente beneficioso para el análisis de los movimientos, la comprensión de las técnicas, los gestos deportivos, la investigación de las causas de enfermedades, la prevención de posiciones y posturas incorrectas, y una amplia gama de aplicaciones adicionales [4].

Los métodos de captura de movimiento incluyen tanto métodos visuales y ópticos, como métodos basados en sensores. La captura de movimiento óptica a través de sistemas de marcadores activos o pasivos se considera uno de los más importantes debido a su alto grado de precisión y exactitud en la medición de posiciones. Sin embargo, presenta varias desventajas, como estar restringida a entornos de laboratorio, requerir mucho tiempo de configuración y calibración para garantizar que no se pierden datos de las trayectorias, así como largos tiempos de procesamiento [5]. Estas limitaciones impiden su adopción en muchas aplicaciones de la vida real y al aire libre. En la Figura 1 se muestra un fotograma de un trabajo realizado en la Universidad de Stanford donde utilizan esta tecnología [6].



Figura 1. Sistema de seguimiento óptico con marcadores [6].

Como solución alternativa a los sistemas de seguimiento óptico de movimiento, las unidades de medida inerciales (IMUs, por sus siglas en inglés *Inertial Measurement Unit*) han ganado popularidad en las últimas dos décadas. Contienen giroscopios, acelerómetros y magnetómetros que proporcionan datos precisos y en tiempo real sobre los movimientos y la orientación de los segmentos corporales. Estos sensores, compactos y portátiles, permiten una captura continua y detallada de la información cinemática. A pesar de su tamaño reducido y su aplicabilidad en casi cualquier entorno, estos dispositivos también enfrentan varios desafíos técnicos [5]. En la Figura 2 se muestran los dispositivos que se usarán en este trabajo denominados Xsens DOT de la empresa Movella.



Figura 2. Dispositivos Xsens DOT de la empresa Movella [7].

La capacidad de medir los ángulos articulares del cuerpo, como por ejemplo en la Figura 3 donde se mide el ángulo que rota la muñeca, es de suma importancia en el análisis del movimiento humano. La investigación de cómo se mueven diferentes segmentos del cuerpo con respecto a otros permite analizar el movimiento de forma numérica basada en las mediciones. Esto proporciona una representación objetiva y precisa del movimiento, lo que permite a los usuarios cuantificar movimientos que no sería posible analizar a simple vista. A partir de esto, se pueden identificar variables críticas de interés relevante para una tarea o habilidad, lo que permite a los usuarios evaluar fortalezas o debilidades y aplicar intervenciones específicas cuando corresponda [1].

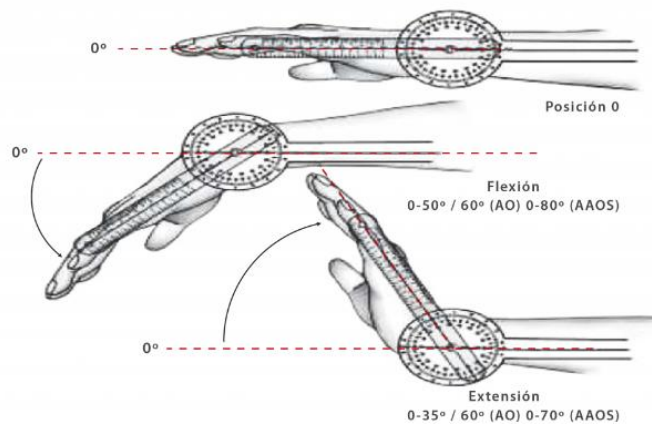


Figura 3. Medición de ángulos articulares [8].

Dentro del campo de la biomecánica, un caso específico es el cálculo de los ángulos articulares del cuello. Este es un tema de gran relevancia en aplicaciones médicas y ergonómicas. El desarrollo de modelos para el análisis cinemático y dinámico de estos movimientos resulta crucial debido a la importancia económica y social que tiene la prevención, evaluación y rehabilitación de las lesiones en el cuello.

En el ámbito de la Medicina, los modelos biomecánicos del cuello (Figura 4) permiten investigar las causas de las lesiones cervicales, evaluar las alteraciones funcionales asociadas y hacer un seguimiento de los tratamientos de rehabilitación. Por otro lado, en el campo de la Ergonomía, el estudio de la biomecánica del cuello permite valorar la carga física relacionada con actividades laborales específicas y desarrollar modelos que contribuyan al diseño de puestos de trabajo que prevengan posibles lesiones [9].

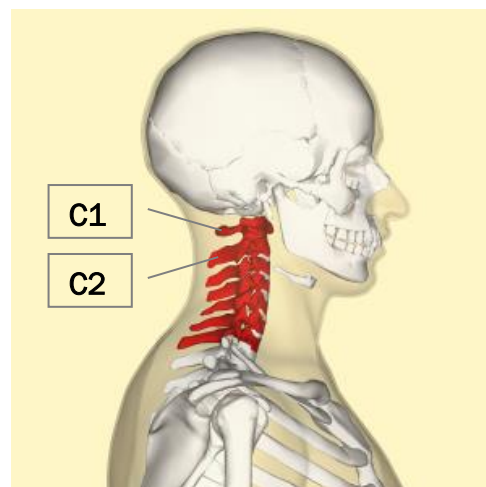


Figura 4. Vértebras cervicales [10].

1.2. Antecedentes y motivación.

En el laboratorio de Dinámica de Estructuras de la Universidad de Valladolid [11] se trabaja en temas de interacción entre los peatones y las estructuras ligeras por las que transitan como por ejemplo pasarelas peatonales y forjados industriales de grandes luces, entre otros. Entre sus equipos instrumentales cuentan con 16 unidades de sensores Xsens DOT adquiridas por su capacidad para registrar aceleraciones lineales. Cada IMU actúa, por tanto, como un acelerómetro triaxial que, para determinadas aplicaciones puede sustituir a los acelerómetros piezoeléctricos, mucho más caros y menos versátiles al ir cableados. El uso como acelerómetro se ha validado por los miembros del grupo y también ha sido objeto de algún Trabajo de Fin de Grado (TFG) [12].

Como se explicará en el apartado 3.2 de este documento, estas IMUs, basadas en tecnología MEMS, son capaces de medir posiciones angulares, labor que se inicia con el desarrollo de este TFG. Conocer las posiciones angulares de los miembros del cuerpo humano permitirán, junto con la masa y otras variables cinemáticas como las propias aceleraciones del centro de gravedad de cada miembro, determinar las fuerzas que el peatón ejerce sobre la estructura y estudiar fenómenos de interacción sin necesidad de equipos instrumentales de mayor coste. Con este TFG se pretende iniciar esta línea de investigación, quedando limitado su alcance al entendimiento de los ángulos registrados por los sensores y al cálculo de ángulos relativos entre los distintos miembros, concretamente entre el torso y la cabeza.

1.3. Objetivos.

El objetivo principal de este trabajo es desarrollar un método preciso y confiable para medir los ángulos relativos entre los diferentes miembros del cuerpo humano, es decir, las variaciones angulares entre diferentes articulaciones del cuerpo en lugar de mediciones absolutas.

Esto implica diseñar un sistema de medición que pueda capturar y analizar los movimientos articulares en tiempo real, permitiendo evaluar la relación angular entre diferentes partes del cuerpo durante actividades específicas.

Posteriormente, estos datos pueden utilizarse para mejorar la comprensión de los patrones de movimiento, identificar desequilibrios musculares y evaluar la eficiencia biomecánica en diversas actividades físicas.

Para recolectar los datos, otro de los objetivos de este trabajo es la iniciación del uso de sensores vestibles (*wearable sensors*, según se denominan en inglés) que son aquellos que se pueden incorporar a la vestimenta. Para ello, es necesario saber configurar los sensores adecuados, diseñar experimentos

y recopilar datos, analizar y validar los datos obtenidos y evaluar las posibles aplicaciones de esta tecnología en diversos campos.

Este trabajo permitirá adquirir experiencia práctica en el uso de sensores vestibles y explorar su potencial para futuras investigaciones o aplicaciones en el ámbito de la monitorización y recolección de datos.

La utilidad en la que se centra este documento es en la medición de los ángulos de los movimientos que realiza el cuello. Para ello, se busca obtener los ángulos relativos de los movimientos de la cabeza respecto del tórax.

Como aplicación concreta de interés social se comentará la posible utilización en el rescate acuático de víctimas con lesión medular, gracias a la impermeabilidad del sistema de medición propuesto, donde la precisión y la resistencia al agua son factores de mucha importancia.

El adiestramiento de socorristas en el rescate de náufragos es una actividad crítica que requiere habilidades específicas y una comprensión profunda de los movimientos necesarios para llevar a cabo una operación de manera segura y efectiva.

El cuello, como una de las partes más vulnerables del cuerpo humano, juega un papel crucial en la protección de la médula espinal y la estabilidad general del individuo. Por lo tanto, es fundamental analizar los movimientos relativos del cuello respecto del tórax durante las maniobras de rescate, con el fin de identificar posibles tensiones, fuerzas y movimientos que puedan resultar perjudiciales o comprometer la integridad física del náufrago y del socorrista.

Esto permitirá optimizar las técnicas y estrategias utilizadas en estas situaciones de emergencia, reducir el riesgo de lesiones tanto para el socorrista como para el náufrago, y mejorar la eficacia general de los procedimientos de rescate.

En resumen, este trabajo se enfoca en el estudio biomecánico utilizando unidades de medida inerciales como sensores, de los movimientos relativos de la cabeza respecto del tórax para su posterior aplicación en el adiestramiento de socorristas para el rescate de náufragos, con el objetivo último de mejorar las habilidades y prácticas de rescate en beneficio de la vida humana.

CAPÍTULO 2. Fundamento teórico.

2.1. Ángulos de Euler.

Para el estudio del movimiento de un sólido o sistema de referencia, existe un conjunto de coordenadas, denominadas ángulos de Euler que facilitan la determinación de su orientación. En esta sección se abordan los fundamentos esenciales de los ángulos de Euler, puesto que es importante comprenderlos adecuadamente para analizar de manera efectiva los datos recogidos por los sensores empleados.

En el siglo XVIII, el matemático Leonard Euler introdujo estos ángulos [13] y se han convertido en conceptos fundamentales en campos como la mecánica, la física y la ingeniería. Estos ángulos permiten representar la posición y orientación de un objeto en relación con un sistema de coordenadas fijas. Son muy útiles ya que ofrecen una manera fácil de describir y visualizar los movimientos de objetos en el espacio, ya sea en términos de rotaciones alrededor de ejes específicos o en relación con un estado de referencia.

Estos ángulos permiten una gran libertad en la definición de los parámetros de forma que su aplicación será válida siempre que cumplan unas condiciones, lo que hace posible un gran número de opciones en el orden de los giros y los ejes en los que aparece cada uno. La definición geométrica demuestra que tres rotaciones elementales compuestas, es decir, rotaciones alrededor de los ejes de un sistema de coordenadas, siempre son suficientes para posicionar a un sólido rígido con cualquier orientación en el espacio [14].

Para describir los ángulos de Euler se suelen emplear las letras griegas: ψ (*psi*), θ (*theta*) y φ (*phi*). Aunque, distintos autores pueden emplear diferentes conjuntos de ejes de rotación para definir los ángulos de Euler o diferentes nombres para los mismos ángulos. Por lo tanto, siempre que se utilicen estos ángulos se deben de definir previamente [15].

Se debe diferenciar entre una rotación extrínseca, que son rotaciones alrededor de ejes de un sistema de coordenadas que asume que permanece inmóvil, y una rotación intrínseca, que son rotaciones alrededor de ejes de un sistema de coordenadas unido sólidamente a un cuerpo en movimiento y que cambia de orientación con respecto al marco extrínseco después de cada rotación elemental.

La primera rotación orienta a una base mediante una rotación simple de ángulo ψ , a partir de una base fija, es decir, es una rotación extrínseca. La segunda rotación orienta una nueva base mediante otra rotación simple de

eje perpendicular a la rotación anterior y ángulo θ . Finalmente, a partir de esta base orientada con ψ y θ , la tercera rotación orienta la base mediante una nueva rotación simple de eje perpendicular al de la rotación precedente y ángulo φ [16].

Lo anteriormente explicado se puede observar en la Figura 5, Figura 6, Figura 7 y Figura 8 que aparecen a continuación. La base inicial fija se denota por los ejes XYZ, la primera rotación se produce alrededor del eje Z y rota un ángulo ψ , esto genera una nueva base descrita por los ejes X'Y'Z' representada en color azul en la Figura 5. Se aprecia que el eje Z es coincidente con el eje Z' ya que la nueva base ha rotado respecto de este eje.

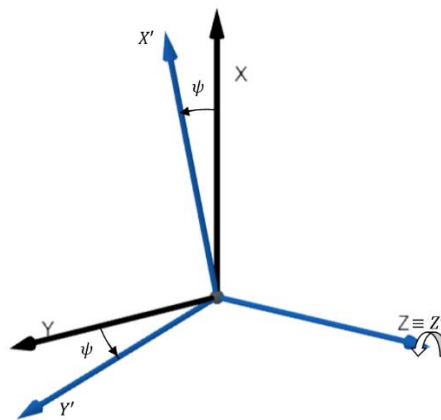


Figura 5. Primera rotación de los ángulos de Euler, ψ .

La segunda rotación se produce con un ángulo θ alrededor del eje Y' perteneciente a la base rotada con ángulo ψ , lo cual da lugar a una nueva base con los ejes X''Y''Z'', representación en color verde que se muestra en la Figura 6. En este caso el eje Y' es coincidente con el eje Y''.

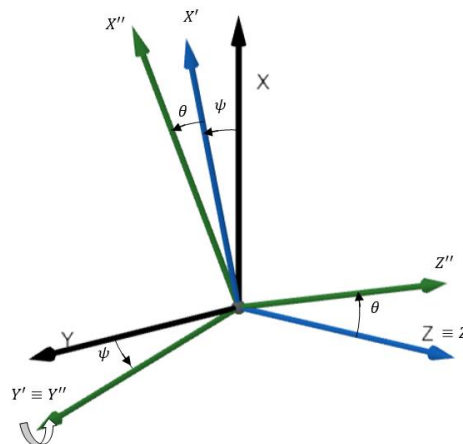


Figura 6. Segunda rotación de los ángulos de Euler, θ .

Por último, se debe considerar una tercera rotación cuyo eje de giro dependerá del tipo de ángulos de Euler que se estén utilizando. Esta rotación adicional se produce alrededor de un eje específico, que puede ser diferente según el conjunto de ángulos de Euler empleados en el análisis. Es necesario tener en cuenta esta variación, ya que afectará la orientación final del sistema en estudio.

En el caso en el que la última rotación se realice sobre el eje X'' con un ángulo φ , se genera una nueva base con los ejes X''' , Y''' , Z''' , donde el eje X'' coincide con el eje X''' , esto se puede observar en la Figura 7, donde la nueva base está representada en color naranja. Esta se denomina secuencia Z-Y'-X''.

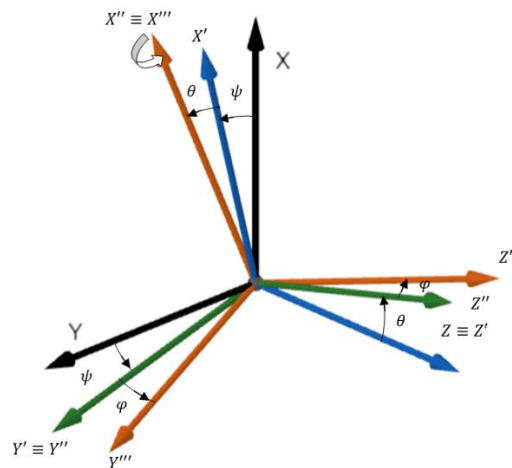


Figura 7. Tercera rotación de los ángulos de Euler, φ . Secuencia Z-Y'-X''.

Mientras que si la última rotación se realiza sobre el eje Z'' con un ángulo φ , igualmente se genera la nueva base de ejes X''' , Y''' , Z''' , pero esta vez el eje Z'' es coincidente con Z''' obteniéndose la secuencia Z-Y'-Z''. La nueva base se puede apreciar en la Figura 8 representada en color naranja.

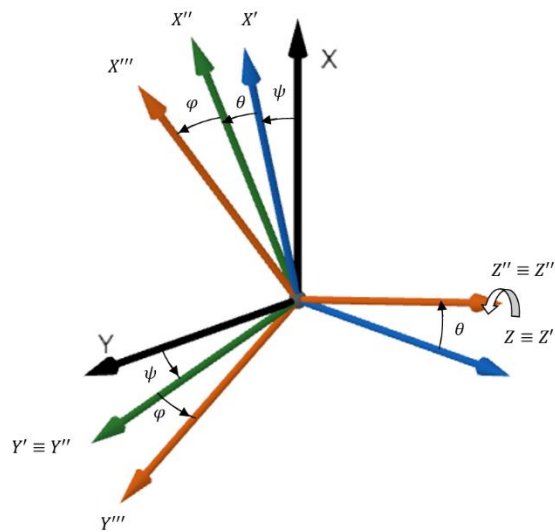


Figura 8. Tercera rotación de los ángulos de Euler, φ . Secuencia Z-Y'-Z''.

La secuencia Z-X'-Y'' se utiliza para definir la orientación de los vehículos. Estos ángulos de Euler toman los nombres de balanceo, cabeceo y guiñada. Se denominan ángulos de Tait-Bryan, ángulos Cardán o ángulos de navegación. Representan rotaciones alrededor de los tres ejes distintos y están destinados a su uso en aeronáutica, navegación e ingeniería ya que se utilizan normalmente para definir la posición de aeronaves, satélite o embarcaciones [16].

Cuando se trata de ángulos de navegación, se emplean tres coordenadas angulares que representan la posición de un triedro rotado con respecto a otro que se considera el sistema de referencia. Estas coordenadas son utilizadas para representar la orientación espacial del objeto o sistema en estudio. Para esta secuencia, existen seis posibles opciones para las combinaciones de los ejes de rotación: X-Y'-Z'', Y-Z'-X'', Z-X'-Y'', X-Z'-Y'', Z-Y'-X'', Y-X'-Z''. Cada una de estas opciones representa una forma distinta de realizar las rotaciones sucesivas.

En el contexto específico de los sensores utilizados en este documento, Xsens DOT como se verá en el capítulo 3, se ha descrito anteriormente la secuencia Z-Y'-X'' como la que será usada, ya que es la que corresponde a los parámetros utilizados por dichos sensores para determinar la orientación del sistema.

Por otro lado, la secuencia Z-Y'-Z'' se utiliza para estudiar los giróscopos [17] o rotores rápidos y en particular la peonza. De esta aplicación proceden sus nombres: precesión ψ , nutación θ y rotación propia φ . En este caso se denominan ángulos de Euler propios o clásicos y utilizan el mismo eje para la primera y la tercera rotación elemental. Para esta secuencia también existen 6 opciones para las combinaciones de los ejes de rotación: Z-X'-Z'', X-Y'-X'', Y-

$Z'-Y''$, $Z-Y'-Z''$, $X-Z'-X''$, $Y-X'-Y''$. Los movimientos de precesión, nutación y rotación propia se definen como los movimientos obtenidos al cambiar uno de los ángulos de Euler mientras los otros dos se mantienen constantes [14].

En este trabajo se hará uso de los ángulos de Tait-Bryan o ángulos Cardán con el propósito de analizar los resultados de los datos proporcionados por los sensores. El resultado final depende del orden en el que se apliquen las rotaciones, por lo que tienen que venir dadas en la secuencia correcta. La aparición de varios sistemas de referencia con movimiento, permiten determinar las matrices de cambio de base para expresar las mismas coordenadas en distintas bases y así facilitar el cálculo de operaciones y transformaciones en el espacio vectorial.

2.2. Matriz de rotación del sólido en la referencia tierra (L).

Se definen a continuación las matrices de cambio de base. La matriz R_ψ^z rota vectores de la base definida por la primera rotación a la base fija de partida (Ecuación 1). La matriz R_θ^y rota los vectores de la base definida por la primera y segunda rotación a la base definida por la primera rotación (Ecuación 2). Por último, la matriz R_φ^x rota los vectores de la base definida por la primera, segunda y tercera rotación a la base definida por la primera y segunda rotación (Ecuación 3) [13].

$$R_\psi^z = \begin{bmatrix} \cos \psi & -\sin \psi & 0 \\ \sin \psi & \cos \psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Ecuación 1

$$R_\theta^y = \begin{bmatrix} \cos \theta & 0 & \sin \theta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \theta & 0 & \cos \theta \end{bmatrix}$$

Ecuación 2

$$R_\varphi^x = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \varphi & -\sin \varphi \\ 0 & \sin \varphi & \cos \varphi \end{bmatrix}$$

Ecuación 3

La matriz de cambio de base que relaciona la base $B_{\psi\theta\varphi}$, es decir, la base móvil del sólido (S) con la base fija que es el sistema de coordenadas terrestres locales se obtiene realizando una post-multiplicación matricial de rotaciones simples asociadas a cada uno de los ejes coordenados en la secuencia indicada ya que se utilizan los ángulos de Tait-Bryan (Ecuación 4).

Es importante indicar que, dado que el producto matricial no es conmutativo, pretender llegar al mismo resultado empleando una multiplicación en cualquier otro orden resulta ser completamente erróneo.

$$R_L^S = R_\psi^z \cdot R_\theta^y \cdot R_\varphi^x$$

$$R_L^S = \begin{bmatrix} \cos \psi & -\sin \psi & 0 \\ \sin \psi & \cos \psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \cos \theta & 0 & \sin \theta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \theta & 0 & \cos \theta \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \varphi & -\sin \varphi \\ 0 & \sin \varphi & \cos \varphi \end{bmatrix} =$$

$$= \begin{bmatrix} \cos \theta \cos \psi & \sin \psi \sin \theta \cos \psi - \cos \varphi \sin \psi & \cos \varphi \sin \theta \cos \psi + \sin \varphi \sin \psi \\ \cos \theta \sin \psi & \sin \varphi \sin \theta \sin \psi + \cos \varphi \cos \psi & \cos \varphi \sin \theta \sin \psi - \sin \varphi \cos \psi \\ -\sin \theta & \sin \varphi \cos \theta & \cos \varphi \cos \theta \end{bmatrix}$$

Ecuación 4

La matriz de la Ecuación 4 rota un vector de la base móvil del sólido (S) a la referencia global (L). Esta matriz se denomina matriz de cosenos directores o de cambio de base. Se utilizan bases ortonormales, es decir, se trata de vectores en un espacio vectorial que son perpendiculares y de magnitud unitaria.

La base del sensor (S) se puede expresar como (Ecuación 5):

$$\{S\}_L = \{\hat{x}_L^S \quad \hat{y}_L^S \quad \hat{z}_L^S\} \in \mathbb{R}^3$$

Ecuación 5

Las componentes de los vectores de esta base \hat{x}_L^S (Ecuación 6), \hat{y}_L^S (Ecuación 7), \hat{z}_L^S (Ecuación 8) se obtienen de la matriz de rotación o de cambio de base (Ecuación 4).

$$\hat{x}_L^S = \begin{bmatrix} \cos \theta \cos \psi \\ \cos \theta \sin \psi \\ -\sin \theta \end{bmatrix}$$

Ecuación 6

$$\hat{y}_L^S = \begin{bmatrix} \sin \psi \sin \theta \cos \psi - \cos \varphi \sin \psi \\ \sin \varphi \sin \theta \sin \psi + \cos \varphi \cos \psi \\ \sin \varphi \cos \theta \end{bmatrix}$$

Ecuación 7

$$\hat{z}_L^S = \begin{bmatrix} \cos \varphi \sin \theta \cos \psi + \sin \varphi \sin \psi \\ \cos \varphi \sin \theta \sin \psi - \sin \varphi \cos \psi \\ \cos \varphi \cos \theta \end{bmatrix}$$

Ecuación 8

Las columnas de la matriz R_L^S son los vectores unitarios de S expresados mediante sus proyecciones sobre L . Esta matriz también se conoce como matriz de cosenos directores (Ecuación 9):

$$R_L^S = [\hat{x}_L^S \quad \hat{y}_L^S \quad \hat{z}_L^S] = \begin{bmatrix} \cos(\hat{x}_L, \hat{x}_S) & \cos(\hat{x}_L, \hat{y}_S) & \cos(\hat{x}_L, \hat{z}_S) \\ \cos(\hat{y}_L, \hat{x}_S) & \cos(\hat{y}_L, \hat{y}_S) & \cos(\hat{y}_L, \hat{z}_S) \\ \cos(\hat{z}_L, \hat{x}_S) & \cos(\hat{z}_L, \hat{y}_S) & \cos(\hat{z}_L, \hat{z}_S) \end{bmatrix}$$

Ecuación 9

A continuación, se describe una propiedad fundamental para tener en cuenta a la hora de calcular la matriz de rotación del sólido en la referencia tierra (L). La matriz R_L^S , es una matriz ortogonal ya que sus vectores forman una base ortonormal, por lo que se cumple la condición de la Ecuación 10.

$$R_S^L = (R_L^S)^{-1} = (R_L^S)^T, \quad R_S^L = [\hat{x}_S^L \quad \hat{y}_S^L \quad \hat{z}_S^L]$$

Ecuación 10

Esta condición permite definir la matriz de rotación en la referencia del sólido (S), R_S^L (Ecuación 11). Esta matriz rota un vector en la referencia Tierra (L) a la referencia móvil (S). Por lo que se podrán expresar los vectores del sistema de referencia Tierra (L) en el sistema de referencia del sensor (S).

$$R_S^L = (R_L^S)^T = \begin{bmatrix} \cos \theta \cos \psi & \cos \theta \sin \psi & -\sin \theta \\ \sin \psi \sin \theta \cos \psi - \cos \varphi \sin \psi & \sin \varphi \sin \theta \sin \psi + \cos \varphi \cos \psi & \sin \varphi \cos \theta \\ \cos \varphi \sin \theta \cos \psi + \sin \varphi \sin \psi & \cos \varphi \sin \theta \sin \psi - \sin \varphi \cos \psi & \cos \varphi \cos \theta \end{bmatrix}$$

Ecuación 11

Otra propiedad que hay que tener en cuenta, es que la orientación de una base de vectores con respecto a sí misma se corresponde generalmente con la matriz identidad (Ecuación 12). Por ejemplo, para S :

$$R_S^S = R_L^S \cdot R_S^L = R_L^S \cdot (R_L^S)^T = I_{(3 \times 3)} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Ecuación 12

2.2.1. Extracción de los ángulos de Euler/Tait-Bryan.

De la misma manera que los ángulos definidos en 2.1 permiten obtener R_L^S , estos pueden extraerse sin pérdida de información y en su correspondiente cuadrante mediante (Ecuación 13):

$$\varphi = \text{atan2}((R_L^S)_{32}, (R_L^S)_{33}), \quad \theta = -\text{asin}((R_L^S)_{31}), \quad \psi = \text{atan2}((R_L^S)_{21}, (R_L^S)_{11})$$

Ecuación 13

Se ha empleado la función arcotangente de 4 cuadrantes, importante para la determinación de los ángulos correctamente. Por otro lado, hay que destacar que el sentido de los ángulos responde al mismo que la matriz de rotación de la cual son extraídos. Si se tiene R_L^S , las rotaciones son aquellas que posicionan la base S respecto de L de forma intrínseca (“positivas de L a S ”), mientras que con R_S^L se tienen rotaciones que posicionan L respecto de S intrínsecamente (“positivas de S a L ”).

2.3. Transformaciones y rotación.

Hasta ahora se ha trabajado con un sólido S del cual se dispone de su orientación absoluta respecto de la referencia global Tierra (L). No obstante, y dado que la utilización de las IMUs Xsens DOT concierne al cómputo de rotaciones asociadas a un determinado miembro del cuerpo o a varios (asumidos todos ellos sólidos rígidos), interesa poder expresar la orientación de un sólido colocado en un miembro con respecto a unos ejes determinados establecidos a conveniencia.

Lo anterior tiene su fundamento teórico en la transformación de la salida del sensor, expresándolo siempre respecto de un sistema de coordenadas con el cual se desea trabajar e interpretar los resultados. Indicar que los superíndices de las matrices corresponden a la base de vectores que se está expresando respecto a la base indicada por el subíndice.

Se conoce R_L^S y se define un sistema dado por su correspondiente base ortonormal de vectores L_1 (Ecuación 14):

$$\{L_1\} = \{\hat{x}_{L_1}, \hat{y}_{L_1}, \hat{z}_{L_1}\}$$

Ecuación 14

Ahora, se desea transformar la rotación medida por un sensor posicionado en un determinado punto del sólido rígido que rota respecto de los ejes de L_1 . Para ello, surge la siguiente matriz (Ecuación 15):

$$T = (R_L^S)^T \cdot R_L^{L_1}$$

Ecuación 15

La matriz de rotación $R_L^{L_1}$ responde al caso general en el cual L_1 no coincide con el sistema global L (no es la matriz identidad). Además, si L_1 es solidario al sólido rígido en cuestión T es invariante, puesto que en todo instante se están expresando los vectores de dicho triedro en la base de vectores S , y la orientación relativa de ambos triedros no cambia al estar el sensor “pegado” al sólido en un punto teórico.

Los ángulos que son necesarios girar el triedro S (Ecuación 16) en positivo para alcanzar al triedro L_1 se calculan con la misma formulación y secuencia que ha venido siendo empleada hasta ahora (*Euler / Tait-Bryan* $Z(\psi)Y'(\theta)X''(\varphi)$):

$$\varphi_{(S \rightarrow L_1)} = \text{atan2}(T_{32}, T_{33}), \quad \theta_{(S \rightarrow L_1)} = -\text{asin}(T_{31}), \quad \psi_{(S \rightarrow L_1)} = \text{atan2}(T_{21}, T_{11})$$

Ecuación 16

La matriz T también corresponde, por tanto, a (Ecuación 17):

$$T(\psi_{(S \rightarrow L_1)}, \theta_{(S \rightarrow L_1)}, \varphi_{(S \rightarrow L_1)})$$

Ecuación 17

La salida del sensor corregido al sistema L_1 (“como si el sensor estuviese posicionado y orientado según dicho sistema de ejes”) se obtiene con una sencilla post-multiplicación matricial empleando T y posterior extracción de los ángulos finales a los que se desea dar una interpretación biomecánica (Ecuación 18):

$$(R_L^S)_{\text{corr}} = R_L^S \cdot T \rightarrow \begin{cases} \varphi_{\text{corr}} \\ \theta_{\text{corr}} \\ \psi_{\text{corr}} \end{cases}$$

Ecuación 18

El procedimiento descrito permite independizar la salida de un sensor de la posición y orientación relativa que ocupa en un sólido en el que es colocado, permitiendo conocer las rotaciones respecto de cualquier sistema de ejes adicional establecido para ello.

2.4. Rotación relativa de un sólido respecto de otro. Sólido referencia y sólido satélite.

Se tienen ahora dos sólidos con sus correspondientes bases ortonormales (Ecuación 19) de vectores conocidas (sistemas de ejes coordenadas). Uno de ellos actuará como sólido referencia (*REF*) y el otro como sólido satélite (*SAT*).

$$\{\text{REF}\} = \{\hat{x}_{\text{REF}}, \hat{y}_{\text{REF}}, \hat{z}_{\text{REF}}\}, \quad \{\text{SAT}\} = \{\hat{x}_{\text{SAT}}, \hat{y}_{\text{SAT}}, \hat{z}_{\text{SAT}}\}$$

Ecuación 19

Se pretende cuantificar la rotación incremental que sufre *SAT* con respecto a *REF* en todo instante de tiempo (Ecuación 20), para lo cual se dispone de unos registros brutos y sus correspondientes matrices de rotación con

respecto a la referencia global Tierra (L), definidas éstas de la misma manera que se ha hecho previamente en el apartado 2.2.

$$REF \rightarrow R_L^{REF} = [\hat{x}_L^{REF} \quad \hat{y}_L^{REF} \quad \hat{z}_L^{REF}], \quad SAT \rightarrow R_L^{SAT} = [\hat{x}_L^{SAT} \quad \hat{y}_L^{SAT} \quad \hat{z}_L^{SAT}]$$

Ecuación 20

El objetivo último del procedimiento es, empleando los datos y las matrices descritas, obtener una matriz de rotaciones relativas e incrementales (partiendo de la orientación inicial) de SAT respecto de REF para despejar, a partir de sus elementos, los ángulos a los que se desea dar un significado biomecánico (ángulos entre dos miembros / cuerpos distintos). Denótese esta matriz a obtener como Δ_{REF}^{SAT} , variable en el tiempo siempre y cuando existan rotaciones relativas de un sólido respecto del otro.

El primer paso que realizar es cambiar la base de representación de la Tierra L a REF , para lo cual es necesario emplear la matriz de cambio de base siguiente (vectores de L expresados en REF) calculada a partir de los registros brutos del sólido REF y su matriz de rotación (Ecuación 21):

$$C_{REF}^L = (C_L^{REF})^{-1} = (R_L^{REF})^{-1} = (R_L^{REF})^T$$

Ecuación 21

A continuación, calculada C_{REF}^L , se obtienen las correspondientes matrices (Ecuación 22 y Ecuación 23) de (sistemas de ejes de cada sólido) que expresan la orientación con respecto a REF premultiplicando con la matriz de cambio de base en cada instante de tiempo:

$$R_{REF}^{SAT} = C_{REF}^L \cdot R_L^{SAT} = (R_L^{REF})^T \cdot R_L^{SAT}$$

Ecuación 22

$$R_{REF}^{REF} = C_{REF}^L \cdot R_L^{REF} = (R_L^{REF})^T \cdot R_L^{REF} = I_{(3 \times 3)}$$

Ecuación 23

Se ponen de manifiesto en las transformaciones anteriores las propiedades básicas de las matrices de rotación comentadas en 2.2.

Nótese que ahora, el sistema de referencia es el sistema canónico y el otro (SAT) está expresado en términos de este. Para el cómputo de las rotaciones incrementales, el punto de partida lo constituye la orientación inicial del sólido SAT expresada en términos de REF . Se tiene, empleando el subíndice 0 para denotar al instante inicial (Ecuación 24):

$$(R_{REF}^{SAT})_0 = \left((R_L^{REF})_0 \right)^T \cdot (R_L^{SAT})_0$$

Ecuación 24

El cálculo de una rotación incremental responde cualitativamente a “restar” la orientación inicial a la orientación en cada instante de tiempo posterior. Operando matricialmente ante la imposibilidad de restar directamente ángulos entre sí, se aplica en cada instante una rotación igual a la inicial representada por la siguiente matriz de transformación (Ecuación 25):

$$(T_{SAT}^{REF})_0 = (R_{SAT}^{REF})_0 = \left((R_{REF}^{SAT})_0 \right)^T = \left((R_L^{REF})_0 \cdot (R_L^{SAT})_0 \right)^T = \left((R_L^{SAT})_0 \right)^T \cdot (R_L^{REF})_0$$

Ecuación 25

La matriz de transformación anterior es, efectivamente, invariante en el tiempo al obtenerse a partir de orientaciones iniciales. Ya se puede obtener la rotación incremental relativa del sólido satélite *SAT* respecto del sólido referencia *REF* (Ecuación 26):

$$\Delta_{REF}^{SAT} = \left((T_{SAT}^{REF})_0 \right)^T \cdot R_{REF}^{SAT} = \left((R_L^{SAT})_0 \right)^T \cdot (R_L^{REF})_0 \cdot (R_L^{REF})^T \cdot R_L^{SAT}$$

Ecuación 26

Por otro lado, hay que destacar que, en el instante inicial, se tiene una rotación nula ya que se están obteniendo rotaciones respecto de dicho instante de tiempo, por lo que es lógico obtener la matriz identidad (Ecuación 27):

$$(\Delta_{REF}^{SAT})_0 = \left((R_L^{SAT})_0 \right)^T \cdot (R_L^{REF})_0 \cdot \left((R_L^{REF})_0 \right)^T \cdot (R_L^{SAT})_0 = \left((R_L^S)_0 \right)^T \cdot I_{(3 \times 3)} \cdot (R_L^{SAT})_0 = I_{(3 \times 3)}$$

Ecuación 27

Con la matriz de rotaciones incrementales Δ_{REF}^{SAT} calculada en todo instante de tiempo, es muy sencillo disponer de otra representación más interpretable como ángulos de *Euler / Tait-Bryan*. Se pueden despejar estos ángulos a partir de los elementos de la matriz, siempre definidos como aquellos que orientan el triedro *SAT* de intrínsecamente partiendo del triedro *REF* (Ecuación 28).

$$\varphi_{rel} = \text{atan2}(\Delta_{REF,32}^{SAT}, \Delta_{REF,33}^{SAT}), \quad \theta_{rel} = -\text{asin}(\Delta_{REF,31}^{SAT}), \quad \psi_{rel} = \text{atan2}(\Delta_{REF,21}^{SAT}, \Delta_{REF,11}^{SAT})$$

Ecuación 28

Los fundamentos teóricos desarrollados se basan en [18]. Para estudiar más en profundidad se recomienda consultar [19], [20], [21] y [22].

CAPÍTULO 3. Instrumentación.

Se detallan a continuación los dispositivos empleados durante el trabajo para el registro y procesamiento de los datos obtenidos por los instrumentos de medición. De este modo, se logra adquirir un entendimiento y dominio tanto de su empleo como de la extracción y manipulación de la información.

En este proyecto se utilizan los sensores “Xsens DOT v2” como aparato de medida. Unos sensores diseñados para capturar datos de orientación, aceleración y otros parámetros relevantes con una precisión aceptable. Su capacidad para generar información en tiempo real y su fácil integración con otros sistemas y softwares hacen que los sensores sean una buena elección proporcionando resultados fiables y facilitando el análisis y la interpretación de los datos recolectados como se demostrará en este trabajo aplicado a su capacidad para registrar posiciones angulares.

3.1. Características.

Los sensores Xsens DOT v2 son unos pequeños y ligeros sensores de cómoda portabilidad y de fácil y rápida configuración. Tienen una resistencia al agua IP68, que garantiza su inmersión hasta 1,5 metros durante 30 minutos, aunque la presión a la que el equipo pueda estar expuesto puede causar que los sellos de cierre terminen por ceder [23].

La transmisión de datos de estos sensores se realiza mediante una conexión Bluetooth de baja energía (BLE, del inglés *Bluetooth Low Energy*) [23], lo que hace que estos sensores sean muy prácticos y las áreas de aplicación muy amplias. Se pueden establecer diferentes combinaciones flexibles para adaptarse a diversos escenarios y casos de medición personalizados como el seguimiento de los movimientos del cuerpo humano.

El fabricante vende estos sensores en estuches de carga con capacidad para cinco unidades como se ve en la Figura 9. Cada compartimento de acoplamiento cuenta con un puerto micro-USB incorporado. Los sensores se pueden cargar conectándolos a los compartimentos correspondientes. Además, en el lateral derecho del cargador se encuentra otro puerto micro-USB que sirve para encender y cargar todos los sensores introducidos en el estuche. Para alimentar este puerto se requiere un adaptador de 5V/300mA como mínimo, aunque se recomienda utilizar un adaptador de 5V/500mA [23].



Figura 9. Sensores Xsens DOT en su estuche de carga [23].

Cada sensor tiene unas dimensiones de 30,35 x 10,85 x 36,30 mm siendo su masa tan solo de 11,2 gramos. Cuenta con una luz tipo LED en la parte superior que toma distintos colores y frecuencias de parpadeo en función del estado del sensor (véase Tabla 1). En el centro del sensor se encuentra un botón con el cual se puede encender, detener la grabación o apagar el dispositivo. Por último, en la parte inferior se encuentra un puerto micro-USB el cual se puede utilizar para encender y cargar el sensor [23].

Tabla 1. Patrones LED de Xsens DOT v2 [23].

Tipo	Color LED	Patrones de LED	Estado del sensor
Estados generales	Verde	Encendida 2 segundos	Encendiendo
	Verde	Encendida 1 segundo	Apagando
	-	Apagada	Ahorro de energía o apagado
	Amarilla	Parpadea 1 vez por segundo	Esperando emparejamiento Bluetooth
	Verde	Parpadea 1 vez cada 10 segundos	Listo para usar (Bluetooth conectado)
	Verde	Encendido durante el período de sincronización, todos los sensores parpadean (muy rápido) de forma sincronizada durante 3 segundos si la sincronización tiene éxito.	Sincronizando
	Verde	Parpadea 2 veces (muy rápido) cada 2 segundos.	Midiendo datos después de una sincronización exitosa
	Rojo	Parpadea 8 veces (ultra rápido) y una pausa corta, dura 10 segundos	Identificando sensor

Tipo	Color LED	Patrones de LED	Estado del sensor
	Verde	Parpadea 2 veces (muy rápido) y una pausa larga	Arranque - estado normal. Este estado del LED aparecerá brevemente después de una actualización exitosa del firmware.
Estado de carga	Amarillo	Aparece y desaparece en un ciclo de 2 segundos	Cargando (batería $\leq 20\%$)
	Verde	Aparece y desaparece en un ciclo de 2 segundos	Cargando ($20\% < \text{batería} \leq 90\%$)
	Verde	Encendida	Cargado (batería $> 90\%$)
Estados de error	Rojo	Encendida	Arranque - estado de error.
	Rojo	Parpadea 8 veces por segundo	Sobrecalentamiento durante la carga de la unidad del microcontrolador (MCU) o la batería.

3.2. Funcionamiento de los sensores Xsens DOT.

El sensor “Xsens DOT v2” es una unidad de medición inercial (IMU) que mide el movimiento y un ejemplo de un sistema Micro-Electro-Mecánico (MEMS, por sus siglas en inglés). Utiliza un giroscopio de tres ejes para proporcionar una velocidad en 3D, un acelerómetro de tres ejes para proporcionar una aceleración en 3D y un magnetómetro de tres ejes para proporcionar un campo magnético terrestre en 3D. Cada uno de estos componentes individuales recopila sus propios datos, pero si se combinan se proporciona una orientación 3D y una aceleración libre [23].

Para la aplicación objeto de este trabajo los sensores inerciales son dispositivos electrónicos de medida que permiten determinar la orientación de un cuerpo, solidario a este, a partir de las fuerzas inerciales que experimenta dicho cuerpo. El principio de funcionamiento de estos sensores se basa en medir las fuerzas de aceleración y las velocidades angulares que se ejercen independientemente sobre pequeñas masas localizadas en su interior, lo que procesado mediante algoritmos internos permite obtener los ángulos de Euler con suficiente precisión.

La tecnología inercial está fundamentada en las dos primeras leyes de Newton. La primera establece que el movimiento de un cuerpo es uniforme y rectilíneo a no ser que exista una fuerza externa que actúe sobre él. La

segunda define que esta fuerza ejercida sobre esta masa producirá en la misma una aceleración proporcional a ella [24].

El sensor posee un sistema de coordenadas cartesianas directo y fijo a su cuerpo. Se muestra en la Figura 10 el sistema de coordenadas del sensor (S) utilizando las letras “x”, “y” y “z”. Por defecto, el sistema de coordenadas de referencia local fijo a la Tierra (L) también es un sistema de coordenadas directo. Por ello, el eje “x” es positivo cuando apunta hacia el Este (E), el eje “y” es positivo cuando apunta hacia el norte (N) y, por último, el eje “z” es positivo cuando apunta hacia arriba (U) [23].



Figura 10. Sistema de coordenadas del sensor Xsens DOT [23].

El sistema de coordenadas que usa el sensor se conoce como Este-Norte-Arriba (ENU del inglés “East-North-Up”) y es el estándar en navegación para aplicaciones geodésicas y aeroespaciales. La orientación calculada por el sensor es la orientación del sistema de coordenadas del sensor (S) con respecto al sistema de coordenadas terrestres local (L).

Los ángulos de Euler como se ha explicado en el apartado 2.1 describen la rotación de un cuerpo rígido a través de tres giros sucesivos en una secuencia específica. Estos sensores utilizan los ángulos de Euler denominados balanceo, cabeceo y guiñada conocidos como ángulos Cardan o Tait-Bryan. De forma predeterminada, la salida de la orientación está en el marco Este-Norte-Arriba (ENU), lo que significa que el balanceo, el cabeceo y la guiñada serán de 0 grados cuando el eje “x” del sensor esté alineado con el Este, el eje “y” con el Norte y el eje “z” hacia arriba.

La secuencia de rotaciones para los ángulos de Euler sigue la convención aeroespacial (secuencia Z-Y'-X'') para la rotación desde el sistema de coordenadas de referencia global (L) al sistema de coordenadas del sensor (S).

El primer ángulo de Euler medido por el sensor se denomina guiñada (“yaw” en inglés), ψ , también conocido como rumbo, giro horizontal o azimuth. Se define como la rotación alrededor del eje ZL perteneciente al sistema de referencia global (L) y toma valores en el rango de $[-180^\circ$ a $180^\circ]$. El segundo

ángulo de Euler que mide el sensor se denomina cabeceo (“*pitch*” en inglés), θ , también conocido como elevación o inclinación. Se define como la rotación alrededor del eje YL' , que es el eje Y actual después de la primera rotación y toma valores en el rango $[-90^\circ$ a $90^\circ]$. Por último, se obtiene el ángulo denominado alabeo o balanceo (“*roll*” en inglés), φ , definido como la rotación alrededor de XL'' , que es el eje X actual después de la segunda rotación y toma valores en el rango de $[-180^\circ$ a $180^\circ]$ [25]. Todos estos elementos se presentan de manera ilustrativa en la Figura 11 que se muestra a continuación. El sistema de referencia global (L) se representa en un tono verde y este es un sistema de referencia fijo mientras que el sistema de referencia del sensor está representado en tono morado y es un sistema de referencia móvil.

Posteriormente a la hora de interpretar los datos de salida de los sensores, es muy importante tener en cuenta los rangos en los que se definen los ángulos, ya que cuando se supera el máximo o el mínimo, el ángulo cambiará de signo y esto podrá llevar a errores de interpretación de las gráficas dibujadas con las medidas tomadas.

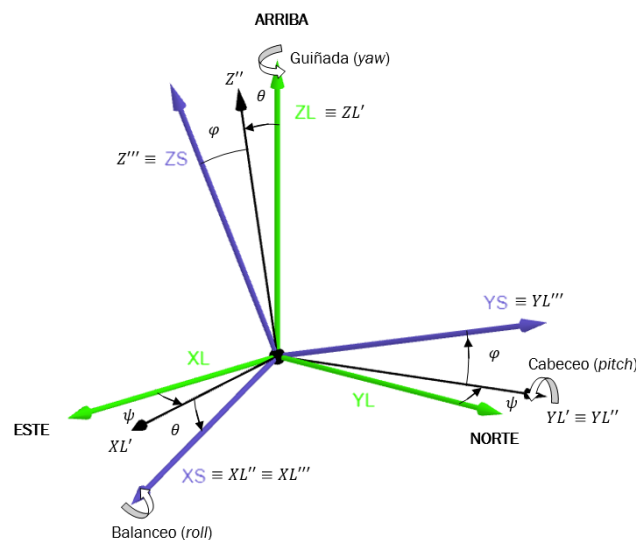


Figura 11. Representación de los sistemas de referencia fijo y móvil.

En la Figura 11, se puede observar también que los ejes del sistema de referencial global, el cual es fijo, apuntan a las direcciones que toma como referencia los sensores a la hora de obtener las medidas “Este-Norte-Arriba”.

CAPÍTULO 4. Metodología y calibración.

El propósito de este apartado consiste en verificar la correcta calibración de los sensores, y, en caso de que no estén calibrados, proceder a su calibración. Con dicho propósito, se llevarán a cabo diversas mediciones en un entorno controlado, utilizando ángulos de referencia conocidos. Posteriormente, mediante el empleo del software Microsoft Excel, se generarán gráficas que permitirán visualizar los ángulos capturados por los sensores Xsens DOT. La interpretación adecuada de estas gráficas permitirá apreciar dichos ángulos registrados con precisión.

Para la toma de datos se ha seguido el procedimiento detallado en el anexo 1 adjunto a este documento. Una vez guardados los archivos con los datos en formato “.csv”, se procede a abrirlos utilizando el programa de Microsoft Excel. Con el fin de manipular los datos y generar las gráficas necesarias se guardan como archivo “.xlsx” mediante la opción de “Guardar como...” de Microsoft Excel. Es importante destacar que se debe prestar especial atención a la configuración del separador decimal y el separador de miles, ya que los datos obtenidos de los sensores emplean el punto como separador decimal. Si en Microsoft Excel se ha establecido el punto como separador de miles, el programa interpretará incorrectamente las medidas y los resultados obtenidos carecerán de validez. Por lo que se establece el punto como separador decimal para no tener que editar los datos antes de abrirlos con el programa.

A continuación, se proporciona una explicación detallada acerca del procedimiento a seguir para el tratamiento de los datos, enfocándose en el análisis de la información suministrada por los sensores. Es fundamental tener precaución al trabajar con los ángulos de Euler y no con otras alternativas como cuaternios, ya que su comprensión adecuada resulta de vital importancia. Por este motivo, se han descrito con más detalles en el capítulo 2 del presente proyecto.

4.1. Toma de datos.

Una vez que los datos se han transferido al equipo informático designado para su procesamiento, se procede a abrirlos con el programa Microsoft Excel, lo cual da lugar a la visualización de una interfaz con una serie de columnas como se muestra en la Figura 12.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P
1	DeviceTag:	B4														
2	FirmwareVersion:	2.1.0														
3	AppVersion:	2023.0.0														
4	StartTime:	2023-06-13 11:59:47.000 +0200														
5	AO Movella Technologies B. V. 2005-2023															
6																
7	PacketCounter	SampleTimeFine	Euler_X	Euler_Y	Euler_Z											
8	0	246620480	0.74395764	2.14480519	-39.0607986											
9	1	246687148	0.74218267	2.14211011	-39.0615654											
10	2	246753816	0.74252909	2.14272261	-39.0613976											
11	3	246820484	0.74330886	2.14592433	-39.0593872											
12	4	246887152	0.74389672	2.14682627	-39.0578232											
13	5	246953820	0.74450547	2.15074372	-39.0562668											
14	6	247020488	0.74295819	2.15179539	-39.0562325											
15	7	247087156	0.74330401	2.15217495	-39.0565491											
16	8	247153824	0.74368221	2.15107894	-39.0566483											
17	9	247220492	0.74486041	2.15199232	-39.0568237											
18	10	247287160	0.74726206	2.15684581	-39.06007											
19	11	247353828	0.75084054	2.16172624	-39.0612793											
20	12	247420496	0.75169587	2.16243958	-39.0609283											
21	13	247487164	0.75295764	2.16550136	-39.0592613											
22	14	247553832	0.75591105	2.16780186	-39.0610924											
23	15	247620500	0.75840276	2.1687243	-39.0616913											
24	16	247687168	0.75818574	2.16951966	-39.0625648											
25	17	247753836	0.75839961	2.17010689	-39.0640297											
26	18	247820504	0.75916058	2.16913581	-39.0651627											

Figura 12. Interfaz de Microsoft Excel

Dentro de esta interfaz (tal y como se observa en la Figura 12) se aprecia distinta información como el identificador del sensor, la versión del firmware empleado, la versión de la aplicación utilizada, así como la fecha y la hora en la cual se llevó a cabo la respectiva medición.

La primera columna, denominada “*Packet Counter*” es el contador de paquetes, es decir, comienza a contar con cada nueva medición y se incrementa con cada mensaje de datos generado. Este valor se inicia en 0xFFFFFFFF, por lo que puede contar 4,294,967,295 muestras antes de reiniciarse [23].

La segunda columna que se visualiza en la Figura 12 corresponde a la denominada “*Sample Time Fine*” que quiere decir “muestra de tiempo precisa”. Esta columna contiene la marca de tiempo de una salida expresada en ticks de reloj local del dispositivo, con una frecuencia de 1 MHz. Las unidades de este tiempo están en microsegundos. Por ejemplo, si la frecuencia de salida de datos es de 60 Hz, el intervalo de tiempo entre dos valores de la columna de “*Sample Time Fine*” es de 16667 μ s. Esta muestra de tiempo comienza cuando se enciende el sensor y se reinicia en 0xFFFFFFFF que equivale al número 4,294,967,295. Esto ocurre aproximadamente después de 1.2 horas después de encender el sensor. “*Sample Time Fine*” se volverá a iniciar desde 0 si el sensor se reinicia [23].

Mediante la utilización de la segunda columna denominada “*Sample Time Fine*”, es posible calcular el tiempo en el que se recoge cada muestra. Este cálculo resulta necesario para poder representar gráficamente el ángulo rotado en función del tiempo. Para ello, se realiza una resta entre dos valores consecutivos de la mencionada columna, lo cual permite obtener el intervalo de tiempo entre dichas muestras.

Todos los datos registrados en este apartado se realizan con una frecuencia de 15 Hz por lo que la diferencia entre dos valores consecutivos es de 66668 μ s. Posteriormente, para calcular la frecuencia en hercios (Hz), se divide 1 entre el intervalo de tiempo previamente multiplicado por 10^6 ya que inicialmente el tiempo se encuentra expresado en microsegundos y para obtener la frecuencia en hercios (Hz) es necesario convertirlo a segundos. Por último, para obtener el periodo, se divide 1 entre la frecuencia obtenida anteriormente.

Con el fin de determinar el tiempo en el que se ha obtenido cada muestra, se añade una nueva columna en la que se calcula la suma del valor anterior más el periodo de muestreo calculado. En este caso, dicho periodo es de 0.066668 segundos. Se establece el valor inicial de la primera muestra en 0. Esta información se puede apreciar en la Figura 13, donde la columna denominada "Time (s)" indica el tiempo en segundos en el que se ha recogido la muestra. Al realizar este cálculo se puede comprobar que la frecuencia seleccionada es la correcta.

PacketCounter	SampleTimeFine	Euler_X	Euler_Y	Euler_Z	Time (s)	Intervalo de tiempo entre dos muestras consecutivas (μ s)
0	246620480	0.74395764	2.14480519	-39.0607986	0	66668
1	246687148	0.74218267	2.14211011	-39.0615654	0.066668	Frecuencia (Hz)
2	246753816	0.74252909	2.14272261	-39.0613976	0.133336	14.9997
3	246820484	0.7433086	2.14592433	-39.0593872	0.200004	Periodo (s)
4	246887152	0.74389672	2.14682627	-39.0578232	0.266672	0.066668
5	246953820	0.74450547	2.15074372	-39.0562668	0.33334	
6	247020488	0.74295819	2.15179539	-39.0562325	0.400008	
7	247087156	0.74330401	2.15217495	-39.0565491	0.466676	
8	247153824	0.74368221	2.15107894	-39.0566483	0.533344	
9	247220492	0.74486041	2.15199232	-39.0568237	0.600012	
10	247287160	0.74726206	2.15684581	-39.06007	0.66668	
11	247353828	0.75084054	2.16172624	-39.0612793	0.733348	
12	247420496	0.75169587	2.16243958	-39.0609283	0.800016	
13	247487164	0.75295764	2.16550136	-39.0592613	0.866684	
14	247553832	0.75591105	2.16780186	-39.0610924	0.933352	
15	247620500	0.75840276	2.1687243	-39.0616913	1.00002	

Figura 13. Cálculo del tiempo (s)

4.2. Verificación de la calibración de los tres ángulos de Euler.

En esta sección se procederá a realizar la comprobación de la calibración de los tres ángulos de Euler. Para ello, se colocan los sensores juntos en una caja con los lados perpendiculares como se muestra en la Figura 14, con el fin de que los sensores se muevan en bloque. Ambos sensores se ubican en la misma posición con el objetivo de contrastar que ambos estén midiendo los mismos ángulos de Euler.



Figura 14. Posición de los sensores en la caja.

4.2.1. Calibración de la rotación alrededor del eje X.

Primero se lleva a cabo la calibración de la rotación alrededor del eje X, para ello, se realiza una serie de cuatro giros consecutivos de 90 grados. Durante este proceso, se garantiza que los sensores alcancen una rotación completa de 360 grados. Es importante asegurarse de que cada giro se efectúe con precisión y que se cumpla la totalidad de la vuelta. Este procedimiento permite obtener los parámetros necesarios para la correcta interpretación y registro de las mediciones relacionadas con la rotación alrededor del eje X.

En la sección correspondiente, detallada en el capítulo 3 de este documento, se explica que los ángulos medidos por estos sensores corresponden a los ángulos de Euler del sistema de referencia del sensor (S) en relación con el sistema de referencia de la tierra (L), el cual se basa en el sistema Este-Norte-Arriba. Esto implica que cuando los ejes del sensor estén alineados con el norte y el este de la Tierra, tanto el ángulo de rotación alrededor del eje X'' como el ángulo de rotación alrededor del eje Y' serán de 0 grados.

Con el propósito de asegurar la correcta alineación de los sensores, se emplea una brújula para orientarlos de manera que el eje Y se encuentre alineado con la dirección norte y el eje X se encuentre alineado con la dirección este de la superficie terrestre. Para lograr esto, los sensores son colocados en una posición horizontal sobre una mesa, la cual se considera una superficie plana. De esta manera, el eje Z apunta verticalmente hacia arriba. Se hace coincidir el sistema de referencia del sensor con el sistema de referencia global.

Una vez que los sensores han sido posicionados según se ha descrito previamente, se lleva a cabo la medición realizando un giro lento de los sensores hasta llegar a dar una vuelta completa alrededor del eje X. Esta rotación se va a realizar en sentido positivo del eje X del sistema de referencia del sensor, el cual se puede ver en la Figura 10. Si se aplica la regla de la mano derecha, se rota en sentido antihorario si se mira de frente este eje.

Debido a que se ha realizado un giro alrededor de un único eje, únicamente se registrarán variaciones en un solo ángulo, en tanto que los demás ángulos se mantendrán constantes durante este proceso de medición. Esto se demuestra en la Figura 15 donde se ha representado la rotación alrededor del eje Y en grados en función del tiempo en segundos y se observa que este valor se mantiene constante aproximadamente. Las pequeñas variaciones que presenta se deben a la precisión de los movimientos manuales efectuados. No se ha representado, pero ocurre lo mismo para la rotación alrededor del eje Z.

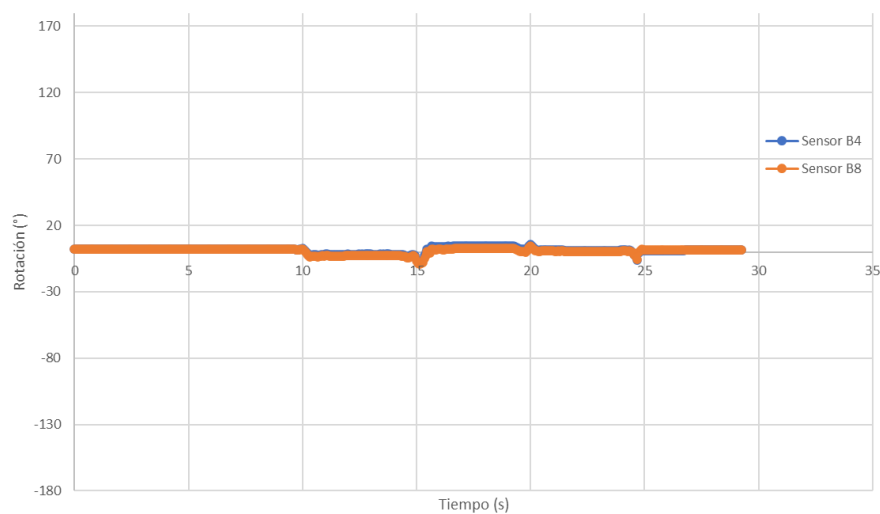


Figura 15. Valor constante de la rotación alrededor del eje Y.

A continuación, se presenta el resultado obtenido, para ello, se dibuja una gráfica en la que se representa la rotación en grados en función del tiempo en segundos. Como se observa en la Figura 16, durante los 10 primeros segundos, los sensores se han mantenido en reposo, alineados con los ejes norte y este de la Tierra. En dicha representación gráfica, se observa que ambos sensores registran un valor de 0 durante dicho periodo de tiempo.

Posteriormente, se ha realizado una rotación de 90 grados, la cual también se aprecia en la Figura 16, entre los 10 y 15 segundos. Durante este intervalo, se puede observar que tanto la línea de color naranja como la línea de color azul, se aproximan a la magnitud de 90 situada en el eje vertical de la gráfica. Seguidamente, se lleva a cabo la segunda rotación. Durante los segundos del 15 al 20, se observa que se alcanza la magnitud de 180. Debido a que los sensores alcanzan su límite de rango, hay una serie de medidas que se desplazan hacia valores negativos del sensor representado en color azul.

Después se realiza otra rotación de 90 grados, sin embargo, en este caso el sensor ha alcanzado su límite máximo del rango, lo que ocasiona que para

registrar esta medida utilice valores numéricos negativos. Por último, se lleva a cabo una cuarta rotación de 90 grados, completando así una vuelta entera y permitiendo que el sensor regrese a su posición inicial. Este último proceso se puede apreciar en el intervalo de tiempo comprendido entre los segundos 25 y 30. En consecuencia, la representación gráfica alcanza finalmente el valor de 0 grados. Lo cual permite concluir que ambos sensores están correctamente calibrados para las rotaciones alrededor del eje X.

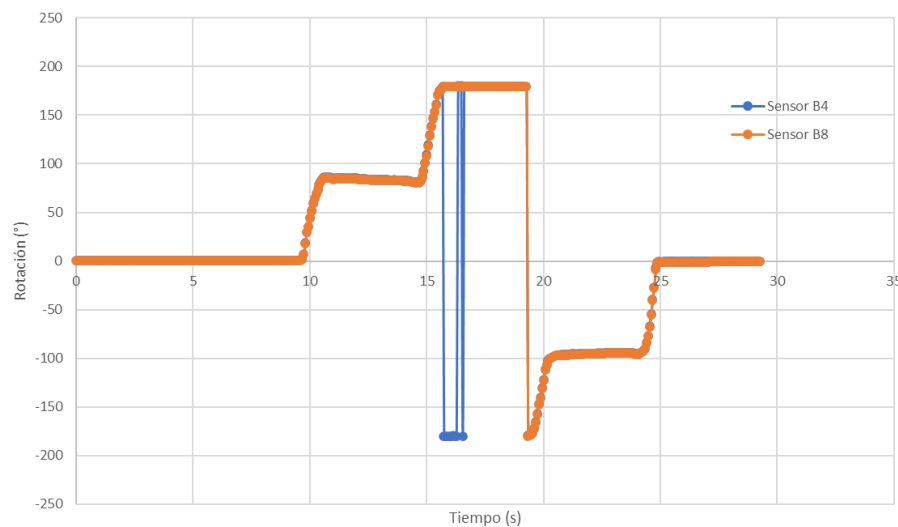


Figura 16. Rotación alrededor del eje X.

En la gráfica representada en la Figura 16 se puede observar la forma mediante la cual los sensores registran las medidas, dado que los ángulos admiten múltiples interpretaciones. Concretamente, se ha efectuado una rotación completa de 360 grados, sin embargo, en las rotaciones alrededor de este eje, los sensores únicamente registran medidas dentro del intervalo de $[-180, 180]$. Esta limitación ocasiona que algunas medidas se registran empleando valores numéricos negativos. En este contexto, indicar que se ha efectuado una rotación con un ángulo de -90 grados es lo mismo que afirmar que se ha girado un ángulo de 270 grados a partir de la misma posición inicial tomada como referencia.

4.2.2. Calibración de la rotación alrededor del eje Y.

Con el fin de comprobar la calibración de la rotación en torno al eje Y, se sigue un procedimiento de forma similar a la calibración alrededor del eje X detallado en el apartado anterior. En esta ocasión, se va a llevar a cabo una rotación completa alrededor del eje Y del sistema de referencia de los sensores. Esta rotación se realiza en sentido positivo del eje Y según la regla

de la mano derecha, es decir, en sentido antihorario si se mira de frente este eje.

Nuevamente, se procede a disponer los sensores de manera similar a la descrita en la sección previa, asegurando que el eje X se alinee con la dirección este y el eje Y se alinee con la dirección norte de la superficie terrestre. Para lograr esto, se requiere colocar la caja que contiene los sensores de forma que se encuentre horizontalmente sobre la mesa, garantizando que los sensores estén sobre una superficie plana y que el eje Z apunte hacia arriba.

El resultado obtenido se refleja en la gráfica de la Figura 17. De manera similar al escenario anterior, durante los 10 primeros segundos los sensores se mantienen en reposo, por lo que ambos sensores registran un valor de 0. Esto verifica que los sensores están adecuadamente calibrados ya que cuando se alinea su sistema de referencia (S) con el sistema de referencia global (L), el ángulo de rotación es de 0 grados.

Posteriormente, en el intervalo de tiempo comprendido entre los segundos 10 y 20, se registra la primera rotación de 90 grados, tal como se puede observar en la gráfica mencionada, donde ambas líneas alcanzan el valor de -90 situado en el eje vertical. Se realiza la segunda rotación y se observa en dicha gráfica que ambos sensores alcanzan el valor de 0. A diferencia del caso anterior, donde alcanzaban el valor de 180 en este caso regresan nuevamente a 0. Esto es debido a que cada eje toma valores en un rango distinto, en este caso se registran los valores dentro del intervalo de $[-90^\circ, 90^\circ]$.

A continuación, se realiza la tercera rotación girando nuevamente 90 grados, lo cual se puede apreciar en el intervalo de tiempo comprendido entre los 30 y 40 segundos. En este intervalo se observa que ambos sensores alcanzan los 90 grados. Por último, se lleva a cabo la cuarta rotación, girando el sensor otros 90 grados, devolviéndolo así a su posición original de tal forma que se completa una rotación total de 360° . Esto se puede observar en dicha gráfica a partir del segundo 40 en la cual se ve que ambos sensores regresan al valor de 0 grados.

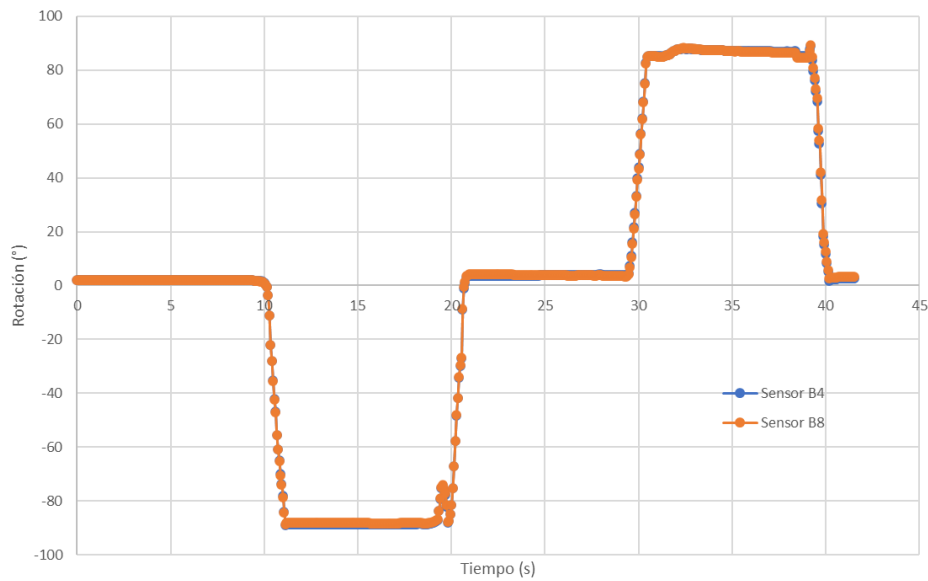


Figura 17. Rotación alrededor del eje Y.

4.2.3. Calibración de la rotación alrededor del eje Z.

Para concluir el proceso de calibración, se llevan a cabo las cuatro rotaciones sucesivas de 90 grados, pero en esta ocasión se ejecutan alrededor del eje Z, el cual aún queda pendiente de verificación.

Se colocan los sensores en la caja como se ha explicado anteriormente, verificando con ayuda de una brújula que el eje X se encuentre alineado con el este y el eje Y se encuentre alineado con el norte de la superficie terrestre. Se sitúan sobre una superficie plana de tal forma que el eje Z apunte hacia arriba en la dirección vertical.

Mediante el análisis de los datos recogidos por los sensores, se genera la gráfica representada en la Figura 18. A simple vista, se puede percibir que las rotaciones alrededor del eje Z no están correctamente calibradas, por lo que habrá que corregirlas.

Con el fin de verificar la calibración, también se inició el proceso con los sensores en reposo sobre una superficie plana. En esta situación, ambos sensores deberían registrar un ángulo de 0 grados, es decir, tanto la curva azul como la curva naranja deberían de coincidir en el valor 0. Sin embargo, cada curva se encuentra en un valor distinto como muestra la Figura 18 en los primeros segundos. Esto sugiere que, en este eje en particular, cada sensor presenta un desfase asignado y se sabe que son diferentes porque los sensores se encontraban situados en la misma posición y en la misma caja cuando se realizaron las mediciones y aun así no comienzan en el mismo valor. Se comprueba en dicha gráfica, que el sensor B4, cuya curva es de color azul, presenta un desfase de -35 grados aproximadamente mientras

que el sensor B8, curva de color naranja presenta un desfase de 70 grados aproximadamente.

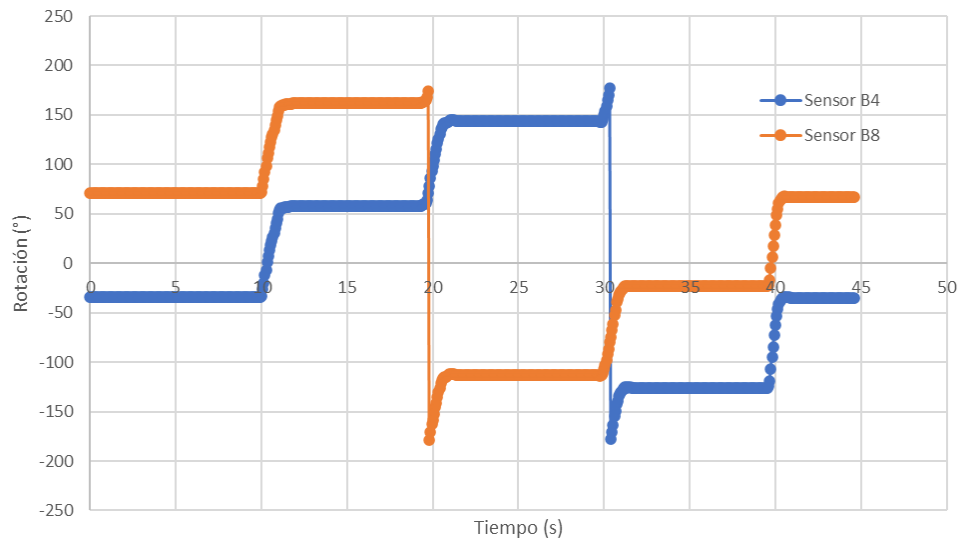


Figura 18. Rotación alrededor del eje Z.

A continuación, se procede a analizar las rotaciones registradas por los sensores. Primero se giró la caja con ambos sensores 90 grados en sentido positivo del eje Z aplicando la regla de la mano derecha, es decir, en sentido antihorario si se mira de frente el eje Z.

Esta rotación es registrada por ambos sensores, se comprueba en la Figura 18 que tanto el sensor B4 como el sensor B8 suman a su magnitud inicial el ángulo de 90 grados. Por lo que el sensor B4 que inicialmente se encontraba en un valor de -35 grados, alcanza un valor de 55 grados y el sensor B8 que inicialmente se encontraba en 70 grados, alcanza un valor de 160 grados.

Se lleva a cabo la segunda rotación de 90 grados, dicha rotación se aprecia en la gráfica de la Figura 18 en el intervalo de tiempo de los 20 a los 30 segundos. La gráfica del sensor B4 representada en color azul registra un valor de 145 grados, ya que se ha añadido los 90 grados al valor en la que se encontraba en la rotación anterior de 55 grados. En cuanto al sensor B8, representado en color naranja, también registra esta rotación, pero con una particularidad, ya que, al llevar a cabo esta rotación, el sensor alcanza valores fuera del rango. Para este ángulo, los valores aceptados se encuentran en el intervalo entre $[-180, 180]$. Por lo tanto, cuando se supera este rango, el ángulo registrado cambia de signo. Esto es lo que ocurre en el caso de la gráfica de color naranja. Dicha curva se encontraba inicialmente en el valor de 160 grados. Si se suman 90 grados, se obtendría un valor de 250 grados, pero este valor se encuentra fuera del rango permitido. Por lo que primero se suman 20 grados hasta llegar al límite superior del rango de 180 y

posteriormente se suman los grados restantes, es decir, 70 grados al límite inferior del rango que, puesto que es negativo, cambia de signo. Finalmente, si se suman al límite inferior del rango de -180 grados los 70 grados restantes, se alcanza un valor aproximado de -110 grados.

En la tercera rotación de 90 grados, la curva azul registra un valor de -125 grados. En esta rotación la curva azul supera el límite superior del rango, ya que, al sumar 90 grados al valor en el que se encontraba anteriormente de 145, se obtendría un ángulo de 235 grados que no pueden registrar los sensores. Como se ha explicado anteriormente, primero se suman los grados necesarios para alcanzar el límite superior y una vez alcanzado dicho límite, se suman los grados restantes al límite inferior, obteniéndose un ángulo de signo negativo. En este caso específico, se añaden primero 35 grados hasta llega a 180 grados, y posteriormente se suman 55 grados a -180 grados, obteniendo un valor final de -125 grados. En el caso de la curva naranja, simplemente se suman 90 grados a -110 grados, resultando en un valor de -20 grados.

Por último, se lleva a cabo la cuarta rotación de 90 grados y se comprueba que la curva de ambos sensores alcanza el valor en el que se encontraba inicialmente. Ya que los sensores completan una vuelta de 360 grados volviendo a su posición inicial.

En las rotaciones alrededor de este eje se puede apreciar correctamente el incremento relativo de cada ángulo, es decir, las variaciones angulares. Sin embargo, para obtener mejores resultados hay que calibrar los sensores con un parámetro que corrija cada magnitud.

Cuando el sistema de referencia del sensor se encuentra alineado con el sistema de referencia global conocido como “Este-Norte-Arriba”, todos los sensores deberían de registrar un valor de 0 grados. Las rotaciones alrededor de los ejes X e Y se ha demostrado previamente en este documento que cumplen con esta condición, lo que indican que están correctamente calibradas. No obstante, en el caso de las rotaciones alrededor del eje Z no se puede afirmar lo mismo. Esto es debido a que los sensores no registran un ángulo de 0 grados cuando deberían de hacerlo, lo que resulta en un desfase en todas las magnitudes recogidas por ese sensor. Este desfase puede ser corregido mediante la adición de un parámetro denominado “offset”, el cual se debe sumarse a todas las medidas. Cabe de destacar que este “offset” no es el mismo para todos los sensores.

Para determinar este parámetro, se ha realizado el cálculo del promedio de los valores registrados en el periodo en el cual el sensor debería haber marcado 0 grados, es decir, se ha calculado el promedio de los valores registrados en los primeros 10 segundos. Una vez obtenido este promedio, se

resta este parámetro a todas las medidas obtenidas en el registro de los datos. De esta manera, las mediciones inicialmente desfasadas adquirirán el valor de los ángulos correspondientes. Es necesario llevar a cabo este proceso de forma individual para cada sensor, ya que el desfase inicial varía entre ellos. En la Tabla 2 se observan los diez primeros valores recogidos por el sensor en la columna llamada “Euler Z” y en la última columna se observan los valores de los ángulos corregidos tras el proceso de calibración llamada “Euler Z calibrado”.

Tabla 2. Calibración de los valores de los ángulos de rotación alrededor del eje Z.

PacketCounter	SampleTimeFine	Euler_Z	Time (s)	Euler Z calibrado
0	538023372	-34.1021461	0.000000	0.018886007
1	538090040	-34.1003532	0.066668	0.020678914
2	538156708	-34.1019897	0.133336	0.019042409
3	538223376	-34.1059074	0.200004	0.015124715
4	538290044	-34.1083412	0.266672	0.012690938
5	538356712	-34.1054153	0.333340	0.015616811
6	538423380	-34.1052437	0.400008	0.015788472
7	538490048	-34.1060143	0.466676	0.015017904
8	538556716	-34.1059036	0.533344	0.015128530
9	538623384	-34.1074257	0.600012	0.013606466
10	538690052	-34.1093941	0.666680	0.011638082

Una vez realizado este procedimiento, se obtiene la gráfica de la Figura 19, en la cual se puede apreciar que ambas curvas comienzan en 0 grados, posteriormente alcanzan el valor de 90. A continuación, alcanzan el valor de 180, al ser el límite del rango, este puede ser registrado tanto positivo, como lo hace la curva azul o negativo, como lo hace la curva naranja. Se registra una rotación adicional de 90 grados y, finalmente, las mediciones vuelven a su posición original tras haber completado una vuelta completa de 360 grados.

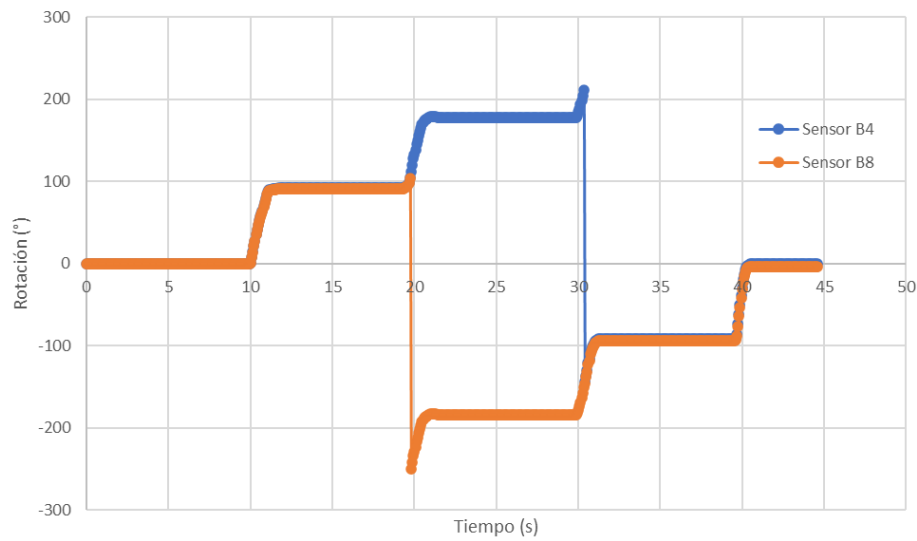


Figura 19. Rotación alrededor del eje Z calibrada.

Una vez efectuada la calibración, se procede a apagar los sensores y posteriormente se vuelven a encender con el fin de reiniciarlos. El objetivo de esto es comprobar si dicha calibración es válida en todo momento para un sensor en particular o si es necesario repetirla cada vez que se encienden los sensores.

Tras haber llevado a cabo el reinicio de ambos sensores, se procede a ubicarlos en la misma caja mencionada anteriormente, manteniendo la misma orientación en la cual el sistema de referencia del sensor se alinea con el sistema de referencia global “Este-Norte-Arriba”. Posteriormente se realizan las mismas cuatro rotaciones que en el caso anterior. Al observar la representación gráfica de la Figura 20, se evidencia que la calibración previamente realizada no resulta válida en este escenario. En esta ocasión, se puede apreciar que el sensor B4 comienza registrando el primer valor en -26 grados, mientras que anteriormente comenzaba en -35 grados, y el sensor B8, que antes comenzaba en 70 grados, ahora comienza en el valor de -46 grados. En esta situación ambos sensores también deberían de marcar 0 grados dado que se encuentran alineados con el sistema de referencia global.

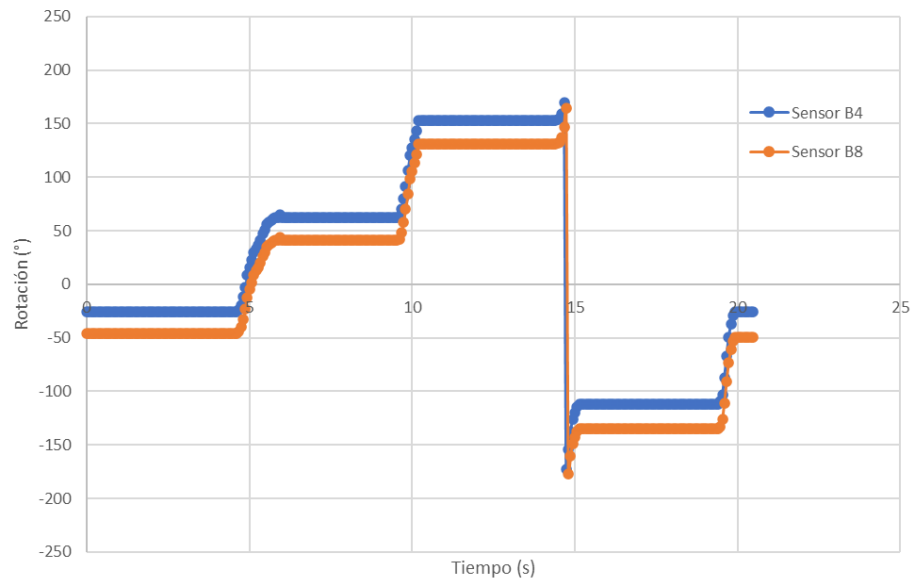


Figura 20. Rotación alrededor del eje Z tras el reinicio de los sensores.

Para obtener los valores de las rotaciones alrededor del eje Z adecuadas, se procede a realizar una calibración de la misma forma en la que se realizó antes de reiniciar los sensores, y se obtiene la gráfica que se muestra en la Figura 21.

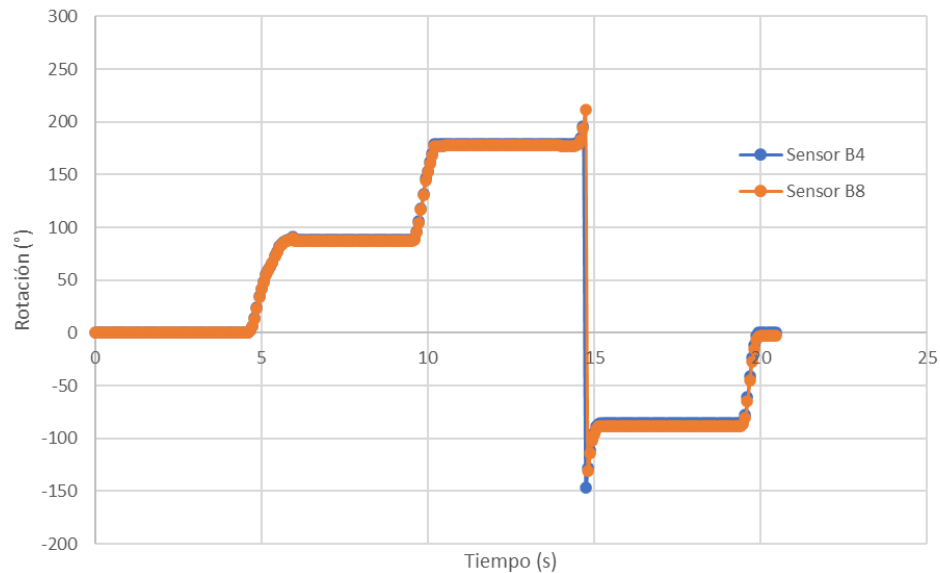


Figura 21. Rotación alrededor del eje Z tras el reinicio de los sensores calibrado.

En la representación gráfica proporcionada por la Figura 21 se aprecia que las curvas de ambos sensores se han sido calibradas de manera acertada, dado que adquieren los valores apropiados al inicio, es decir, 0 grados, cuando el sensor se encuentra en reposo y su sistema de referencia se encuentra alineado con el sistema de referencia global. Además, al realizar

las mismas cuatro rotaciones que en los otros casos, se observa que la curva pasa por 90 grados, 180 grados, -90 grados y, finalmente, retorna a su posición inicial de 0 grados.

Se ha hecho otra comprobación para verificar que las rotaciones alrededor del eje Z no se encuentran calibradas. En este caso se ha utilizado el modo de grabación “*Real-time Streaming (Live mode)*” explicado en el anexo 1.

Este modo permite ver los parámetros registrados por los sensores en tiempo real por lo que permite observar el ángulo que registra cada sensor en cada instante de tiempo. Por lo que, analizando el ángulo girado alrededor del eje Z, se ajustó este parámetro en tres sensores girándolos con la mano y haciendo que el resultado de esta rotación fuera de 0 grados.

El resultado obtenido fue que la orientación de cada sensor era distinta como se observa en la Figura 22 cuando en cada sensor el ángulo rotado respecto del eje Z era 0 grados, por lo que se verifica que es necesario calibrar las rotaciones en torno a este eje. Todos los sensores se encontraban en una superficie plana.



Figura 22. Ajuste de la rotación alrededor del eje Z a 0 grados.

Dentro de este modo de “*Real-time Streaming (Live mode)*” se ha verificado la existencia de una funcionalidad que permite la calibración automática simultánea de todos los sensores, evitando la necesidad de realizar dicha calibración manualmente. Durante la fase de toma de medidas, se utilizará esta opción de manera preferente, ya que ofrece una considerable mejora en la velocidad del proceso. Para realizar esta calibración de manera automática es necesario pulsar sobre un botón que se encuentra arriba a la derecha de la pantalla de la aplicación con tres puntos y seguidamente pulsar en “*Reset Heading*” [23]. Una vez realizado esto, todos los ángulos de Euler se alinearán a cero grados.

4.3. Validación con giros controlados.

Una vez que se ha establecido la calibración de los sensores para obtener los parámetros adecuados y poder analizar e interpretar las mediciones, se procederá a realizar una serie de medidas en un entorno controlado. A diferencia del caso anterior, en esta ocasión se moverán los sensores de forma individual, en lugar de estar los dos agrupados en una misma caja.

Con el fin de validar la precisión del procedimiento de análisis de los datos, se realizarán mediciones utilizando valores conocidos. Es decir, se moverá un sensor un ángulo conocido, de tal forma que se pueda comprobar que los resultados obtenidos son correctos. Una vez que se haya confirmado la veracidad de estos resultados y se haya demostrado su independencia con respecto a la posición inicial de los sistemas de referencia, se procederá en el siguiente capítulo al procesamiento de datos sin contar previamente con información acerca del ángulo en cuestión.

A continuación, se detalla el primer experimento llevado a cabo con el objetivo de verificar la precisión del cálculo del ángulo procesado. Para la recolección de los datos, se sigue el procedimiento detallado en el anexo 1, utilizando la aplicación de Xsens DOT descargada en un dispositivo electrónico y los sensores de medida inercial. Los datos registrados se exportan al ordenador para su posterior análisis.

En primer lugar, se requiere llevar a cabo la calibración de las rotaciones alrededor del eje Z, siguiendo el procedimiento detallado anteriormente en el presente capítulo. Este proceso implica iniciar la grabación de una serie de medidas con el sensor colocado sobre una superficie plana que en este caso es una mesa del laboratorio y alinear el sensor con el sistema de referencia global “Este-Norte-Arriba”.

Bajo estas condiciones, si no se produce movimiento alguno del sensor, el ángulo resultante de la rotación alrededor de cualquier eje será de 0 grados. Esta etapa de calibración es esencial para establecer una base precisa y confiable, asegurando que los datos recopilados posteriormente reflejen de manera correcta las rotaciones realizadas.

En la Figura 23 se puede ver la calibración del sensor. Como se aprecia en esta gráfica, las rotaciones alrededor del eje X y del eje Y se encuentran calibradas ya que son las curvas representadas en color azul y naranja. Mientras que la rotación alrededor del eje Z no se encuentra calibrada ya que está representada en color gris y no registra 0 grados cuando el sistema se encuentra alineado con el sistema de referencia global. Posteriormente tras el proceso de calibración se obtiene la curva amarilla que también marca 0 grados.

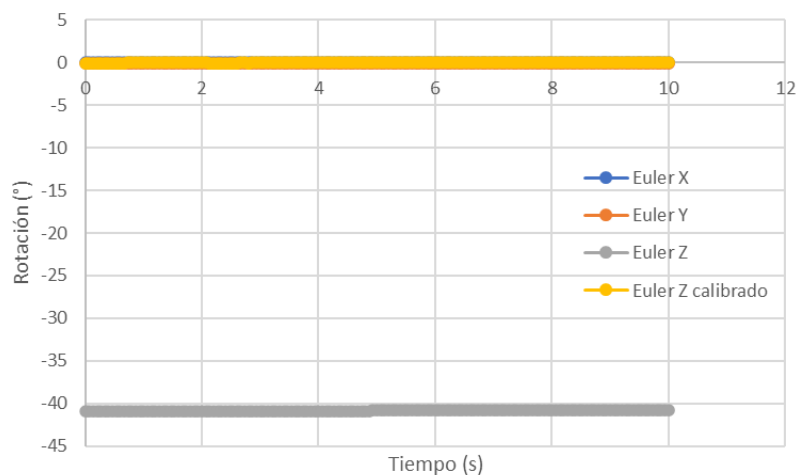


Figura 23. Calibración de la rotación alrededor del eje Z.

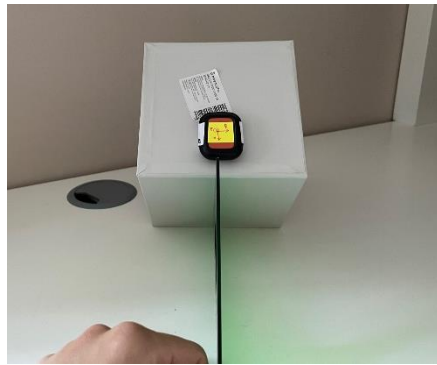
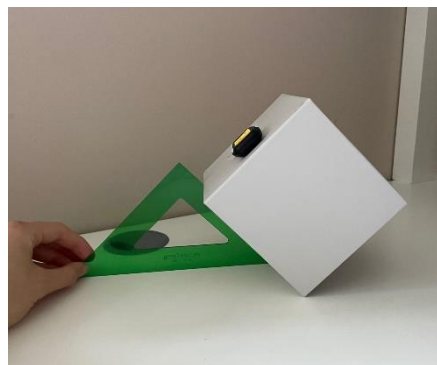
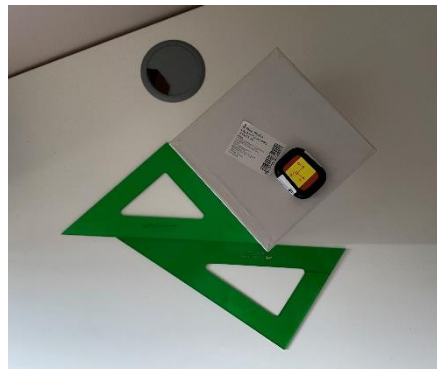
Seguidamente, asegurándose de que los sensores no se apagan ni se reinician, ya que, si esto sucede, la calibración no es la adecuada, se procede a realizar las mediciones con el sensor situado en la caja. Tras realizar las mediciones y exportarlas al ordenador, se procede al análisis de los datos.

4.3.1. Test 1

En primer lugar, se conectan los sensores al dispositivo como se indica en el anexo 1 de este documento. Se sincronizan el sensor a la frecuencia deseada que en este caso es de 15 Hz.

Para obtener los registros necesarios, se han llevado a cabo una serie de movimientos que se detallan a continuación. En primer lugar, se posiciona un sensor en la cara superior horizontal de una caja, asegurándose de alinear correctamente el eje X y el eje Y del sistema móvil del sensor con el sistema de referencia global “Este-Norte-Arriba”. Para llevar a cabo esta alineación precisa, se requiere el uso de una brújula como herramienta de ayuda.

Posteriormente, con el sensor colocado de manera adecuada se procede a hacer una serie de movimientos. En primer lugar, se realiza una rotación de la caja alrededor del eje Y aproximadamente 45 grados como se observa en la Figura 24 y se retorna a su posición original. A continuación, se repite el mismo procedimiento, pero esta vez se efectúa una rotación alrededor del eje X como se observa en la Figura 25. Finalmente, se realiza una nueva rotación de 45 grados alrededor del eje Z como se observa en la Figura 26 y se devuelve a su posición original.

*Figura 24. Rotación alrededor del eje Y.**Figura 25. Rotación alrededor del eje X.**Figura 26. Rotación alrededor del eje Z.*

Seguidamente se lleva a cabo una rotación de 90 grados alrededor del eje X, manteniendo la caja en esta nueva orientación se repiten los mismos giros de 45 grados realizados previamente alrededor de cada uno de los ejes, pero esta vez se retorna la caja a su posición después de haber girado 90 grados respecto al eje X. En la Figura 27 se pueden apreciar todos los movimientos descritos anteriormente.

En primer lugar, durante el intervalo de tiempo comprendido entre el instante 0 y el instante 25, se observan los tres giros de 45 grados alrededor de cada uno de los ejes. El primero de ellos, representado en color naranja, denota el giro alrededor del eje Y, el segundo, representado en color azul corresponde al giro alrededor del eje X; por último, el giro alrededor del eje Z se encuentra representado en color gris.

En esta parte del ensayo, se observa que mediante la calibración de las rotaciones alrededor del eje Z y la alineación del sistema de referencia móvil del sensor con el sistema de referencia global, los ángulos girados se observan muy fácilmente en la gráfica, pero esto solo se presenta en este caso en particular.

A continuación, se visualiza el giro de 90 grados alrededor del eje X representado en color azul en el instante de tiempo 25 segundos. A partir de esta nueva posición se realizan los mismos giros de 45 grados en torno a cada uno de los tres ejes. Sin embargo, esta vez se realiza otra secuencia también respecto de los ejes del sistema de referencia global. Primero se gira en torno al eje Z los 45 grados, seguidamente se gira alrededor del eje X de nuevo 45 grados y por último se giran 45 grados alrededor del eje Y.

No obstante, en esta ocasión, su representación no es tan clara como en el caso anterior. Este hecho es debido a que los sensores registran ángulos de Euler y en esta segunda posición, el sensor no se encontraba alineado con el sistema de referencia global. Para obtener el ángulo rotado en cada instante y obtener los mismos valores que en la secuencia anterior, se requiere llevar a cabo la correspondiente rotación.

En este caso la rotación se realiza post-multiplicando por la correspondiente matriz de rotación invariante, definida en la Ecuación 29. Aplicando la transformación dada por dicha ecuación a los registros a partir del segundo 26 se obtienen los ángulos indicados en la Figura 28, cuya interpretación es la esperada.

$$T = (R_L^S)^T \cdot I_{(3 \times 3)} = \begin{bmatrix} 0.9929 & -0.0200 & 0.1175 \\ -0.1172 & 0.0137 & 0.9930 \\ -0.0214 & -0.9997 & 0.0113 \end{bmatrix} \approx \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & -1 & 0 \end{bmatrix}$$

Ecuación 29

La matriz T contiene los vectores de L proyectados sobre S , para obtener de ese modo los ángulos que debe girar en positivo L para alcanzar a S . Los resultados son los siguientes tras haberla post-multiplicado a la matriz R_L^S y extraído los ángulos correspondientes de la matriz de rotación corregida (Ecuación 30).

$$(R_L^S)_{\text{corr}} = R_L^S \cdot T$$

Ecuación 30

Para el cómputo y post proceso de los registros de los sensores en cada uno de los test llevados a cabo para ilustrar y ejemplificar las metodologías que este trabajo contiene, se ha empleado software específico desarrollado en el Laboratorio de Estructuras de la Escuela de Ingenierías Industriales de Universidad de Valladolid empleando MATLAB.

Se obtienen los ángulos del sensor, como si este no hubiese sido rotado los correspondientes 90 grados en el eje X del sistema de referencia global. Hay que decir también que el pico de 90 grados visible en la rotación alrededor del eje X (véase Figura 28) responde precisamente a dicha rotación, ya que el cubo rota y se ha de captar, pero posteriormente ya no afectará a la interpretación de los ángulos de Euler, como se puede ver en las medidas procesadas convenientemente.

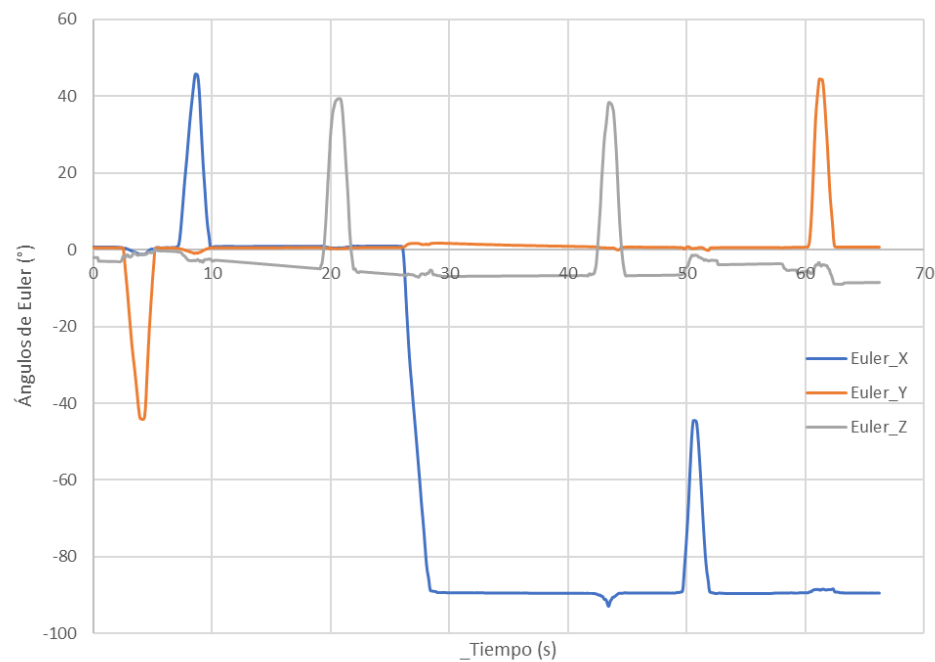


Figura 27. Ángulos registrados para la secuencia Y±45, X±45, Z±45, X+90, Z±45, X±45, Y±45.

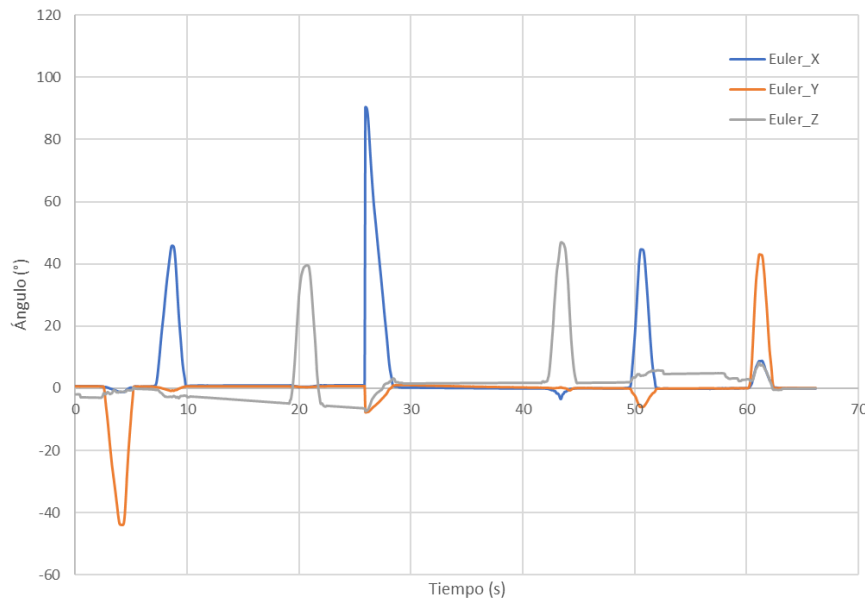


Figura 28. Ángulos transformados correspondientes a la secuencia $Y\pm45$, $X\pm45$, $Z\pm45$, $X+90$, $Z\pm45$, $X\pm45$, $Y\pm45$.

La rotación de 90 grados alrededor del eje X, no provoca la imposibilidad de interpretar las rotaciones del sensor sin haber llevado a cabo la transformación correspondiente (véase Figura 27), se aprecia el ángulo rotado en una sola curva. Sin embargo, esto solo ocurre en este caso en particular, en un caso más general, si se rota alrededor de otro eje u otro ángulo, los ángulos de Euler no se pueden analizar a simple vista ya que varios registros detectan valores no esperados por lo que se justifica la necesidad de realizar la rotación controlada, como se verá en el test 2.

4.3.2. Test 2

En el test 1 anterior se ha constatado que la interpretación de los ángulos de Euler solo es intuitiva cuando los giros son simples con respecto al sistema calibrado inicial. Una vez que se realizan giros basados en orientaciones previamente modificadas, la situación se vuelve más compleja y la comprensión de dichos giros requiere de una transformación correspondiente.

En este contexto, resulta necesario aplicar un proceso de transformación que permita interpretar y entender adecuadamente los giros efectuados sobre las orientaciones previas, facilitando así el análisis y la interpretación adecuada de los datos obtenidos.

En el test 2 se realizará la misma secuencia que en el caso anterior ($Y\pm45$, $X\pm45$, $Z\pm45$) sobre la caja en la que no solo está posicionado una IMU en la

cara superior, sino que existe otra en la cara frontal girado como se aprecia en la Figura 29. Nótese que al estar pegadas ambas IMUs al mismo sólido rígido que en este caso es la caja en forma de cubo, los ángulos serán los mismos. Sin embargo, la secuencia $Y\pm45$, $X\pm45$, $Z\pm45$, que se interpreta fácilmente para la unidad superior, se hace difícil de entender para la unidad frontal.



Figura 29. Posición de las dos IMUs en el sólido rígido.

A continuación, se muestran las gráficas de los datos recogidos por los sensores. En primer lugar, en la Figura 30 se puede ver los ángulos registrados para la secuencia $Y\pm45$, $X\pm45$, $Z\pm45$ por la IMU situada en la cara superior de la caja. Esta secuencia de giros es fácilmente interpretable como se ha explicado anteriormente porque la IMU se encuentra alineada con el sistema de referencia global.

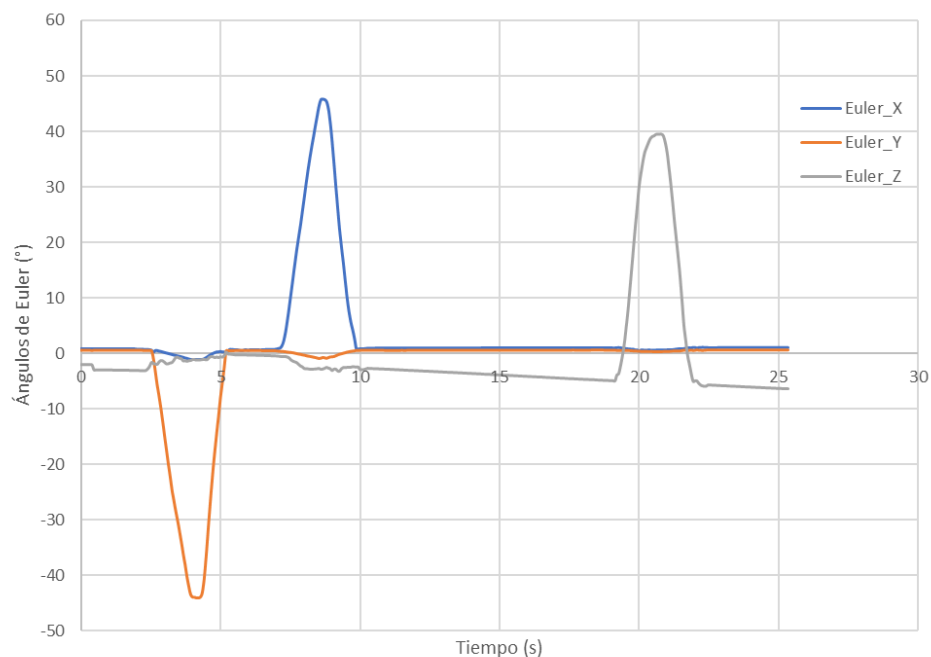


Figura 30. Ángulos registrados para la secuencia $Y\pm45$, $X\pm45$, $Z\pm45$ por la IMU situada en la cara superior horizontal.

En la Figura 31 adjunta, se presentan los ángulos registrados correspondientes a la secuencia $Y\pm 45$, $X\pm 45$, $Z\pm 45$, por la IMU ubicada en la cara lateral de la caja (ver Figura 29). Esta representación gráfica confirma y ejemplifica lo mencionado previamente. Debido a que dicha IMU no se encontraba alineada con el sistema de referencia global, los ángulos de Euler asociados no son fácilmente interpretables de manera directa. Por consiguiente, se hace necesario llevar a cabo transformaciones adecuadas sobre los datos registrados por esta IMU, con el fin de obtener un resultado consistente con lo presentado en la Figura 30. En esencia, ambas IMUs han experimentado rotaciones simultáneas con los mismos ángulos, y el objetivo radica en asegurar que los resultados obtenidos sean consistentes y coincidentes entre sí.

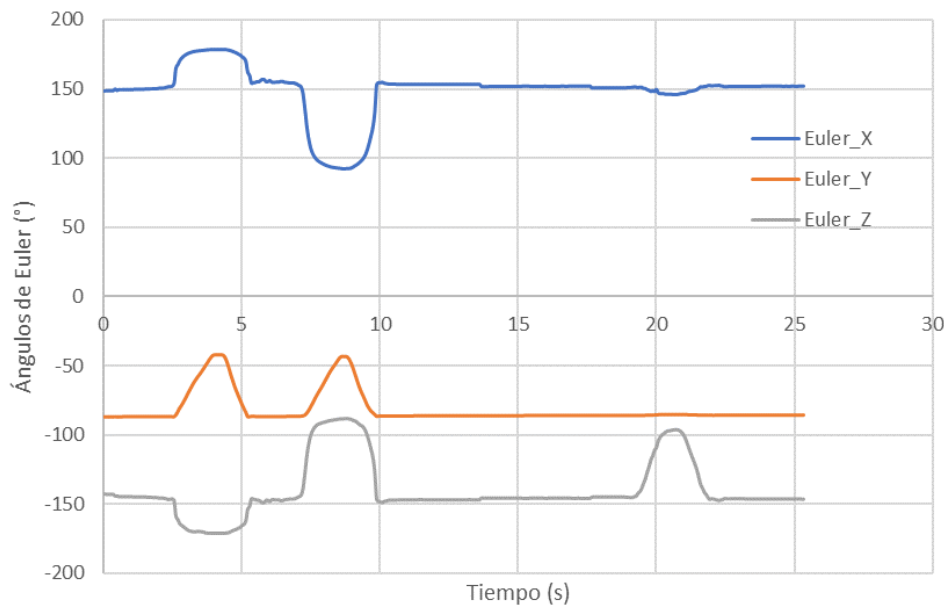


Figura 31. Ángulos registrados para la secuencia $Y\pm 45$, $X\pm 45$, $Z\pm 45$ por la IMU situada en la cara lateral.

Con el fin de lograr la concordancia entre las rotaciones registradas por la IMU ubicada en la cara lateral de la caja y las rotaciones registradas por la IMU situada en la cara superior horizontal de la misma caja, se lleva a cabo una rotación utilizando la matriz definida por la Ecuación 31. Una vez que esta rotación es aplicada, se observa que la secuencia de la Figura 32 coincide con la secuencia de la Figura 30, en términos de los ángulos registrados. Mediante esta rotación específica, se asegura la correspondencia y alineación adecuada entre los datos obtenidos por ambas IMUs, permitiendo una comparación y análisis coherente de las rotaciones experimentadas por la caja.

$$T = (R_L^{S_2})^T \cdot R_L^{S_1} = \begin{bmatrix} -0.0530 & -0.0218 & 0.9984 \\ -0.1371 & 0.9905 & 0.0144 \\ -0.9891 & -0.1361 & -0.0555 \end{bmatrix} \approx \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \\ -1 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

Ecuación 31

Se desean expresar, por tanto, los registros del sensor situado en la cara frontal del sólido de la Figura 29 como si estuviese orientado y colocado según el sensor de la cara superior horizontal del sólido de dicha figura, en virtud de lo cual se post-multiplica el invariante T a la matriz de rotación del sensor colocado en la cara frontal del sólido (Tierra / referencia global L común a ambos IMUs). Se tiene, para cada instante de tiempo. Posteriormente a esta transformación, la obtención de los ángulos post procesados es inmediata (Ecuación 32):

$$(R_L^{S_2})_{\text{corr}} = R_L^{S_2} \cdot T$$

Ecuación 32

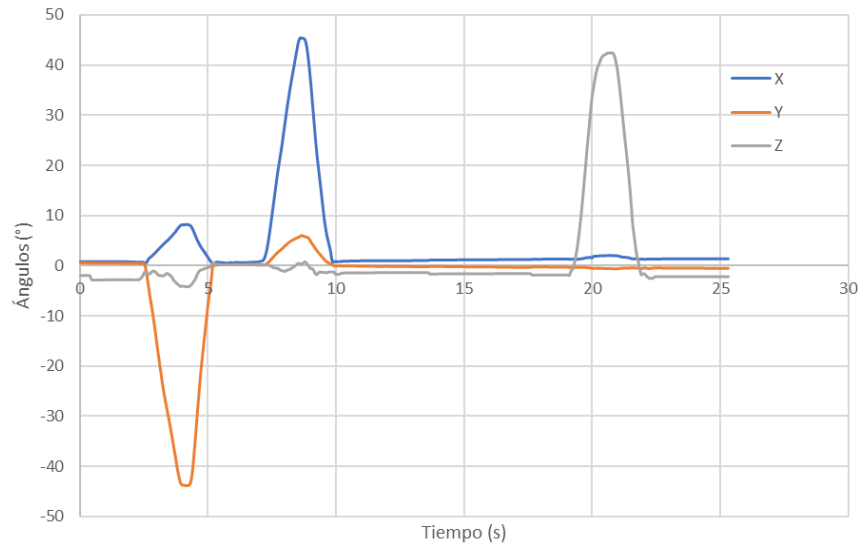


Figura 32. Ángulos transformados correspondientes a la secuencia Y±45, X±45, Z±45 por la IMU situada en la cara lateral.

4.3.3. Test 3

En los ensayos previos, se han realizado cálculos de los ángulos absolutos de rotación de las IMU situadas en dos posiciones de un sólido rígido. A través de estos procedimientos, se ha llegado a la obtención de las transformaciones necesarias para poder interpretar los ángulos de Euler y posteriormente darles un significado específico aplicado a los movimientos que realizados por el cuello.

En este último test se procederá a calcular el ángulo de rotación relativa entre dos sólidos rígidos, ya que es el principal objetivo de este trabajo para su posterior aplicación. En este caso se selecciona una frecuencia de 30 Hz con el fin de adquirir más precisión.

En primer lugar, se calibran las tres IMUs utilizadas en este ensayo, para ellos se sitúa sobre una superficie plana y se pulsa el botón “Reset Heading” como se explica en el capítulo 4 ya que esta forma de calibrar los sensores es más rápida.

A continuación, se colocan tres sensores sobre dos sólidos rígidos como se muestra en Figura 33. Para llevar a cabo este ensayo se emplean dos sólidos rígidos posicionados uno encima de otro, simulando así la cabeza y el tórax de una persona. En el sólido que se sitúa en la parte superior, se colocan dos sensores, uno en la cara superior horizontal y otro en la cara frontal. El sensor situado en la cara superior horizontal tiene una función redundante y se posiciona con el propósito de realizar una verificación adicional. Además, se añade un tercer sensor en el sólido rígido ubicado debajo, específicamente en la cara frontal. Además, por generalizar aún más este test, se coloca el sensor girado 90 grados en torno al eje Z con respecto al sensor situado en la cara frontal del sólido superior, como se aprecia en la Figura 33.



Figura 33. Posición de los sensores para el test 3.

Una vez que los sensores han sido calibrados y colocados en su posición correspondiente, se inicia el proceso de toma de mediciones. Para ello, se realiza una rotación controlada de los sólidos rígidos en un ángulo determinado, de tal forma que, posteriormente, se pueda comprobar que los datos obtenidos por los sensores y procesados son correctos.

Se realizan los movimientos descritos a continuación, primero se hace un giro de 45 grados en torno al eje Y del sistema de referencia del sensor situado en

la cara frontal del sólido superior como se muestra a continuación en la Figura 34. Posteriormente, se vuelve a la posición inicial de la Figura 33.

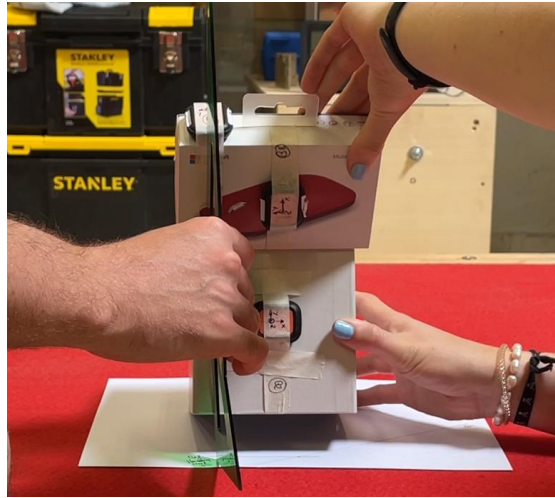


Figura 34. Primer movimiento, giro en torno al eje Y de 45 grados.

El siguiente movimiento llevado a cabo es un giro de otros 45 grados, pero esta vez es alrededor del eje Z del sistema de referencia del sensor situado en la cara frontal del sólido superior como se muestra en la Figura 35. Seguidamente se mantiene unos segundos la rotación y se vuelve a la posición original de la Figura 33.

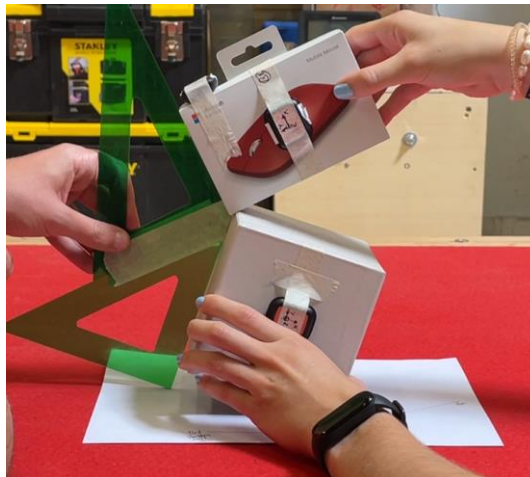


Figura 35. Segundo movimiento, giro en torno al eje Z de 45 grados.

Por último, se lleva a cabo un giro de 30 grados alrededor de eje X del sistema de referencia del sensor situado en la cara frontal del sólido superior como se observa en la Figura 36. Para finalizar se vuelve a la posición de inicio de la Figura 33.

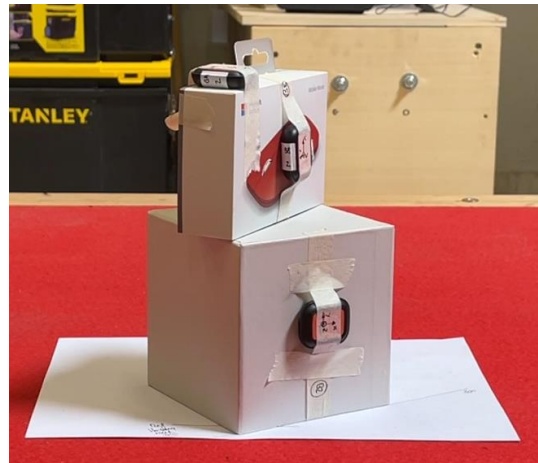


Figura 36. Tercer movimiento, giro en torno al eje X de 45 grados.

Una vez realizados los movimientos se obtienen los datos registrados por los sensores y se dibujan las gráficas de la Figura 37, Figura 38 y Figura 39. Estas gráficas no son fácilmente interpretables a simple vista ya que los sensores registran ángulos de Euler y se requiere un procesado de los datos para obtener las rotaciones relativas de una IMU respecto de otra. Por lo que en la Figura 37 se muestran los datos recogidos por el sensor situado en el sólido inferior, en la Figura 38 se muestran los datos recogidos por el sensor situado en la cara superior horizontal del sólido superior y por último en la Figura 39 se muestran los ángulos de Euler registrados por el sensor situado en la cara frontal del sólido superior todos ellos sin procesar.

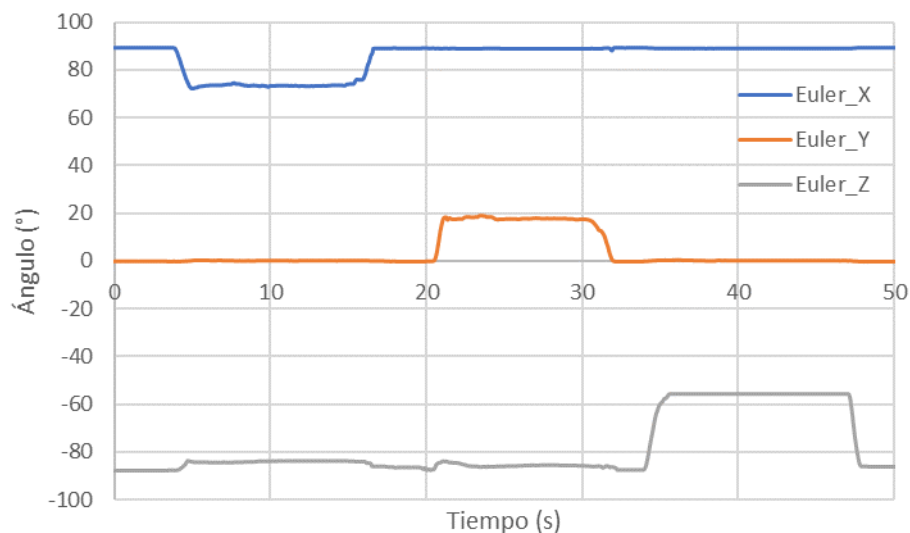


Figura 37. Ángulos registrados por la IMU situada en el sólido inferior.

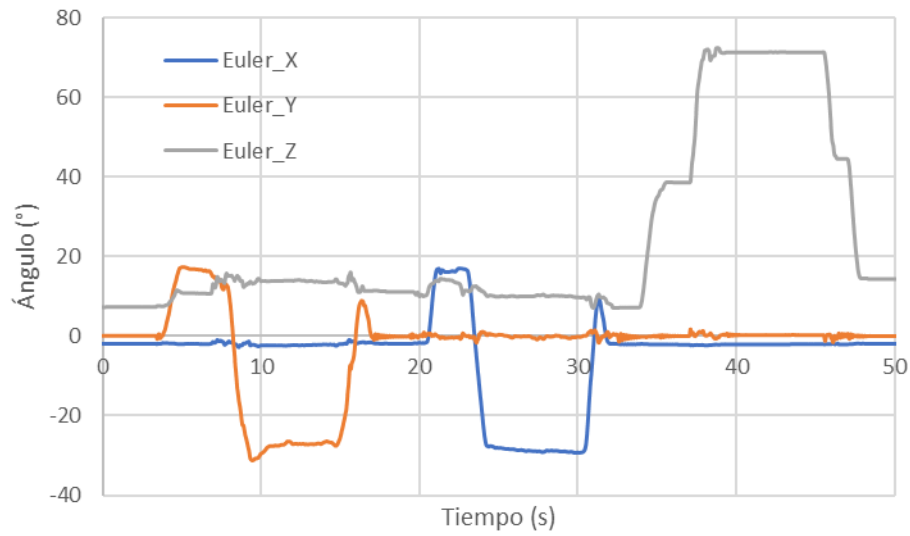


Figura 38. Ángulos registrados por la IMU situada en la cara superior horizontal del sólido superior.

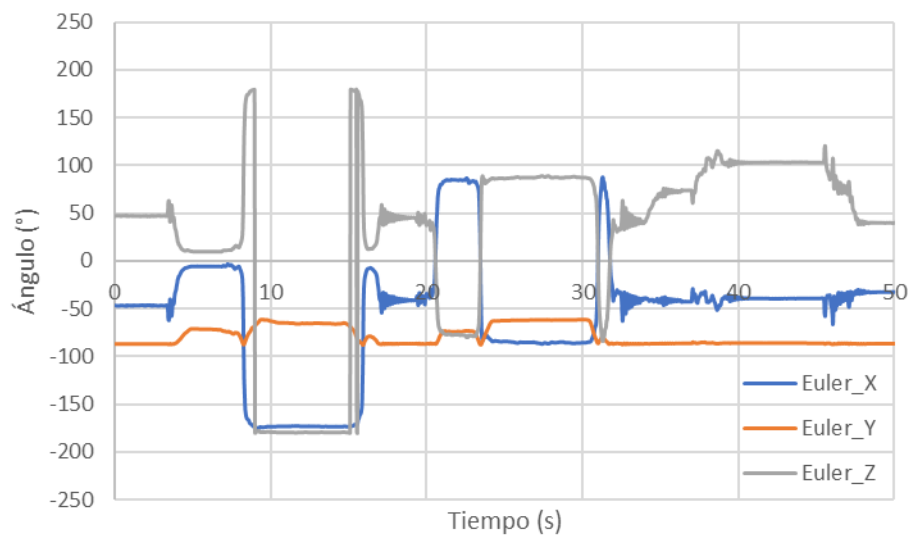


Figura 39. Ángulos registrados por la IMU situada en la cara frontal del sólido superior.

A continuación, se procesan los datos como se explica en el capítulo 2 aplicando las matrices de rotación correspondientes de la Ecuación 33 para llevar todos los giros al mismo sistema de referencia. Con este cambio lo que se consigue es expresar las rotaciones de un sensor respecto de otro, por lo que se obtienen un giro relativo, independizado del sistema de referencia de la Tierra.

$$(T_{SAT}^{REF})_0 = (T_{B8}^{B2})_0 = \begin{bmatrix} -0.0842 & 0.0148 & -0.9963 \\ -0.9961 & -0.0277 & 0.0838 \\ -0.0264 & 0.9995 & 0.0171 \end{bmatrix} \approx \begin{bmatrix} 0 & 0 & -1 \\ -1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

Ecuación 33

En la Figura 40 se obtienen representadas las rotaciones relativas de tal forma que se toma como referencia (REF) la IMU situada en el sólido inferior y como relativo (SAT), la IMU situada en la cara frontal del sólido superior. En dicha figura se pueden ver representados los giros descritos anteriormente con sus respectivas magnitudes.

En los instantes de tiempo del 8 a los 18 segundos se lleva a cabo el giro descrito en la Figura 34, representado por la curva naranja alcanza un valor de 45 grados. En el intervalo de tiempo de los segundos 22 al 32, se lleva a cabo el giro representado en la Figura 35, representado por la curva gris, alcanza un valor de 45 grados. Por último, en el intervalo de los segundos del 38 a los 48 segundos, se lleva a cabo el giro de la Figura 36, representado por la curva azul, alcanza un valor de 30 grados.

A través del análisis de la gráfica presentada en la Figura 40, se confirma la correcta ejecución de las transformaciones correspondientes, dado que los ángulos relativos obtenidos concuerdan con aquellos medidos durante el ensayo llevado a cabo. Los signos visibles en las gráficas denotan una rotación horaria (negativo) o antihoraria (positivo).

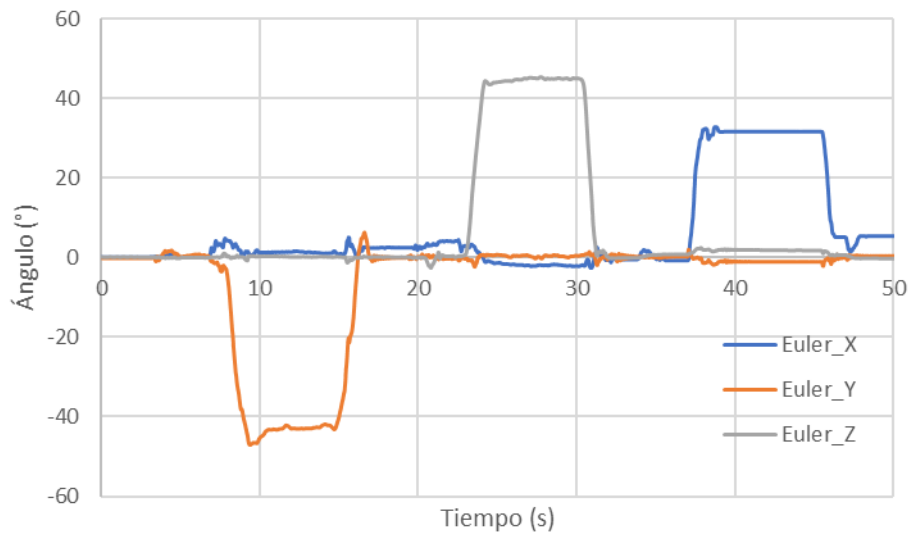


Figura 40. Referencia IMU situada en el sólido inferior y relativo IMU situada en la cara frontal del sólido superior.

Como comprobación también se obtiene la gráfica de los ángulos obtenidos cuando la referencia es la IMU situada en el sólido inferior y la IMU relativa es la situada en la cara superior horizontal del sólido superior como se puede ver

en la Figura 41. Esta gráfica es igual que la anterior pero lo único que cambian son los ejes alrededor de los cuales se llevan las rotaciones ya que el sistema de referencia del sensor relativo cambia de posición. Se comprueba también que los ángulos girados son en torno a un eje de 45, 45 y 30 grados. En este caso la matriz de transformación de las rotaciones toma la forma de la Ecuación 34.

$$(T_{SAT}^{REF})_0 = (T_{B4}^{B2})_0 = \begin{bmatrix} -0.0262 & 0.9995 & -0.0172 \\ -0.9963 & -0.0267 & -0.0279 \\ -0.0284 & 0.0165 & 0.9995 \end{bmatrix} \approx \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Ecuación 34

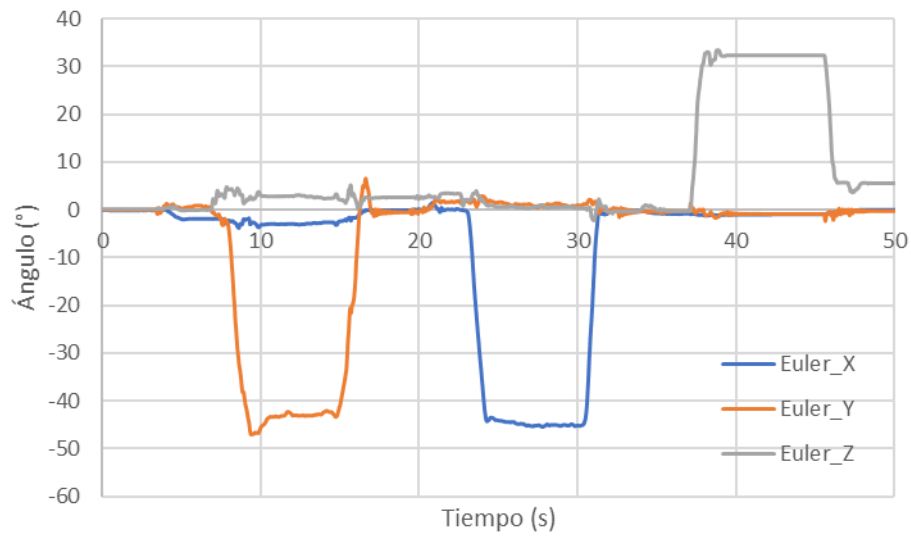


Figura 41. Referencia IMU situada en el sólido inferior y relativo IMU situada en la cara superior horizontal del sólido superior.

A modo de verificación adicional, se incluye una gráfica adicional en la Figura 42, donde se representan las rotaciones relativas del sensor ubicado en la superficie horizontal superior del sólido situado arriba con respecto al sensor de referencia situado en su superficie frontal también del sólido superior. Dado que ambos sensores pertenecen al mismo sólido rígido, experimentan las mismas rotaciones, lo cual implica que su rotación relativa siempre será igual a cero, como se evidencia en la Figura 42. Para este caso la matriz de rotación correspondiente viene definida por la Ecuación 35.

$$(T_{SAT}^{REF})_0 = (T_{B4}^{B8})_0 = \begin{bmatrix} 0.0342 & -0.0031 & 0.9994 \\ 0.1116 & 0.9938 & -0.0008 \\ -0.9932 & 0.1116 & 0.0343 \end{bmatrix} \approx \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \\ -1 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

Ecuación 35

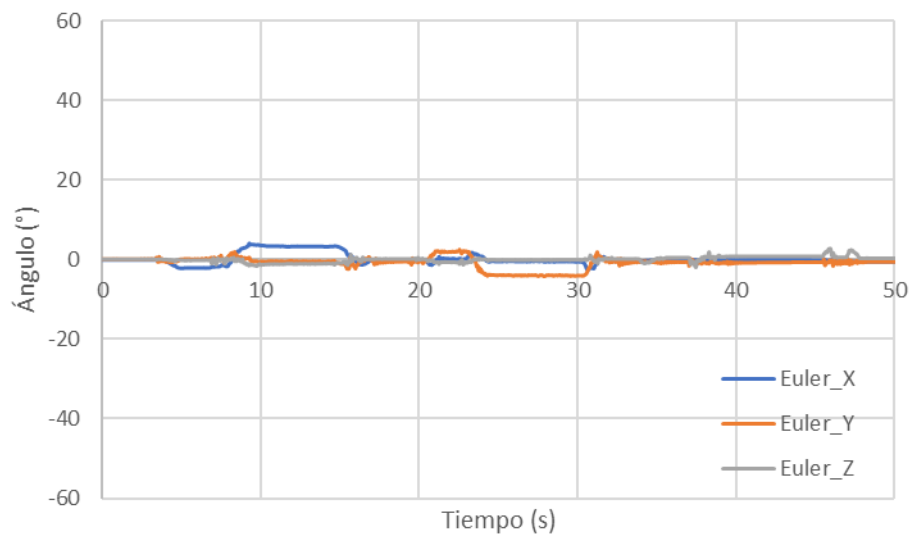


Figura 42. Referencia IMU situada en la cara frontal del sólido superior y relativa IMU situada en la cara superior horizontal del sólido superior.

Las imprecisiones de la orientación teórica de los sensores que se observan en la Figura 42 son debido a que estos están pegados con cinta de carroceros que no los fija rígidamente a la caja. Sin embargo, se encuentran en un rango muy pequeño de valores por lo que son aceptables ya que no se exceden los 4 grados.

CAPÍTULO 5. Aplicación al ámbito biomecánico.

La finalidad de la explicación de los ángulos de Euler reside en adquirir la capacidad de interpretar los parámetros con el objetivo de su aplicación en el ámbito del rescate acuático. En esta situación, se busca conocer el ángulo de rotación de una parte del cuerpo, en este caso la cabeza, con respecto a otra, que será el tronco de la persona.

Tras llevar a cabo el proceso de análisis de los datos proporcionados por los sensores, se obtendrá una serie de ángulos que se interpretan como los movimientos de la articulación del cuello. A continuación, se describen los nombres específicos correspondientes a cada uno de estos ángulos. Dado que cada articulación posee sus propios movimientos con denominaciones particulares, este trabajo se enfocará en el estudio de la articulación cervical.

5.1. Biomecánica del cuello.

El primer movimiento del cuello que se describe es el movimiento de flexión, este desplazamiento se refiere a la acción de inclinar la cabeza hacia abajo, llevando la mandíbula hacia el esternón como se muestra a la izquierda de la Figura 43. Los músculos que participan en este movimiento son los flexores de la cabeza y el cuello, como el longus capitis, el longus colli y los rectos anteriores de la cabeza y el cuello [26] [27].

Estos músculos se encuentran en una ubicación profunda, por delante de la columna vertebral y proporcionan soporte y estabilidad a las vértebras cervicales, ayudando a mantener la postura adecuada y prevenir lesiones por movimientos bruscos [28].

El arco normal de movilidad permite tocar el tórax con la barbilla cambiando el eje prácticamente 45 grados hacia delante. La flexión se produce por un deslizamiento de la vértebra superior sobre la inferior, debido al grosor del disco intervertebral.

Por otra parte, se tiene el movimiento opuesto conocido como extensión. Este movimiento consiste en desplazar la cabeza hacia atrás, alejando la mandíbula del esternón. Los músculos encargados de realizar este movimiento son el esplenio, semiespinoso, trapecio, y los músculos suboccipitales, es decir, la musculatura de la nuca. En caso de que los músculos suboccipitales se encuentren tensos y acortados, pueden generar

dolores cervicales debido a un desequilibrio con los músculos flexores del cuello [26]. Este movimiento se puede observar en el lado derecho de la Figura 43.

Asimismo, el movimiento alcanza aproximadamente los 45 grados en dirección posterior. Esta acción permite dirigir la mirada hacia la superficie ubicada inmediatamente superior al individuo. La extensión se produce por el deslizamiento de la vértebra superior sobre la inferior. La limitación de este movimiento se produce por el choque de las apófisis espinosas de las vértebras cervicales.

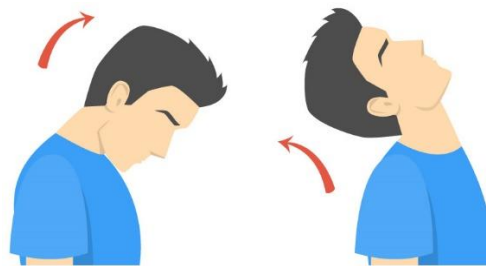


Figura 43. Movimientos de flexión (izquierda) y extensión (derecha) [29].

A continuación, se presenta el movimiento denominado rotación, el cual se refiere a la acción de girar la cabeza de un lado a otro. Los músculos principales involucrados en esta acción son el esplenio, situado en la parte posterior del cuello, se encarga de la rotación colateral, es decir, gira la cabeza hacia el lado opuesto al músculo activo; el esternocleidomastoideo, situado en la parte anterior del cuello, desempeña un papel clave en la rotación ipsilateral, permitiendo el giro de la cabeza hacia el mismo lado del músculo activo; el elevador de la escápula, ubicado en la parte superior y posterior del cuello, participa en el movimiento de rotación al elevar y estabilizar la escápula, contribuyendo a un movimiento fluido y coordinado; y los músculos suboccipitales, situados en la base del cráneo, intervienen en la rotación al colaborar en la estabilización de las vértebras cervicales y proporcionar un control preciso del movimiento [26]. Esta acción se puede apreciar con más detalle en la Figura 44.

Este movimiento es una habilidad que permite girar la cabeza en un amplio arco de movimiento, abarcando aproximadamente 80 grados hacia el lado izquierdo y otros 80 grados hacia el lado derecho, lo cual suma un total de 160 grados de movilidad en esta dirección.

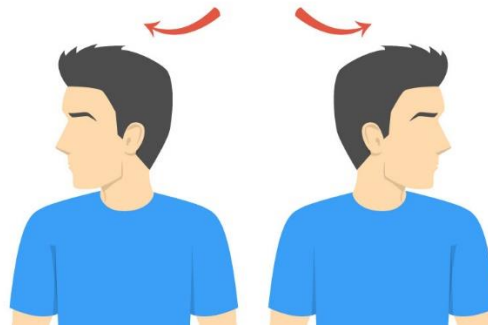


Figura 44. Movimiento de rotación [29].

Por último, se tiene un tercer movimiento denominado inclinación o flexión lateral. Este es un movimiento en el cual se desvía la cabeza hacia un lado, acercando la oreja hacia el hombro correspondiente. En esta acción, los músculos clave que desempeñan un papel fundamental son los escalenos y el esternocleidomastoideo [26]. Este movimiento se puede apreciar con más detalle en la Figura 45. En condiciones normales, este movimiento alcanza unos 45 grados en ambos lados, por lo que resulta un ángulo total de 90 grados de movilidad lateral.

Los músculos escalenos, ubicados en la parte lateral del cuello, están involucrados en la inclinación ipsilateral, es decir, se contraen para inclinar la cabeza hacia el mismo lado del músculo activo. Estos músculos trabajan en conjunto para producir una contracción equilibrada y controlada que permita el movimiento fluido de inclinación lateral del cuello [30].

Por otro lado, el esternocleidomastoideo, situado en la parte anterior del cuello, también desempeña un papel importante en la inclinación lateral del cuello. Este músculo se activa de manera asimétrica en función de la dirección de la inclinación lateral. Cuando se inclina la cabeza hacia un lado, el esternocleidomastoideo del lado opuesto se contrae para proporcionar el movimiento necesario [28].

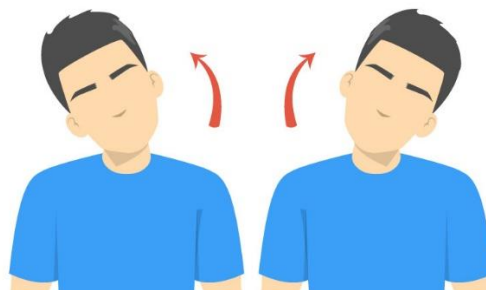


Figura 45. Movimiento de flexión lateral [29].

Esta serie de movimientos son posibles gracias a la presencia de dos tipos de articulaciones craneovertebrales sinoviales. Una articulación sinovial es aquella que se forma entre huesos que presentan superficies articulares

distintas. Estas articulaciones se caracterizan por contener en su interior una sustancia viscosa, llamada líquido sinovial, que permite el deslizamiento adecuado y evita el roce entre los componentes articulares. Dichas articulaciones, conectan el cráneo con las vértebras atípicas [31] [32].

La primera articulación se denomina articulación atlanto-occipital, está compuesta por las masas laterales de la primera vértebra de la columna vertebral, C1 (mostrada en la Figura 4) o también conocida como Atlas y los cóndilos occipitales del cráneo. Esta articulación permite realizar movimientos de flexión, extensión e inclinación lateral de la cabeza. Gracias a ella es posible asentir con la cabeza.

Por otro lado, las articulaciones atlanto-axiales o atlantoaxoideas se encuentran entre la primera vértebra (C1) y la segunda (C2) también conocida como Axis. Estas articulaciones, conformadas por dos articulaciones laterales y una articulación mediana, la apófisis odontoides, facilitan el movimiento de pivote de la cabeza durante el gesto de desaprobación. Esta apófisis está sostenida por el ligamento transversal del Atlas, parte del cruciforme junto a los fascículos longitudinales superior e inferior [10] [32]. Si este ligamento transversal se rompe, ocurre subluxación o luxación de la articulación atlanto-axial con cuadriplejía o muerte .

Estas articulaciones craneovertebrales desempeñan un papel fundamental en la movilidad y funcionalidad de la cabeza y el cuello. Su correcto funcionamiento permite una amplia gama de movimientos necesarios para diversas actividades y expresiones faciales.

5.2. Lesiones cervicales.

A continuación, se presentan de manera resumida algunas de las lesiones agudas que pueden ocurrir en el cuello. Una de ellas es el esguince o distensión en los ligamentos o en los músculos del cuello, esto causa un dolor punzante que se propaga por la parte superior del brazo y sensación de rigidez. Otra lesión posible es la fractura o dislocación de la columna vertebral, la cual puede provocar una lesión en la médula espinal y terminar en una parálisis permanente. Además, existe la posibilidad de sufrir un desgarro en un disco intervertebral, esto puede afectar a la médula espinal y causar mareos y malestar estomacal [33].

Estas lesiones representan situaciones de riesgo que requieren atención adecuada y tratamientos oportunos. Por ello, es muy importante aplicar los procedimientos de primeros auxilios correctos para inmovilizar y trasladar a la persona lesionada correctamente y así reducir los riesgos de parálisis permanente. Las lesiones en el cuello que causan daño en la médula espinal

requieren atención de urgencia ya que desarrollan síntomas como la pérdida de movimiento o sensibilidad, entumecimiento, hormigueo y dificultad para controlar los músculos de los brazos o piernas.

5.3. Aplicación a la formación de socorristas.

Con el fin de contribuir a la formación de personas capacitadas para realizar estos primeros auxilios de forma correcta, se llevará a cabo la evaluación de los ángulos relativos de flexión, extensión, rotación y flexión lateral. Estos ángulos estarán definidos dentro de una serie de valores máximos permitidos ya que, superar dicho límite máximo puede exponer a la persona a una situación de mayor riesgo. En consecuencia, si los incrementos relativos de los ángulos son mínimos, se reducirá el riesgo de lesiones y se incrementará el éxito de las operaciones de rescate.

En el anexo 2 se puede ver que, en el caso acuático, hay dos técnicas diferenciadas de rescate. Poder comparar los ángulos girados por el cuello de la víctima podría hacer preferible una técnica respecto de la otra.

El objetivo de este trabajo es llegar a la obtención de los ángulos relativos girados de un sensor con respecto de otro e independizarlos del sistema de referencia Tierra (L). Es decir, la obtención de una base móvil a partir de rotaciones sucesivas con respecto a un sistema de referencia móvil.

Posteriormente un sensor estará situado en el tórax de la persona y otro en la cabeza, el objetivo será determinar cuántos grados se desplaza la cabeza de la persona con respecto del tórax en cada una de las direcciones identificadas en el apartado 5.1. El sensor situado en el tórax de la persona será la referencia móvil. Para ello es necesario saber interpretar los datos obtenidos por los sensores y obtener una serie de matrices de rotación ya que estos datos se encuentran en diferentes bases y se buscan los ángulos relativos de un sensor respecto de otro.

Para el análisis de los datos se proponen escenarios en los que, en condiciones controladas, se puede asumir que el sujeto está en posición vertical y el sensor de medida inercial estará convenientemente ubicado. Por lo que esta IMU se situará en la coronilla de la persona y así se obtendrá la información de los ángulos biomecánicos requeridos directamente.

Sin embargo, en situaciones arbitrarias, por ejemplo, cuando el sujeto se encuentre tumbado o flotando en el agua, es necesario expresar los ángulos girados por un sólido rígido que en este caso será la cabeza con respecto a otro que será el tórax. La búsqueda y definición de la metodología general es el propósito principal de este trabajo.

El sensor que se encuentra en la cabeza no tiene por qué estar ubicado en la coronilla, por ejemplo, se puede encontrar situado en la frente. Esto hace que las rotaciones de este sensor haya que transformarlas y se correspondan con las rotaciones del sensor situado en la coronilla, cuya interpretación biomecánica es inmediata, como se explica en el capítulo 4, para que los ángulos tengan el significado médico buscado.

CAPÍTULO 6. Aplicación realista a una persona.

En los capítulos anteriores, se han establecido de manera precisa los fundamentos teóricos requeridos, así como se ha proporcionado una explicación detallada sobre el proceso de calibración de los sensores con el objetivo de validar los datos capturados por los mismos. Además, se ha realizado una introducción sobre la aplicación de dichos sensores en el ámbito biomecánico, para el caso concreto de la búsqueda de información relativa a los movimientos del cuello.

En el presente capítulo, se procederá a llevar a cabo la implementación de los sensores en una serie de escenarios de prueba, seguida del análisis detallado de los resultados obtenidos. Esta fase experimental y analítica tiene como objetivo principal evaluar el desempeño y la eficacia de los sensores en el contexto específico de los movimientos cervicales. A través de estos escenarios de prueba, se busca obtener información valiosa y significativa que permita verificar la aplicabilidad y la precisión de los sensores en la medición y cuantificación de los movimientos del cuello.

6.1. Unidad de medida inercial situada en la coronilla.

En primer lugar, se aborda el estudio del caso más sencillo. Para ello, se sitúa un sensor en posición horizontal sobre la coronilla de una persona de tal forma que los ejes del sistema de referencia del sensor se alinean con el sistema de referencia global “Este-Norte-Arriba” como se ve en la Figura 46. Esto permite que las rotaciones controladas realizadas partan de 0 grados. En este escenario se obtendrán ángulos absolutos, dado que se está trabajando solo con una unidad de medida inercial. Los ángulos obtenidos se refieren al sistema de referencia global “Este-Norte-Arriba” y se corresponden con los movimientos de flexión, extensión, rotación y flexión lateral de la cabeza.

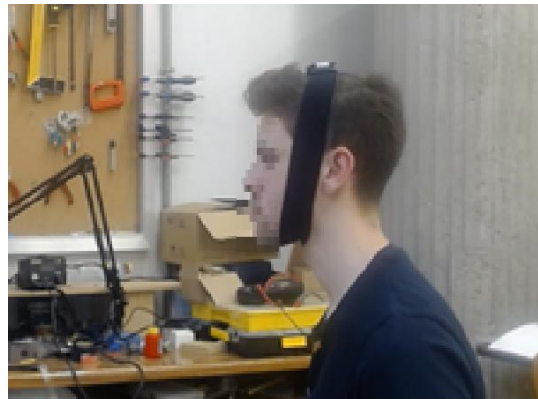


Figura 46. Posicionamiento de la unidad de medida inercial sobre la coronilla.

En este contexto, se realizarán mediciones precisas y se registrarán los ángulos resultantes para cada uno de los mencionados movimientos de la cabeza. Dichos ángulos serán interpretados en relación con el sistema de referencia global establecido. Estos datos constituirán una base fundamental para el posterior análisis y comparación con otros casos más complejos, proporcionando una visión clara de los movimientos de la cabeza. En el anexo 1 se explica el procedimiento seguido para tomar las medidas, en este caso se ha seleccionado una frecuencia de 120 hercios (Hz) con el fin de observar las rotaciones con mayor nitidez y resolución posible.

Para llevar a cabo el registro de los datos se parte de la posición inicial mostrada en la Figura 46. A partir de dicha posición, se realiza una secuencia de movimientos específicos para analizar los diferentes rangos de movimientos del cuello.

El primer movimiento que se lleva a cabo es el denominado extensión como se muestra en la Figura 47. A continuación, se hace un movimiento de flexión de la cabeza como se observa en la Figura 48. Seguidamente, se realiza un movimiento de rotación a la derecha como se muestra en la Figura 49 y otro de rotación hacia la izquierda que se puede observar en la Figura 50. La siguiente secuencia que se lleva a cabo son los movimientos de flexión lateral, primero hacia la derecha como se muestra en la Figura 51 y después hacia la izquierda como se aprecia en la Figura 52. Por último, se llevan a cabo dos rotaciones completas del cuello y se vuelve a la posición original.

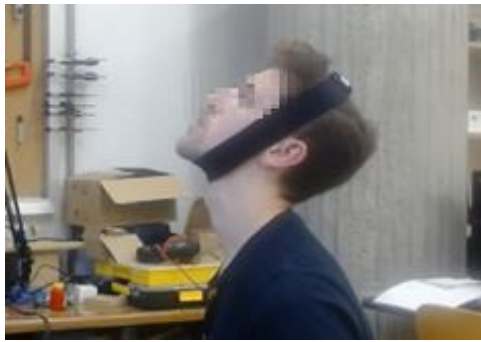


Figura 47. Movimiento de extensión.

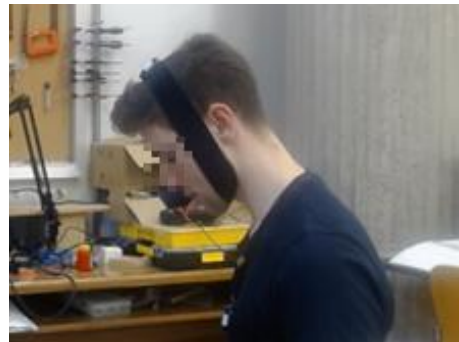
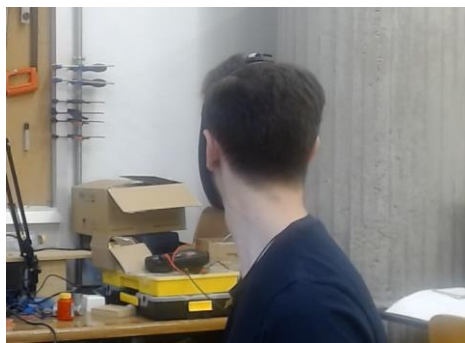
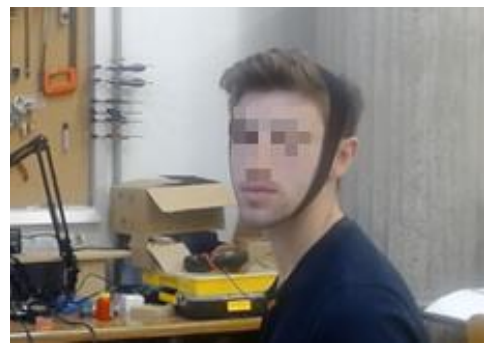
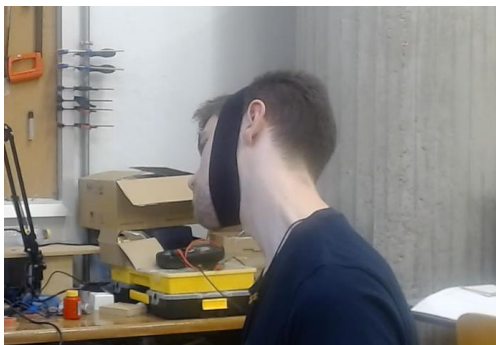
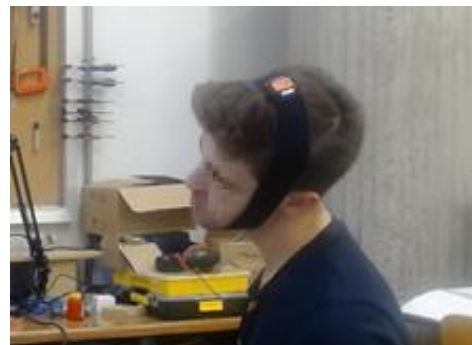


Figura 48. Movimiento de flexión.

Figura 49. Movimiento de rotación a la
derecha.Figura 50. Movimiento de rotación a la
izquierda.Figura 51. Movimiento de flexión lateral
derecha.Figura 52. Movimiento de flexión lateral
izquierda.

En esta secuencia de movimientos los sensores registran los datos que se pueden visualizar en la Figura 53, donde se ha representado gráficamente el ángulo rotado frente al tiempo. En dicha figura, se han representado los datos obtenidos después de haber calibrado el valor de las rotaciones alrededor del eje Z.

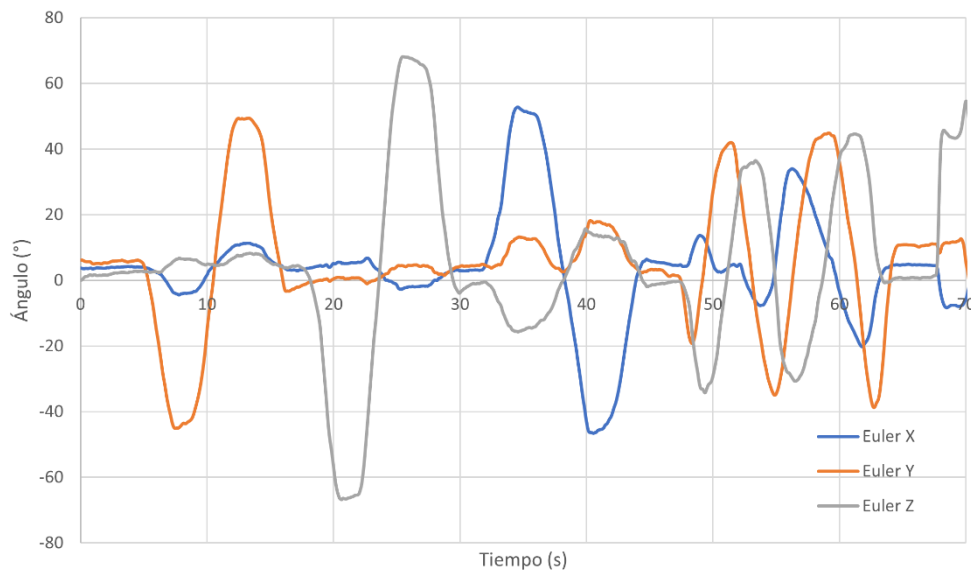


Figura 53. Rotaciones con la unidad de medida inercial en la coronilla.

Analizando la Figura 53, se puede determinar el ángulo absoluto girado en cada movimiento. Los signos visibles en las gráficas denotan una rotación horaria (negativo) o antihoraria (positivo). En dicha figura, alrededor del instante de tiempo 7 se lleva a cabo el primer movimiento, gracias a los registros de los sensores se sabe que el cuello se ha flexionado con un ángulo de -45 grados aproximadamente. Posteriormente se ha llevado a cabo una extensión de 50 grados aproximadamente. Estos movimientos se representan por la curva de color naranja.

A continuación, se observan los movimientos de rotación, representados por la curva de color gris en el intervalo de tiempo del segundo 20 al 30 de la Figura 53. Primero se lleva a cabo una rotación hacia la izquierda con un ángulo de -66 grados. Seguidamente, se lleva a cabo una rotación hacia la derecha con un ángulo de 68 grados aproximadamente.

La siguiente secuencia de movimientos se observan en la Figura 53 representados por la curva de color azul. Estos son los movimientos de flexión lateral. Por lo que se puede afirmar que el cuello ha flexionado lateralmente con un ángulo de 50 grados hacia la derecha y posteriormente ha flexionado hacia la izquierda con ángulo de -46 grados.

El último movimiento que se lleva a cabo es una composición de rotaciones, la cual es visible en la gráfica mediante los sucesivos alabeos, cabeceos y guiñadas concatenados entre sí conforme la cabeza va rotando en las tres direcciones respecto a la Tierra. Analizando la gráfica de la Figura 53 se pueden deducir los movimientos que ha realizado el cuello en el intervalo de tiempo entre los segundos 50 y 70. Observando la curva naranja, se obtiene que el cuello realiza el movimiento de extensión tres veces con ángulos de -

20, -35 y -40 grados y se ha flexionado dos veces con ángulos de 42 y 45 grados aproximadamente.

Posteriormente, analizando la curva gris de dicha figura, se puede decir que se han realizado dos rotaciones hacia la derecha de -35 y -30 grados aproximadamente y dos rotaciones hacia la izquierda de 35 y 45 grados.

Por último, se observa que el cuello ha flexionado lateralmente en cuatro ocasiones. Ha flexionado lateralmente hacia la derecha con ángulos de 15 y 35 grados y hacia la izquierda con ángulos de -10 y -20 grados.

Por lo que esta gráfica permite analizar la composición de los movimientos que se han llevado a cabo. Con el sensor alineado con el sistema de referencia global de la Tierra y realizando movimientos simples se pueden validar las medidas, así como el procedimiento llevado a cabo. No obstante, la persona no siempre va a estar orientada de dicha manera, por lo que es imprescindible tener en consideración supuestos más generales como se verá en los apartados siguientes.

6.2. Unidad de medida inercial situada en la frente.

A continuación se realizará el estudio del escenario en el cual la unidad de medida inercial se ubica en la frente de la persona, tal como se observa en la Figura 54. En este caso, al igual que en el escenario anterior, se utilizará únicamente un sensor lo que implica que nuevamente se calcularán los ángulos de manera absoluta correspondientes a los movimientos del cuello. Al colocar el sensor en la frente, se busca capturar con precisión los movimientos de la cabeza y obtener una representación precisa de los ángulos involucrados.

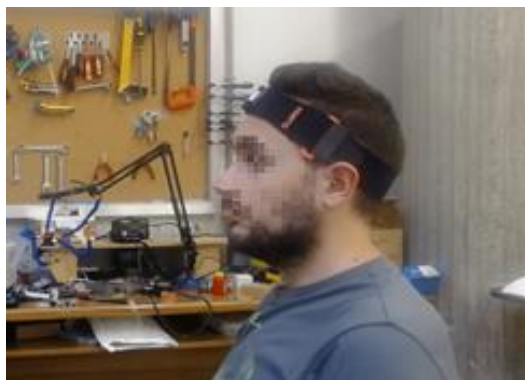


Figura 54. Posicionamiento de la unidad de medida inercial en la frente.

Con anterioridad al registro de datos, se calibran las rotaciones alrededor del eje Z como se describe en el capítulo 4. Una vez realizado el procedimiento de calibración se comienza con el registro de los datos, realizando los mismos

movimientos de extensión, flexión, rotación y flexión lateral descritos en Figura 47, Figura 48, Figura 49, Figura 50, Figura 51 y Figura 52. Al igual que en el caso anterior los signos visibles en las gráficas denotan una rotación horaria (negativo) o antihoraria (positivo). Sin embargo, para la correcta interpretación de estos signos, es necesario conocer cómo se encuentra ubicado el sensor en la persona. Ya que, en este caso, cambia de posición con respecto al escenario anterior. Por lo tanto, el triedro del sistema del sensor que se utiliza para establecer el signo ha cambiado de posición y los giros en torno a los ejes de este triedro no representan el mismo movimiento que en el caso anterior.

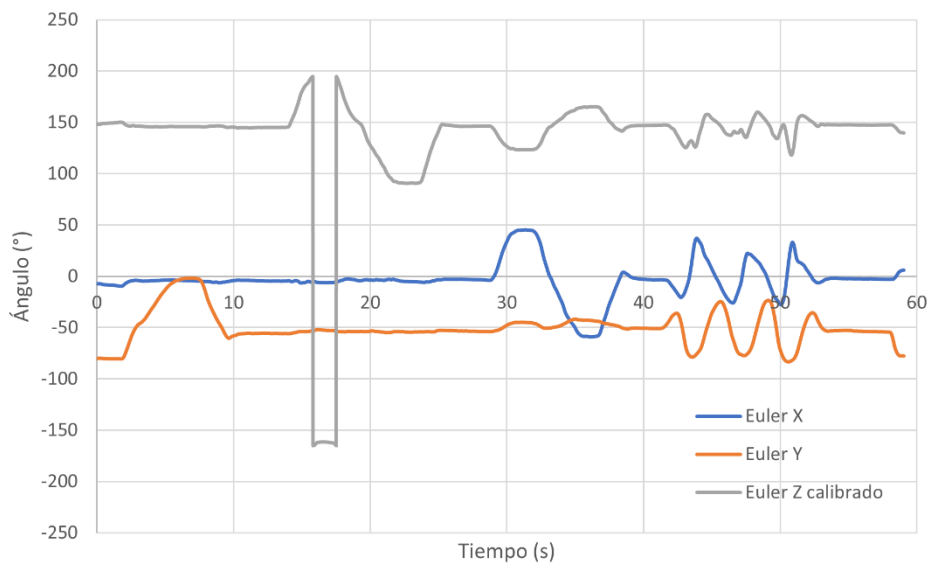


Figura 55. Rotaciones con la unidad de medida inercial situada en la frente de la persona.

Analizando la Figura 55 se pueden obtener los ángulos registrados por el sensor inercial. En este escenario, a diferencia del apartado anterior, el sensor no se encuentra alineado con el sistema de referencia global, por lo que los valores iniciales de los ángulos en el instante de tiempo 0, no comienzan en 0 grados. El sensor se encuentra situado respecto del sistema de referencia Tierra con los siguientes ángulos de Euler. Alrededor del eje X ha girado un ángulo de -5 grados aproximadamente, alrededor del eje Y otro ángulo de -80 grados y el último ángulo es de 150 grados alrededor del eje Z. Esto implica tener que observar incrementos de ángulos en la dirección que corresponda según los movimientos realizados.

En este caso se comienza con el cuello flexionado, el primer movimiento que se lleva a cabo es llevar la cabeza a la posición original de la Figura 54. Cuando se alcanza esta posición, el sistema de referencia del sensor ha rotado en torno al eje Y su respectivo ángulo de Euler de -55 grados. Por lo

que se puede afirmar que el cuello se encontraba previamente flexionado un ángulo de 25 grados.

A continuación, se lleva a cabo la extensión del cuello (Figura 47), observando la curva naranja de la Figura 55 se puede afirmar que esta extensión llevada a cabo es de 55 grados ya que la curva alcanza el valor de 0 grados y posteriormente, se mueve la cabeza a la posición original de la Figura 54, la cual forma un ángulo de Euler en torno al eje Y de -55 grados.

Seguidamente se procede a realizar el movimiento de rotación del cuello. Este movimiento se ve representado en la curva de color gris de la Figura 55. La primera rotación llevada a cabo es hacia la izquierda ya que es un valor positivo, realizando la resta del valor final menos el valor inicial. Además, es un giro antihorario, por lo que, según la regla de signos establecida anteriormente, es un giro positivo. El incremento de este ángulo es de 40 grados. El siguiente movimiento que se realiza es una rotación hacia la derecha, en este caso el ángulo girado sería negativo, pero al ser un incremento no es necesario tener en cuenta el signo. Por tanto, la rotación lateral derecha es un incremento de 60 grados con respecto a la posición inicial.

El siguiente movimiento que se lleva a cabo es el movimiento de flexión lateral, este viene representado por la curva azul de la Figura 55. Primero se realiza una flexión lateral hacia la derecha de 50 grados y después una flexión lateral hacia la izquierda de 50 grados.

Por último, se hace una rotación completa del cuello formada por una composición de movimientos, como se aprecia en los últimos segundos de la Figura 55.

En esta composición de movimientos se han realizado dos extensiones de 30 grados y dos de 20 grados. También se ha flexionado el cuello dos veces 25 grados aproximadamente y una tercera vez con 30 grados. Todo lo anterior se observa en la curva naranja. Además, el cuello ha rotado tres veces hacia la izquierda con ángulos de 5 grados y otras cuatro veces hacia la derecha con ángulos de 20 y 10 grados, esto se puede comprobar en la curva amarilla. Por último, el cuello se ha flexionado lateralmente hacia la derecha con ángulos de 35, 20 y 30 grados y también se ha flexionado lateralmente hacia la izquierda tres veces con ángulos de 20, 25 y 30 grados aproximadamente.

En este ensayo, el triedro del sistema móvil del sensor no se encontraba alineado con el sistema de referencia global, por lo que, a la hora de calcular los ángulos rotados, se han tenido en cuenta los incrementos de estos.

6.3. Unidades de medida inerciales situadas en el tórax y en la frente.

El escenario final que será objeto de análisis consiste en la utilización de tres unidades de medida inerciales ubicadas en tres posiciones diferentes del cuerpo de una persona. La primera unidad se colocará en la coronilla de la persona, la segunda unidad en la región frontal, específicamente en la frente, y la tercera unidad se situará en el área del tórax como se muestra en la Figura 56.

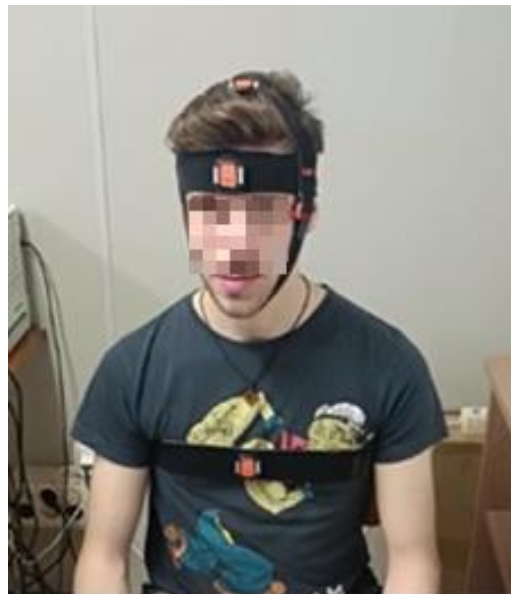


Figura 56. Posicionamiento de las IMUs en la coronilla, en la frente y en el tórax.

Al contar con tres unidades de medida inerciales posicionadas en sitios distintos, se podrá capturar y registrar de manera simultánea los movimientos y las variaciones en las posiciones de la cabeza y el torso. En este caso, al registrar valores con tres sensores, se va a expresar la rotación del sensor situado en la frente respecto del sensor situado en el tórax y se van a evaluar los ángulos independientes de la referencia global de la Tierra. Por otro lado, como comprobación, el sujeto lleva otra unidad inercial en la coronilla.

Se realiza la calibración de cada sensor con anterioridad al registro de los datos. Una vez realizado este procedimiento, se comienza con la toma de datos y para ello, se realizan los mismos movimientos que en los casos anteriores, representados en la Figura 47, Figura 48, Figura 49, Figura 50, Figura 51 y Figura 52. Estos movimientos se hacen cambiando las posiciones del tórax, el primero se lleva a cabo con el tórax erguido (véase Figura 57), a continuación, con el tórax inclinado hacia delante (véase Figura 58), luego torsionado (véase Figura 59) y finalmente inclinado de lado (véase Figura 60).



Figura 57. Secuencia de movimiento con el tórax erguido.



Figura 59. Secuencia de movimiento con el tórax torsionado.



Figura 58. Secuencia de movimiento con el tórax inclinado hacia delante.



Figura 60. Secuencia de movimiento con el tórax inclinado de lado

En la Figura 61, Figura 62 y Figura 63 se representan los registros brutos de los tres ángulos de Euler en grados en función del tiempo en segundos correspondientes a los 3 sensores. Tras el procesado correspondiente, según la metodología desarrollada en este trabajo, se pueden obtener los ángulos relativos entre la cabeza y el tórax (Figura 64). Para ello se toma como REF la

IMU situada en el tórax y como SAT, indistintamente la IMU de la frente o de la coronilla.

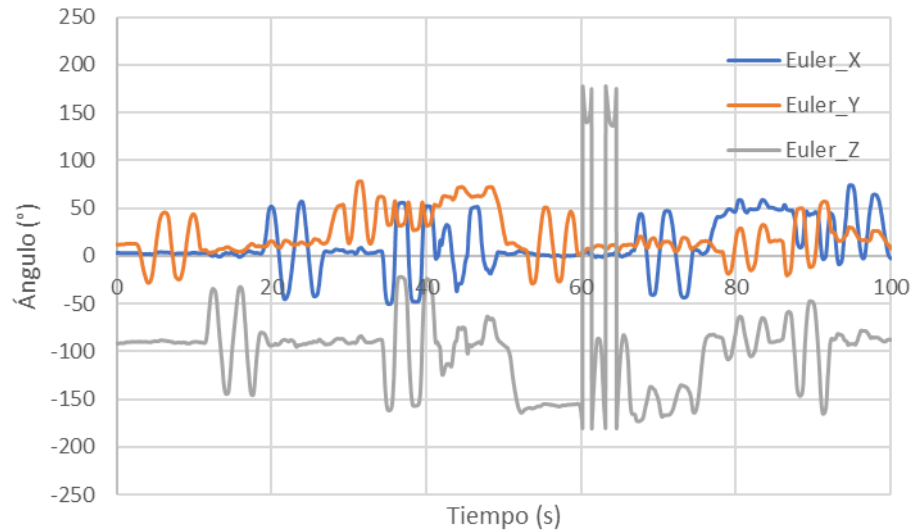


Figura 61. Rotaciones registradas por la IMU situada en la coronilla del sujeto.

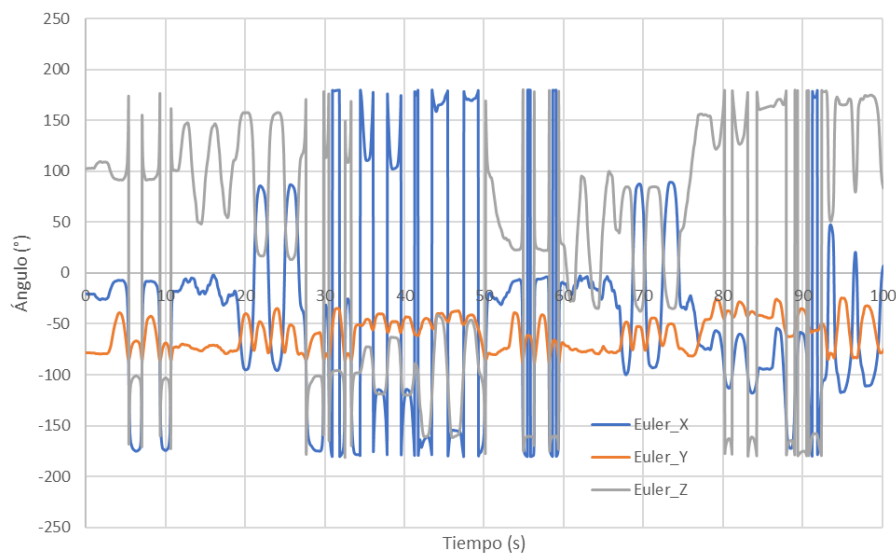


Figura 62. Rotaciones registradas por la IMU situada en la frente del sujeto.

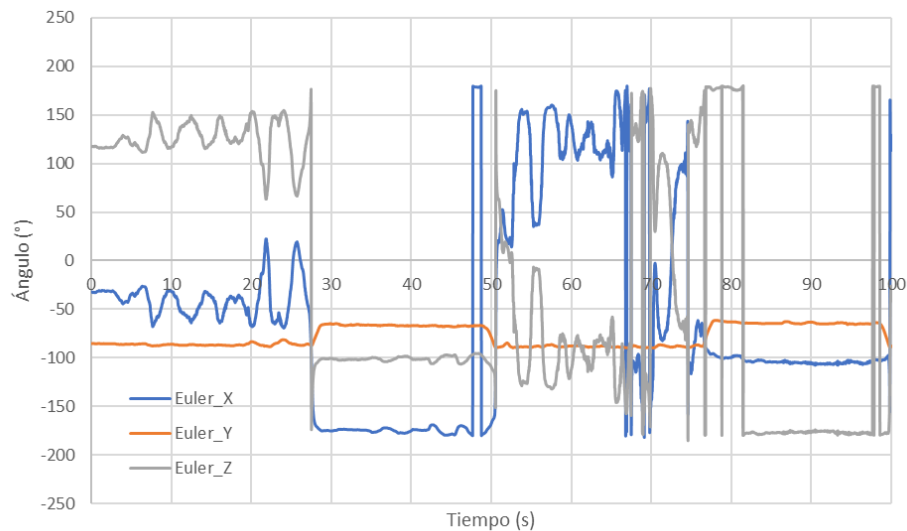


Figura 63. Rotaciones registradas por la IMU situada en el tórax del sujeto.

De la Figura 64, que indica la evolución de los ángulos relativos, se pueden extraer las siguientes conclusiones respecto a la secuencia de movimientos realizada por el sujeto. Para interpretar dicha figura, los giros en sentido antihorario son positivos y los giros en sentido horario negativos.

Entre los segundos 0 y 10 comienza el movimiento con una extensión de 40 grados, lo deshace y seguidamente flexiona el cuello con -30 grados, deshace este movimiento, se repite esta secuencia y se retorna a la posición inicial. Todo esto se observa en la curva naranja. Entre los segundos 10 y 20, se realizan dos rotaciones, una a cada lado del sujeto de aproximadamente 60 grados y se repite la secuencia, esto se aprecia en la curva azul. En el intervalo de tiempo de los segundos 20 y 30 se realizan dos flexiones laterales, una a cada lado del sujeto de aproximadamente 40 grados y se repite la secuencia, se comprueba esto en la curva gris. A partir, del instante de tiempo 30, se repiten estos movimientos en distintas posiciones como se observa en dicha figura.

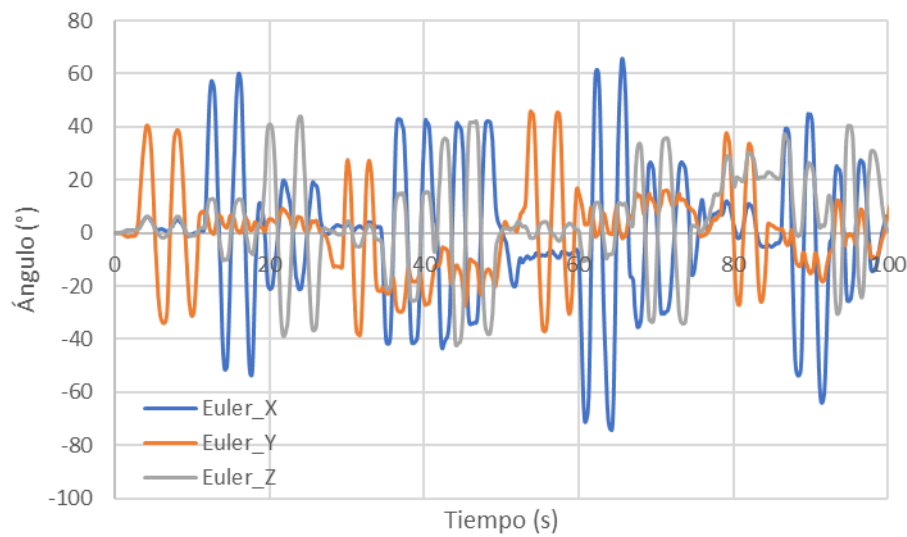


Figura 64. REF IMU situada en el tórax y SAT IMU situada en la frente.

En la Figura 65 se pueden apreciar los mismos movimientos que en la Figura 64. Sin embargo, como el sensor se encuentra ubicado en otra posición, los mismos movimientos los registran rotaciones en torno a ejes diferentes.

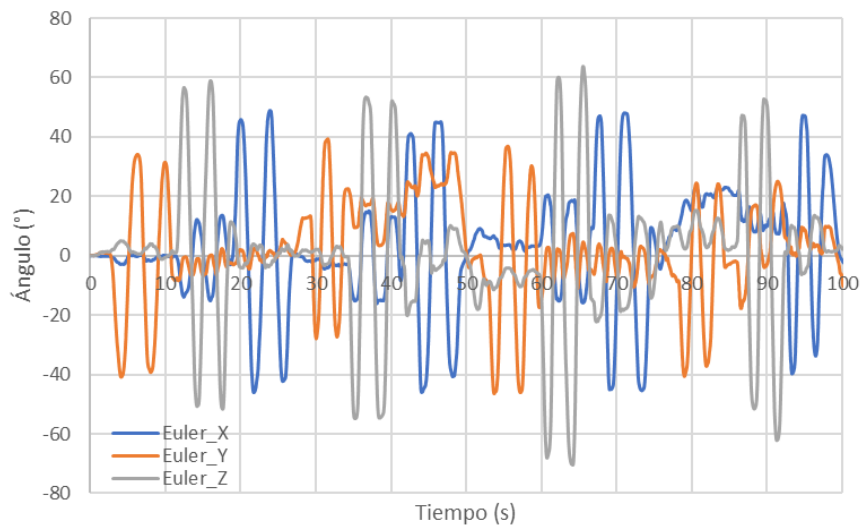


Figura 65. REF IMU situada en el tórax y SAT IMU situada en la coronilla.

CAPÍTULO 7. Conclusiones y líneas futuras.

7.1. Conclusiones.

El presente capítulo marca el cierre de este estudio, donde se han abordado diferentes aspectos y se ha explorado en profundidad una metodología para estimar ángulos entre la cabeza y el torso mediante sensores inerciales. A lo largo de este trabajo se ha buscado responder a preguntas clave y alcanzar los objetivos propuestos en el capítulo 1.

Se expondrá la intención de dar continuidad a este trabajo en el futuro, destacando las áreas de investigación que podrían explorarse en posteriores investigaciones. Se identificarán posibles líneas futuras de investigación y se argumentará la importancia y el potencial impacto de seguir avanzando en el tema en el apartado 7.2.

Se analizará el impacto ambiental del trabajo desarrollado, evaluando los efectos que pudieran derivarse de las acciones emprendidas buscando proponer recomendaciones y medidas mitigadoras que contribuyan a un enfoque más responsable desde el punto de vista ambiental. Asimismo, se realizará un análisis del costo económico asociado al trabajo realizado. Todo esto se desarrollará en el apartado 7.3.

Un logro significativo que se ha alcanzado en este trabajo ha sido comprender la instrumentación empleada, es decir, los sensores Xsens DOT de la empresa Movella. Estos sensores no habían sido utilizados previamente en el laboratorio con el objetivo de medir ángulos de Euler. Cabe destacar que dicha instrumentación se ha empleado con éxito previamente para medir aceleraciones.

En el capítulo 3 se describe la instrumentación utilizada con el fin de medir ángulos de Euler y en el anexo 1 se proporciona toda la información sobre el funcionamiento de los sensores. En estos apartados se describen los aspectos necesarios para la obtención de la aplicación móvil asociada, el uso práctico del sensor, los pasos para emparejar múltiples sensores, las diversas mediciones posibles, las magnitudes que puede capturar, los indicadores y funciones de los sensores, así como la exportación de los datos obtenidos.

Una vez adquirido un conocimiento profundo de la instrumentación empleada, se plantea la necesidad de verificar su calibración y la confiabilidad de los datos recopilados mediante los sensores correspondientes. Tras realizar las

debidas comprobaciones en el capítulo 4, se ha llegado a la conclusión de que la instrumentación demuestra un alto grado de confiabilidad y precisión. No obstante, se ha identificado la existencia de algunas discrepancias en las mediciones, por lo que se persigue una solución para corregir estas desviaciones.

Para llevar a cabo estas comprobaciones se ha seguido la metodología que se describe a continuación. Se realiza el procedimiento de calibración de dos IMUs con el fin de poderlo aplicar a todas aquellas que sea necesario. Para iniciar los registros, se hace coincidir los ejes de cada IMU con el sistema de referencia global de la Tierra de “Este-Norte-Arriba”.

Seguidamente, sin dejar de grabar con la misma unidad de medida inercial, se coloca en el torso de la persona en cualquier posición. En este instante se tendrá la información necesaria para realizar la transformación del sistema de referencia global al sistema del torso.

A continuación, se coloca la otra unidad inercial de tal manera que los ejes XYZ de su sistema de referencia coincidan con los ángulos biomecánicos que se quieren medir. Para el caso que ocupa esta IMU se situaría en la coronilla en posición horizontal. Esto permitirá que, tras las correspondientes transformaciones, los ángulos registrados tengan el significado biomecánico que se busca, es decir, la extensión, flexión, rotación y flexión lateral del cuello.

Posteriormente, esta unidad inercial, en vez de estar colocada en la coronilla, se colocará en un soporte más cómodo como puede ser la frente del sujeto. En este caso los ejes de su sistema no coinciden con los ángulos biomecánicos, por lo que habrá que llevar a cabo las correspondientes transformaciones.

Una vez ubicados los dos sensores en sus soportes, comienza el registro de los movimientos. Estos registran los ángulos de Euler correspondientes, pero con las transformaciones que sean necesarias se podrán calcular los ángulos relativos de la cabeza con respecto del torso denominados: extensión, flexión, rotación y flexión lateral, lo cual es el objetivo principal de este trabajo.

Por último, hay que destacar que para llegar a la obtención de los ángulos biomecánicos deseados: extensión, flexión, rotación y flexión lateral, ha sido necesario plantear diversos escenarios de los cuales no se obtenía ningún resultado fácilmente interpretable por lo que muchos de estos ensayos posteriormente han sido descartados y la tarea no ha sido sencilla.

Por consiguiente, se considera que se han alcanzado satisfactoriamente todos los objetivos establecidos y se han adquirido las competencias específicas contempladas en el plan de estudios en relación con el presente Trabajo de Fin de Grado (TFG). Específicamente, a nivel de objetivos, se ha

logrado la integración de los conocimientos y habilidades adquiridos a lo largo de la titulación, lo que ha conducido a un mayor grado de madurez académica.

Además, en términos de competencias, se ha logrado un notable desarrollo de la capacidad de análisis y síntesis, junto con una mejora sustancial en la habilidad de organizar y planificar. Asimismo, se ha fortalecido la capacidad de expresión, tanto oral como escrita, y se ha evidenciado una mejora significativa en el proceso de aprendizaje y en la habilidad de llevar a cabo un trabajo de forma autónoma. Igualmente, se ha fomentado una mayor capacidad de resolución de problemas, resiliencia a las adversidades y se ha observado un incremento en la motivación para alcanzar metas y buscar la mejora continua.

7.2. Líneas futuras.

En cuanto a las líneas futuras de investigación, se plantea como objetivo principal del presente procedimiento su sistematización y posterior extensión a otras articulaciones del cuerpo.

Dicha sistematización permitirá establecer un marco metodológico riguroso que asegure la replicabilidad y comparabilidad de los resultados obtenidos para su posterior análisis biomecánico. Asimismo, se pretende ampliar el alcance de este estudio a diferentes articulaciones de cuerpo, lo cual implicará adaptar y aplicar el mismo enfoque analítico a otras áreas anatómicas relevantes.

Conocer ángulos relativos girados de distintas partes del cuerpo presenta grandes beneficios y una comprensión más profunda de los movimientos y posturas del cuerpo humano. Esto puede ayudar a identificar patrones biomecánicos eficientes, lo que a su vez puede ser útil en el diseño de programas de entrenamiento, rehabilitación o ergonomía. Identificar los ángulos óptimos de las articulaciones durante movimientos específicos puede ayudar a maximizar la eficiencia, la potencia y reducir el riesgo de lesiones.

Además, el análisis de la biomecánica de la locomoción humana, considerando la utilización de múltiples miembros, es un área de estudio fundamental para comprender los movimientos y mecanismos involucrados en la marcha y el desplazamiento humano. Esta disciplina examina cómo el cuerpo humano se adapta y se mueve eficientemente durante actividades locomotoras como caminar, correr, saltar, subir o bajar escaleras, bailar o la práctica de cualquier deporte.

En este análisis se consideran aspectos como la coordinación y sincronización de los movimientos de las extremidades superiores e inferiores, la

distribución del peso corporal, la cinemática de las articulaciones y la generación de fuerza durante la fase de propulsión.

Un enfoque clave es la interacción entre las diferentes partes del cuerpo y cómo se relacionan entre sí durante la locomoción. Por ejemplo, al caminar, los movimientos de los brazos y las piernas están sincronizados para mantener el equilibrio y maximizar la eficiencia del movimiento. Además, se estudia cómo la columna vertebral y la pelvis se alinean y participan en la estabilización del cuerpo durante la marcha.

Asimismo, se investiga la influencia de factores externos, como el terreno y la velocidad, en la biomecánica de la locomoción humana. Estos aspectos pueden afectar la distribución del peso, los ángulos articulares y las fuerzas aplicadas en las diferentes articulaciones. Esto tiene aplicaciones en diversos campos, incluyendo la medicina deportiva, la rehabilitación, el diseño de prótesis y ortesis, así como en el desarrollo de tecnologías de asistencia para personas con movilidad reducida.

Otra posible línea futura sería de relacionada con realidad virtual. Con los datos registrados y procesados se podría animar a un avatar y analizar no solo las orientaciones espaciales de cada miembro en el sistema Tierra (lo que ya se hace de forma habitual en otras disciplinas como la animación de personajes de videojuegos) sino también los ángulos relativos en ejes predefinidos (con significado médico). En la Figura 66 se muestran 6 fotogramas con los primeros pasos en esta dirección.

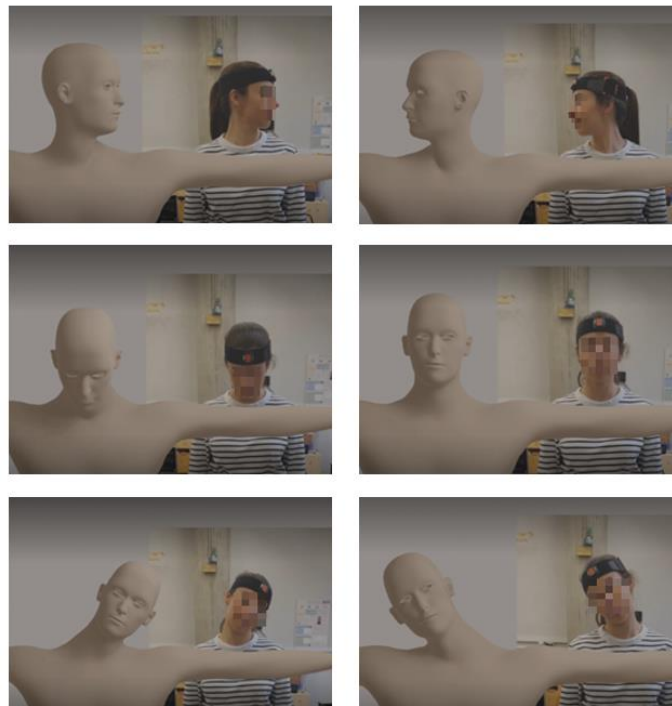


Figura 66. Animación de un avatar a partir de los datos registrados.

Otra línea futura interesante sería utilizar modelos de simulación computacional para predecir las fuerzas que se generan en las estructuras. Mediante la construcción de modelos basados en principios biomecánicos y datos obtenidos experimentalmente, se pueden realizar simulaciones que permitan estimar las fuerzas y las tensiones en las estructuras analizadas. Estas simulaciones pueden ayudar a comprender mejor las respuestas biomecánicas y a predecir cómo diferentes factores, como la carga, la postura o la velocidad, influyen en las fuerzas inducidas.

Se han establecido los fundamentos y concebido las nociones sobre cómo proseguir con las investigaciones y utilizar los dispositivos adecuadamente, tales como los manuales elaborados en el transcurso de esta labor, los cuales pueden resultar beneficiosos para cualquier tipo de proyecto que demande la utilización de dichos instrumentos de medición.

Tras esta experiencia se ha llegado a la conclusión de que la biomecánica constituye una disciplina de gran relevancia, con diferentes posibilidades, que ha ido ganando importancia con el paso de los años por sus innumerables aplicaciones. No obstante, también se constata que no es fácil caracterizarla debido a la imposibilidad de sistematizar las fuerzas o movimientos comunes, ya que cada uno de ellos presenta singularidades propias. Por consiguiente, se requerirá una notable cantidad de investigaciones para obtener una comprensión precisa de la mecánica del organismo humano o, al menos, de una fracción de la misma.

7.3. Consideraciones adicionales.

En relación con la realización de este Trabajo de Fin de Grado, es conveniente destacar que no se ha utilizado ningún material peligroso ni se ha causado contaminación ambiental durante su desarrollo, más allá de la correspondiente energía consumida. El único impacto ambiental que podría mencionarse se producirá en el futuro, cuando se desechen los materiales empleados. También es relevante mencionar el pequeño impacto que se generará al finalizar el ciclo de vida de las unidades inerciales y otros componentes electrónicos del ordenador.

Con el fin de minimizar dicho impacto, toda la instrumentación utilizada queda a disposición de futuros alumnos que puedan emplearla en la elaboración de sus propios Trabajos de Fin de Grado, de modo que pueda ser reutilizada hasta que llegue al final de su ciclo de vida. Además, para reducir aún más el impacto, todo el material puede ser reciclado.

Para iniciar este trabajo, se requirió invertir una cantidad significativa de tiempo en aprender a utilizar los sensores empleados. Esto implicó la

instalación de diversas aplicaciones tanto en el ordenador como en un dispositivo móvil, así como adquirir conocimientos sobre el manejo de estas y la descarga y proceso de los datos proporcionados por dichos sensores en programas informáticos.

Durante el desarrollo de este estudio, se han planteado diversos escenarios y se han realizado numerosos ensayos. Sin embargo, muchos de estos ensayos no han arrojado resultados fácilmente interpretables, lo que ha llevado a descartarlos en el proceso.

El proceso de obtener los ángulos relativos deseados ha implicado un análisis exhaustivo y la superación de diversos obstáculos. A pesar de ellos y los ensayos descartados, se ha logrado un progreso significativo hacia la consecución de los resultados deseados. Cada experiencia ha sido una oportunidad para aprender y mejorar, y ha sido un paso fundamental en la búsqueda de soluciones precisas y coherentes.

Para llevar a cabo la elaboración de escenarios y la recolección de datos que posteriormente se descartaron, se invirtieron un total de 100 horas. En cuanto a la reflexión sobre posibles soluciones para la interpretación de los datos, en conjunto con la creación de los escenarios finales, se estima que esta fase del Trabajo de Fin de Grado (TFG) demandó aproximadamente 250 horas. Una vez concluida la fase experimental, se procedió a redactar el informe final y a preparar la presentación, actividades que ocuparon alrededor de 100 horas. Al sumar ambos períodos, el tiempo total de dedicación en el desarrollo de este trabajo asciende a 450 horas.

También es posible realizar una estimación del coste, considerando que un ingeniero en formación tiene un salario promedio de alrededor de 20,000 € al año, trabajando aproximadamente 1,800 horas al año. Al realizar el cálculo correspondiente, se obtiene un promedio de 11.2 € por hora. Para determinar el valor monetario de esta inversión de tiempo, se multiplican las horas dedicadas por la tarifa horaria de 11.2 €/h, que corresponde al salario medio de un ingeniero. De esta manera, se obtiene un coste total de 5,040 €.

REFERENCIAS

- [1] J. K. PhD, «Connecting the dots in human motion,» [En línea]. Available: <https://www.xsens.com/hubfs/Downloads/Software/DOT/Xsens%20DOT%20E-Book/XsensDOT%20Connecting%20the%20Dots.pdf>. [Último acceso: 05 julio 2023].
- [2] FisioOnline, «BIOMECÁNICA,» [En línea]. Available: <https://www.fisioterapia-online.com/glosario/biomecanica>. [Último acceso: 05 julio 2023].
- [3] EUROINNOVA, «Qué es la biomecánica,» [En línea]. Available: <https://www.euroinnova.edu.es/blog/que-es-la-biomecanica>. [Último acceso: 05 julio 2023].
- [4] fisiocampus, «Beneficios y elementos de una adecuada biomecánica corporal,» 06 marzo 2021. [En línea]. Available: <https://www.fisiocampus.com/articulos/beneficios-y-elementos-de-una-adecuada-biomecanica-corporal>. [Último acceso: 05 julio 2023].
- [5] E. R. D'ALCALA', *Xsens DOT Wearable Sensor Platform*, Enschede: Movella Technologies, 2023.
- [6] M. F. Richard Hsiao, «OpenSim Documentation,» 2017. [En línea]. Available: <https://simtk-confluence.stanford.edu:8443/pages/viewpage.action?pageId=21006395>. [Último acceso: 05 julio 2023].
- [7] de-design, «Design a small lightweight wearable sensor, that can be used for high percision motion tracking.,» 2020. [En línea]. Available: <https://de-design.nl/portfolio/xsens-dot/>. [Último acceso: 05 julio 2023].
- [8] enfermeriacelayane, «Licenciatura en Enfermería y Obstetricia,» 10 abril 2018. [En línea]. Available: <https://blogs.ugto.mx/enfermeriaenlinea/unidad-didactica-2-a-conocimiento-de-la-goniometria-para-la-valoracion-de-los-arcos-de-movilidad/>. [Último acceso: 05 julio 2023].
- [9] W. R. V. Toro, Valencia: Universidad politécnica de Valencia, 2021.
- [10] Physiopedia, «Cervical Vertebrae,» [En línea]. Available: https://www.physio-pedia.com/Cervical_Vertebrae. [Último acceso: 05 julio 2023].

05 julio 2023].

- [11] Departamento C.A., I.T., M.M.C. y Teoría de Estructuras de la Escuela de Ingenierías Industriales de la Universidad de Valladolid, «StruDyn», [En línea]. Available: <https://www.strudyn.uva.es/>. [Último acceso: 05 julio 2023].
- [12] M. F. Cheliz, «Estudio experimental, computacional y analítico de la mecánica de un péndulo», 2022. [En línea]. Available: <https://uvadoc.uva.es/handle/10324/53806>. [Último acceso: 05 julio 2023].
- [13] E. R. Aznar, «Leonhard Euler», Universidad de Granada, 2007. [En línea]. Available: <https://www.ugr.es/~eaznar/euler.htm>. [Último acceso: 08 07 2023].
- [14] B. y. Johnston, Mecánica Vectorial para Ingenieros. Dinámica., McGraw Hill, 2007.
- [15] E. W. Weisstein, «Euler Angles», MathWorld—A Wolfram Web Resource, [En línea]. Available: <https://mathworld.wolfram.com/EulerAngles.html>. [Último acceso: 08 07 2023].
- [16] J. A. Batlle, Mecánica de la partícula y del sólido rígido, Barcelona: OK Punt, 2000.
- [17] a. R. P. Michael A. Gottlieb, «feynmanlectures», California Institute of Technology, 1963, 2006, 2013. [En línea]. Available: https://www.feynmanlectures.caltech.edu/I_toc.html. [Último acceso: 08 07 2023].
- [18] J. J. Craig, Introduction to Robotics, Mechanics and Control, 3rd ed., Upper Saddle River, NJ: Pearson Prentice Hall, Pearson Education International, 2005.
- [19] K. B. a. M. A.-A. T. Cudejko, «Validity of orientations and accelerations measured using Xsens DOT inertial measurement unit during functional activities», *Gait Posture*, vol. 97, pp. S341 - S342, 2022.
- [20] D.-R. E. A. K. T. R. R. M. B. a. A. T. A. A. Sarker, «Capturing Upper Body Kinematics and Localization with Low-Cost Sensors for Rehabilitation Applications», *Sensors*, vol. 22, n° 6, p. 2300, 2022.
- [21] S. Y. e. al., «KneTex – Improvements to a textile-integrated sensor system for feedback-supported rehabilitation after ACL surgery», *Current Directions in Biomedical Engineering*, vol. 7, n° 2, pp. 480-483, 2021.
- [22] A. G. S. a. E. N. N. Schlage, «Development of a mobile, cost-effective and easy to use inertial motion capture system for monitoring in

- rehabilitation applications,» *Current Directions in Biomedical Engineering*, vol. 7, nº 2, pp. 586-589, 2021.
- [23] Movella, «Xsens DOT User Manual,» 2023.
- [24] WayBackMachine, «Principio de funcionamiento del IMU.,» [En línea]. Available: <https://web.archive.org/web/20171107221625/http://www.technaid.com/es/soporte/investigacion/principio-de-funcionamiento-del-imu/>. [Último acceso: 08 07 2023].
- [25] Xsens by Movella, «Orientation-output-specifications,» 01 02 2022. [En línea]. Available: https://base.xsens.com/s/article/Orientation-output-specifications?language=en_US. [Último acceso: 08 07 2023].
- [26] B. Contreras, «Neck Training 101,» 04 11 2011. [En línea]. Available: <https://bretcontreras.com/neck-training-101/>. [Último acceso: 08 07 2023].
- [27] R. P. C. D. J. N. Amy V. Lavallee, «Developmental biomechanics of neck musculature,» *Journal of Biomechanics*, vol. 46, nº 3, pp. 527-534, 2013.
- [28] Aula de anatomía, «Músculos del cuello,» [En línea]. Available: <https://www.auladeanatomia.com/es/sistemas/337/musculos-del-cuello>. [Último acceso: 08 07 2023].
- [29] Centro médico Respirar, «¿DOLOR CERVICAL? ¿CUÁNTAS HORAS AL DÍA HACE USO DE SU CELULAR?,» [En línea]. Available: <https://centromedicorespirar.com/2021/07/12/dolor-cervical-cuantas-horas-al-dia-hace-uso-de-su-celular/>. [Último acceso: 08 07 2023].
- [30] B. Navarro, «Músculos del cuello,» KENHUB, julio 2023. [En línea]. Available: <https://www.kenhub.com/es/library/anatomia-es/musculos-del-cuello>. [Último acceso: 08 07 2023].
- [31] M. V. Sanabria, «Anatomía y exploración física de la columna cervical y torácica,» 09 2012. [En línea]. Available: https://www.scielo.sa.cr/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1409-00152012000200009#:~:text=Son%20la%20atlanto%20occipital%20y,inclinaci%C3%B3n%20lateral%20de%20la%20cabeza. [Último acceso: 08 07 2023].
- [32] B. Navarro, «Columna vertebral,» KENHUB, julio 2023. [En línea]. Available: <https://www.kenhub.com/es/library/anatomia-es/columna-vertebral>. [Último acceso: 08 07 2023].
- [33] Healthwise, «Problemas y lesiones en el cuello,» Cigna healthcare, 09

- 11 2022. [En línea]. Available: <https://www.cigna.com/es-us/knowledge-center/hw/temas-de-salud/problemas-y-lesiones-en-el-cuello-necpn>. [Último acceso: 08 07 2023].
- [34] Xsens by Movella, «Xsens-DOT-Synchronization-Explained,» 04 10 2022. [En línea]. Available: https://base.xsens.com/s/article/Xsens-DOT-Synchronization-Explained?language=en_US. [Último acceso: 08 07 2023].
- [35] Xsens by Movella, «Xsens-DOT-Server,» 25 01 2023. [En línea]. Available: https://base.xsens.com/s/article/Xsens-DOT-Server?language=en_US. [Último acceso: 08 07 2023].
- [36] Xsens by Movella, «How-to-perform-a-Magnetic-Field-Mapping-on-Xsens-DOT,» 24 03 2022. [En línea]. Available: https://movella.my.site.com/XsensKnowledgebase/s/article/How-to-perform-a-Magnetic-Field-Mapping-on-Xsens-DOT?language=en_US. [Último acceso: 08 07 2023].
- [37] Xsens by Movella, «The-minimum-requirements-to-install-the-Xsens-DOT-app-and-the-SDKs,» 25 01 2023. [En línea]. Available: https://base.xsens.com/s/article/The-minimum-requirements-to-install-the-Xsens-DOT-app-and-the-SDKs?language=en_US. [Último acceso: 08 07 2023].
- [38] Xsens by Movella, «Xsens-DOT-APP-Guide-v2020-4,» 14 02 2022. [En línea]. Available: https://base.xsens.com/s/article/Xsens-DOT-APP-Guide-v2020-4?language=en_US. [Último acceso: 08 07 2023].
- [39] Xsens by Movella, «Movella-DOT-Quick-Start-Guide,» 25 01 2023. [En línea]. Available: https://base.xsens.com/s/article/Movella-DOT-Quick-Start-Guide?language=en_US. [Último acceso: 08 07 2023].
- [40] Proyecto corazón a salvo, «Collarín cervical,» [En línea]. Available: <https://www.corazonasalvo.es/material-sanitario-rescate/94-collarin-cervical-8436593930523.html>. [Último acceso: 08 07 2023].



ANEXOS

ANEXO 1. Parte operativa de los sensores Xsens DOT.

Aplicación Xsens DOT para dispositivo móvil.

Xsens DOT es una plataforma de desarrollo de dispositivos portátiles que contienen un sensor equipado con un acelerómetro 3D, un giroscopio y un magnetómetro con el fin de ofrecer una orientación 3D precisa. El procesador integrado en el sensor se encarga del muestreo e integración de datos inerciales. Estos sensores tienen la capacidad de proporcionar una orientación 3D en tiempo real, datos de aceleración lineal 3D, velocidad angular 3D y campo magnético (terrestre) hacia un dispositivo receptor.

Los sensores disponen de una transmisión inalámbrica de datos mediante Bluetooth 5.0. que permite vincular los sensores a un dispositivo móvil a través de la instalación de la aplicación Xsens DOT [23], disponible tanto para sistemas operativos iOS como Android. De este modo, se logra el seguimiento preciso de movimientos del cuerpo humano.

Con el objetivo de brindar una descripción completa de la funcionalidad, de las diversas capacidades que ofrece este dispositivo y de proporcionar instrucciones claras sobre su utilización, se ha dedicado esta sección a la elaboración de un manual de uso. Asimismo, se aborda la resolución de fallos eventuales, inconvenientes o posibles limitaciones que puedan presentar los aparatos.

Conexión.

A continuación, se detalla cómo se realiza la conexión entre el sensor y el dispositivo móvil. En primer lugar, se inicia la aplicación y se acepta el consentimiento para hacer el uso de la conexión Bluetooth. Una vez que se ha aceptado dicho consentimiento, se accede a la pantalla que se muestra en la Figura 67 en la cual se distinguen tres pestañas.

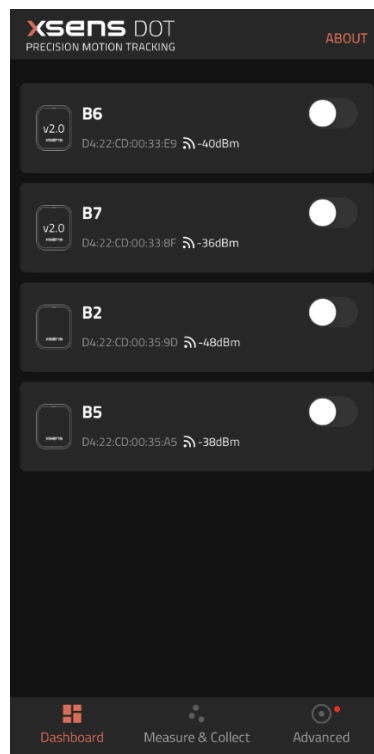


Figura 67. Pantalla inicial de la aplicación Xsens DOT.

La primera pestaña denominada “*Dashboard*”, muestra el estado de los sensores. En esta sección se visualizan todos los sensores que se encuentren encendidos. Se pueden vincular fácilmente permitiendo emparejar simultáneamente tantos como se quiera. No hay un límite establecido en ningún software proporcionado por Xsens, pero para obtener mejores prácticas sobre la conexión de múltiples sensores, las limitaciones de hardware y sistema operativo de los dispositivos centrales establecen un límite máximo al número de sensores que se pueden conectar simultáneamente. Para Android, MacOS y Windows, se recomienda conectar hasta 7 sensores. En iOS, Linux PC o Raspberry Pi, se pueden conectar hasta 11 sensores. La capacidad real de conexión está determinada por las características específicas del dispositivo que se elija [23].

Para establecer la conexión de un sensor DOT, es necesario seleccionar el interruptor de palanca pulsando sobre él, correspondiente al sensor deseado. Una vez se haya logrado la conexión, el sensor quedará destacado visualmente y se mostrará un mensaje emergente en la parte inferior de la pantalla como se puede observar en la Figura 68. En dicha figura se aprecia que los sensores destacados en rojo son aquellos que están conectados. Además, se puede visualizar información como la etiqueta de nombre que tiene asignada cada sensor, la dirección MAC que es un identificador único para cada dispositivo, el estado de la batería del sensor o la tasa de salida que indica el número de muestras por segundo. Manteniendo pulsado sobre

el icono de un sensor, se despliega una ventana adicional con más información y ofrece la posibilidad de apagar el sensor o cambiar su nombre asignado como se observa en la Figura 69.

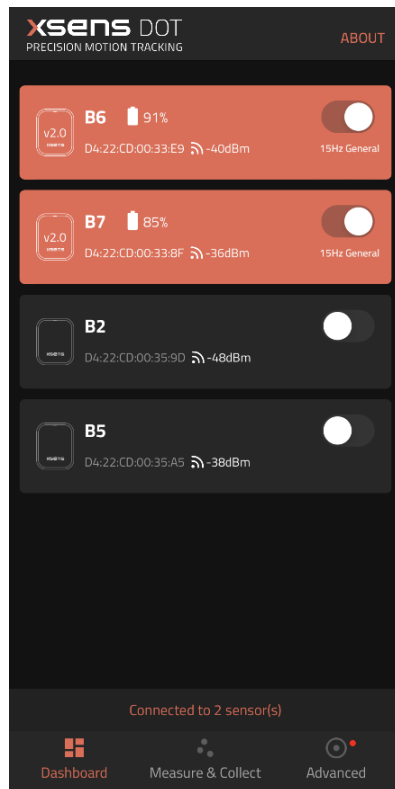


Figura 68. Conexión de los sensores.

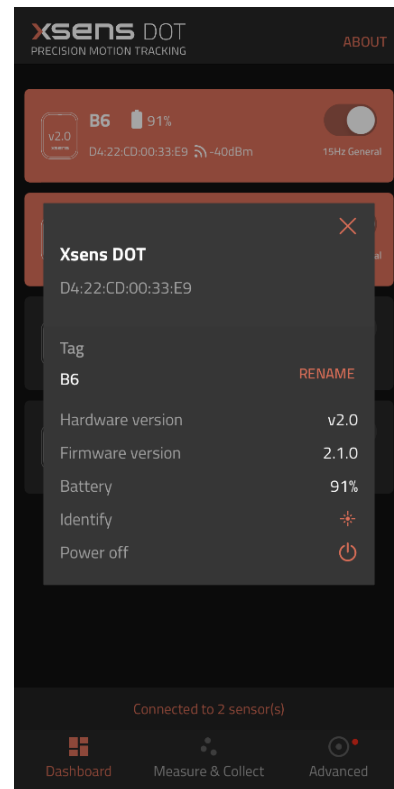


Figura 69. Detalles de un sensor.

El sensor activará el modo de ahorro de energía si no se inicia ninguna conexión durante más de treinta minutos. En la aplicación Xsens DOT, se iniciará automáticamente una reconexión una vez que se pierda la conexión. Si el dispositivo que se quiere enlazar con los sensores no los detecta, o no logra conectarlos cuando se pulsa el interruptor, se recomienda reiniciar el bluetooth del dispositivo.

Elección de la frecuencia de salida.

Una vez que los sensores Xsens DOT estén debidamente conectados, en la segunda pestaña “Measure & Collect” se requiere seleccionar las configuraciones óptimas para adecuarlas a las aplicaciones para las que se van a utilizar los sensores.

Dentro de esta segunda pestaña, se ofrece la posibilidad de elegir la cantidad de datos que se almacenarán cada segundo. Las frecuencias de salida

disponibles son: 1Hz, 4Hz, 10Hz, 12Hz, 15Hz, 20Hz, 30Hz, 60Hz y 120Hz (véase Figura 70). Si se selecciona una frecuencia más baja, se transmiten menos datos por unidad de tiempo por lo que se almacenará menos información y se extenderá el tiempo de grabación. La tasa de salida más alta, 120Hz, solo se encuentra disponible en el modo de grabación (*Recording (offline mode)*).

Para calcular la orientación tridimensional del sensor, es necesario realizar suposiciones sobre el rango de la aceleración y el campo magnético. Debido a que estas cantidades pueden variar entre diferentes aplicaciones de usuario, se introducen dos perfiles de filtro para mejorar la precisión de la estimación de la orientación.

El primer perfil de filtro se denomina “*General*” y es la configuración predeterminada. Este perfil supone una dinámica moderada y un campo magnético homogéneo, considera que la distorsión magnética externa es relativamente corta. El segundo perfil de filtro se denomina “*Dynamic*” y es para movimientos rápidos y bruscos que duran poco tiempo. Este filtro se utiliza cuando se emplean los sensores en personas para deportes como carreras de velocidad (véase Figura 71).

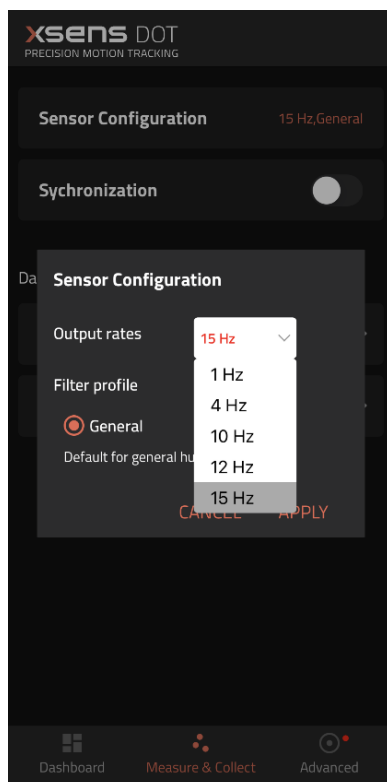


Figura 70. Selección de la frecuencia de salida.

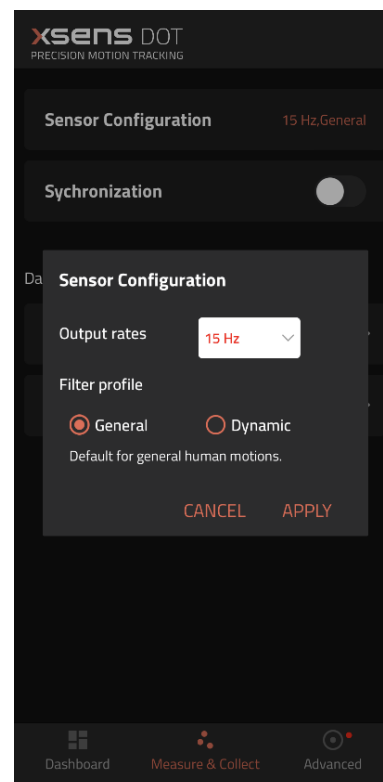


Figura 71. Selección del perfil de filtro.

Sincronización.

Cada sensor opera en su propio dominio temporal. Por consiguiente, es importante asegurar la sincronización temporal de los datos de medición entre sensores distintos, especialmente en escenarios donde se requiere el funcionamiento simultáneo de múltiples sensores.

Todos los sensores se sincronizarán con una base de tiempo común después de haber elegido la frecuencia de salida. A medida que el reloj del sensor se desvía, la precisión de la sincronización disminuirá con el tiempo (véase Tabla 3).

Tabla 3. Precisión de sincronización [23].

Tiempo	Precisión
Después de 30 min	1 ppm (1,8 ms)
Después de 1 hora	4 ppm (10 ms)

Para llevar a cabo esta sincronización, se pulsa el interruptor de palanca “Synchronization” que se encuentra en la segunda pestaña denominada “Measure & Collect” como se observa en la Figura 72. Esto tardará 14 segundos aproximadamente. Durante este proceso, un sensor actuará como nodo raíz, mientras que los demás sensores funcionarán como nodos exploradores. El nodo raíz enviará mensajes a los nodos exploradores en intervalos regulares de tiempo y estos últimos utilizarán la información recibida para corregir su propio dominio temporal, calculando la desviación y el desfase de sus relojes respecto al nodo raíz. En la aplicación Xsens DOT, en nodo raíz será el primer sensor conectado.

Es necesario realizar esta sincronización antes de la toma de medidas con el fin de garantizar que todos los datos provenientes de los sensores están sincronizados en tiempo. Una vez realizada la sincronización, se pueden iniciar y detener múltiples mediciones sin necesidad de una sincronización adicional. Si se quiere conocer más sobre esta sincronización, consultar [34].

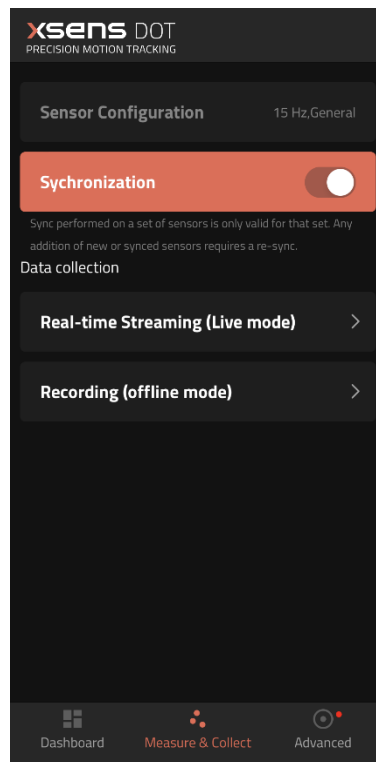


Figura 72. Pestaña “Measure & Collect”.

En el archivo generado con el registro de los datos medidos por los sensores, se podrá comprobar que los valores del tiempo de muestreo son idénticos para cada sensor. Debido a que el comando de inicio transmitido a través de Bluetooth tiene distintos retrasos entre cada sensor, es posible que los sensores muestren varios paquetes de datos adicionales que deben tenerse en cuenta a la hora de analizar la información. Con el fin de simplificar, los paquetes adicionales pueden ser eliminados durante el procesamiento posterior.

Mediciones y toma de datos

Una vez se han conectado y sincronizado los sensores, se procede a realizar las mediciones y toma de datos. Para llevar a cabo este proceso es posible elegir entre dos modalidades de medición. Esto permite adaptarse a las necesidades específicas del proyecto, una mayor flexibilidad y adaptabilidad en la toma de datos.

Transmisión en tiempo real (Real-Time Streaming (Live mode))

Para acceder a esta modalidad de medición, se debe pulsar sobre la opción “Real-time Streaming (Live mode)”, los datos se transmiten y registran

en un dispositivo central a través de una conexión Bluetooth constante durante toda la grabación.

Los datos se escriben en un archivo según se van recibiendo en el teléfono. Además, se dispone de distintos modos de grabación como se observa en la Figura 73: datos de fusión de sensores (*Sensor Fusion Data*), datos inerciales (*Inertial Data*) y modos personalizados (*Custom Modes*).

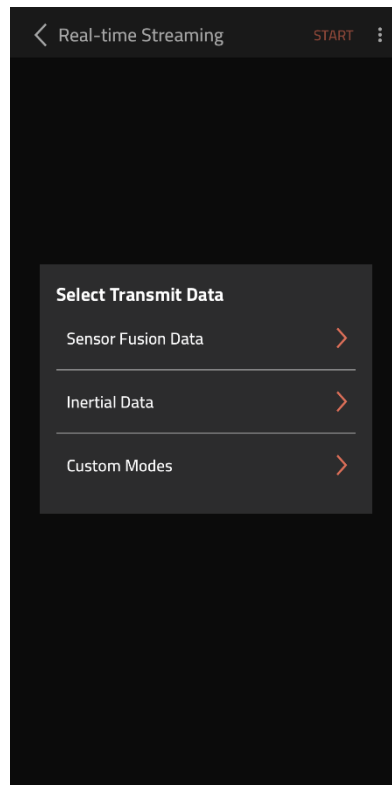


Figura 73. Modos de grabación.

La primera opción del registro de datos a tiempo real, “*Sensor Fusion Data*” (véase Figura 74), consiste en realizar un registro de la orientación mediante los ángulos de Euler o cuaternios y de la aceleración. La segunda opción, “*Inertial Data*” (véase Figura 75), consiste en registrar la aceleración y la velocidad angular junto con el campo magnético. La última opción, “*Custom Modes*”, ofrece la posibilidad de seleccionar distintos modos predeterminados, en el que cada uno se encarga de realizar el registro de unas magnitudes concretas. Se aprecian en la Figura 76 cinco combinaciones distintas.

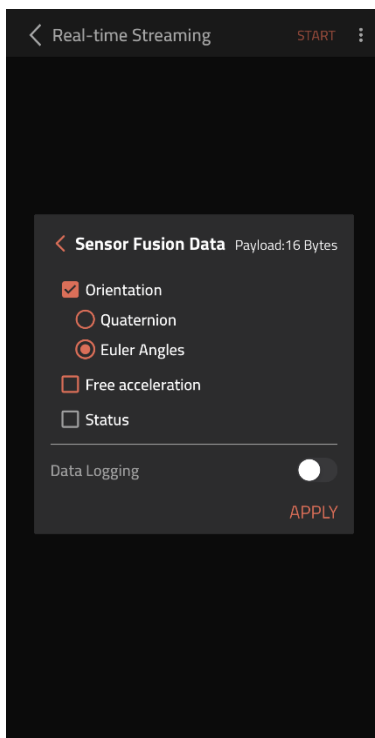


Figura 74. Modo de grabación "Sensor Fusion Data".

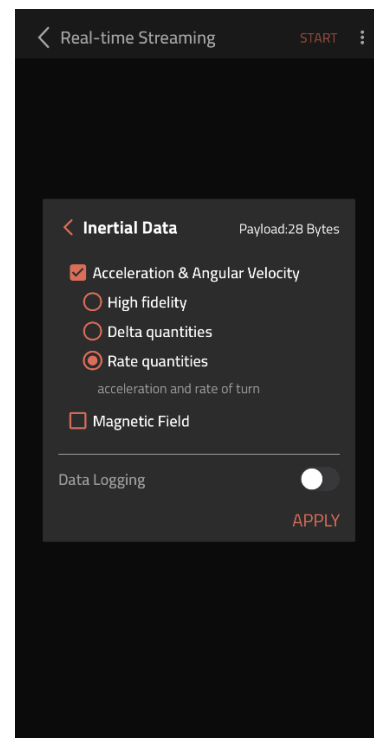


Figura 75. Modo de grabación "Inertial Data".

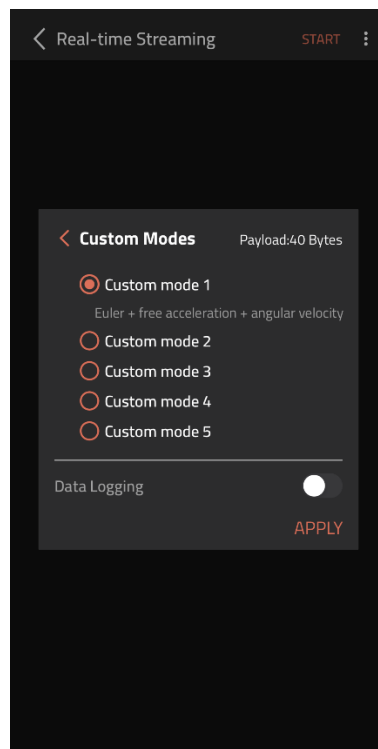


Figura 76. Modo de grabación "Custom Modes".

Para guardar los datos registrados en cualquiera de estos modos, se debe de activar el interruptor de palanca llamado “Data Logging”.

Una vez seleccionado el modo se pulsa “APPLY”, se comienza con la toma de datos y se dibujan las gráficas de los parámetros seleccionados como se muestra en la Figura 77. Para detener la medición es necesario hacer clic sobre el botón “STOP” situado en la esquina superior derecha. Si se quiere comenzar de nuevo la medición, se debe pulsar el botón “START” situado también en la esquina superior derecha para comenzar la medición.

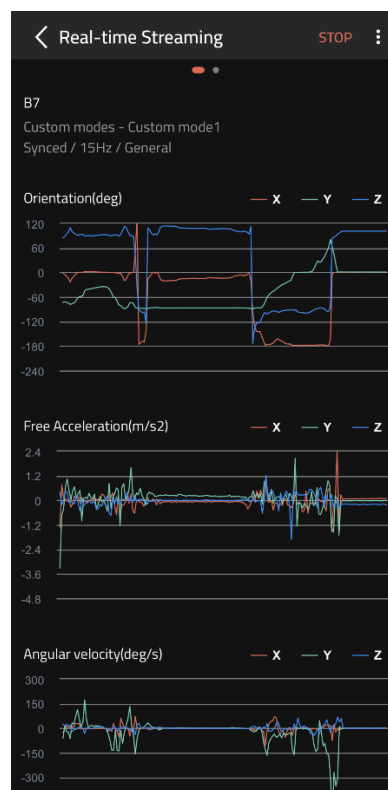


Figura 77. Gráficas en el modo “Real-time Streaming (Live mode)”.

Si se ha activado el interruptor “Data Logging”, se guarda un archivo con extensión “.csv” distinto para cada sensor utilizado, en la memoria del teléfono. Para exportar este archivo al ordenador, se debe conectar el móvil mediante el cable adecuado y buscar en su almacenamiento interno. Los archivos estarán nombrados según AñoMesDía_HoraMinutos. Posteriormente cada archivo se puede abrir con el programa “Microsoft Excel” y el contenido del archivo depende del modo de medición elegido previamente.

Grabación (Recording (offline mode))

Si se pulsa sobre la opción “Recording (offline mode)” se accede a otro modo de grabación (véase Figura 78) que consiste en almacenar los datos de la grabación en el almacenamiento interno del propio sensor, ya que estos tienen una memoria interna de 64 MB. Este modo no requiere una conexión Bluetooth constante con el teléfono después de la activación.

En este modo se muestra cada sensor conectado con su cantidad relativa de almacenamiento en su memoria y el tiempo de grabación. El tiempo máximo de grabación para cada sensor depende de la frecuencia seleccionada. A medida que aumenta la frecuencia seleccionada, el tiempo de grabación disponible disminuye.

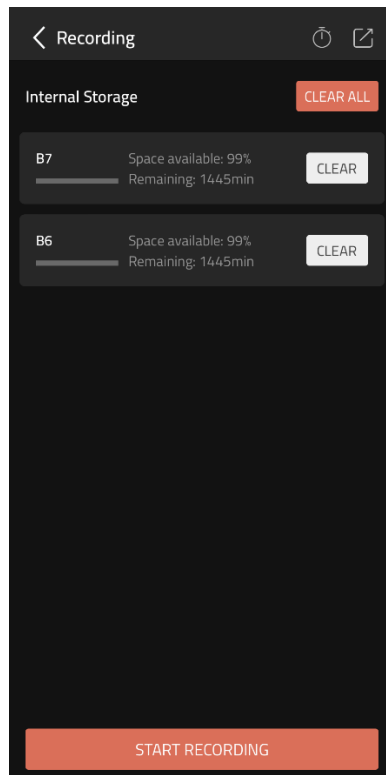


Figura 78. Modo de grabación “Recording (offline mode)”.

Presionando el botón “clear” que se aprecia en la Figura 78 situado junto a cada sensor, se libera espacio en la memoria del sensor. También se puede pulsar “clear all” ubicado en la esquina superior derecha para limpiar los datos de todos los sensores.

Existe la posibilidad de configurar una grabación con temporizador que detendrá automáticamente la grabación después de un tiempo determinado. Para configurar este temporizador, se debe de pulsar sobre el icono del reloj

situado en la esquina superior derecha. Se activa el interruptor “Set Recording Timer”, se desplaza el círculo rojo en función del tiempo deseado de grabación y por último se pulsa en “CONFIRM” (véase Figura 79).

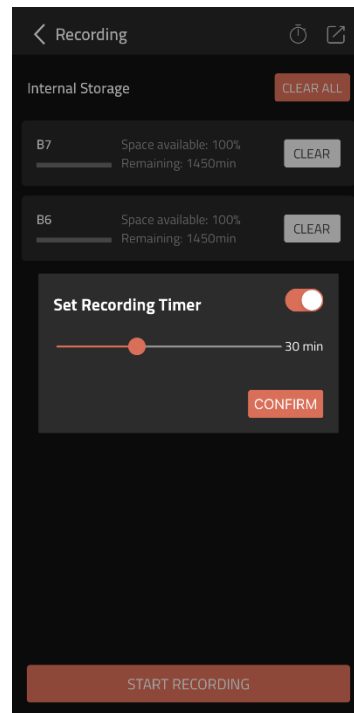


Figura 79. Configuración del temporizador.

Una vez se hayan realizado todas las configuraciones necesarias, se selecciona el botón “START RECORDING”, situado en la parte inferior de la pantalla (véase Figura 78) para iniciar la grabación. Después de comenzar la grabación, se muestran todos los sensores con el tiempo transcurrido desde el inicio de la grabación y su estado actual, se observa esto en la Figura 80.

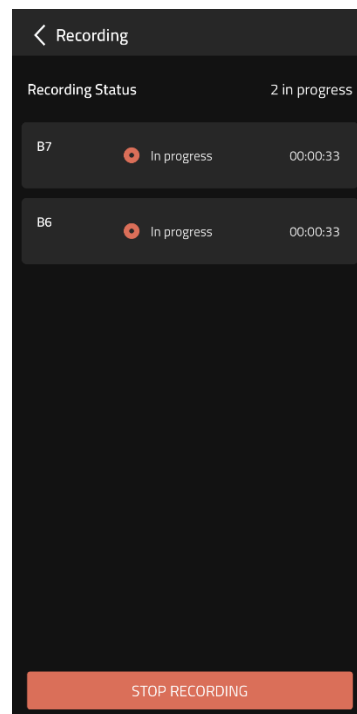


Figura 80. Grabación.

Para detener la grabación, se presiona el botón “*STOP RECORDING*” situado en la parte inferior de la pantalla (véase Figura 80). También se puede detener la grabación presionando el botón central del sensor durante aproximadamente un segundo. Los sensores deben de estar dentro del alcance Bluetooth del teléfono.

Una vez finalizada la toma de medidas, los datos obtenidos se pueden exportar de dos formas distintas, ofreciendo así opciones para su posterior análisis y uso. Ambas generan archivos con extensión “.csv” que son valores separados por comas, lo que permite una fácil compatibilidad y manipulación en diversas aplicación y programas de análisis de datos. La elección de la forma de exportación dependerá de las necesidades y de los dispositivos disponibles. Con estas opciones se asegura una adecuada transferencia y disponibilidad de los datos.

Exportación de datos mediante Bluetooth

Para acceder a la interfaz de exportación mediante bluetooth, se debe de pulsar el botón cuadrado que se sitúa en la esquina superior derecha (véase en la Figura 78). Se seleccionan los archivos de grabación que se desean exportar para cada sensor activando la casilla de verificación correspondiente a cada archivo (véase Figura 81).

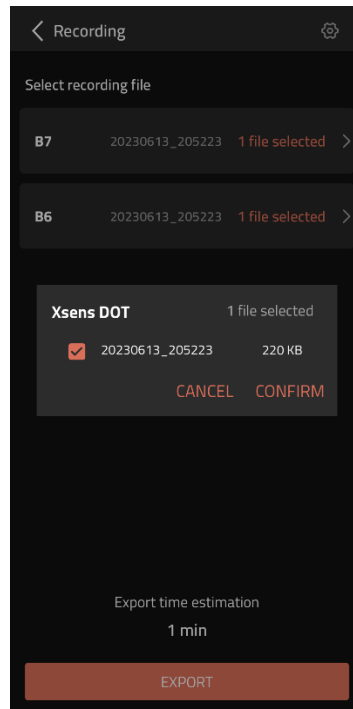


Figura 81. Selección archivos de grabación a exportar.

Una vez se hayan seleccionado los archivos que se desean exportar, para elegir los datos que se quieren descargar, se debe de pulsar en el icono de la rueda dentada que se encuentra en la esquina superior derecha (véase Figura 81). Posteriormente se abrirá una ventana en la que es posible marcar las casillas de los parámetros que se necesitan. En la Figura 82 se seleccionan los ángulos de Euler. Cuando se hayan seleccionado los parámetros se debe de pulsar en “CONFIRM”.

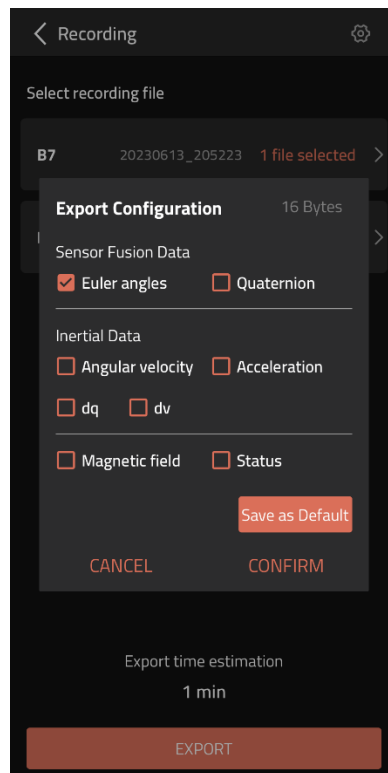


Figura 82. Selección ángulos de Euler.

Si se pulsa en el botón “Save as Default” (véase Figura 82) se almacena la configuración seleccionada y se utiliza como predeterminada para todas las futuras exportaciones.

Cuando se termine de configurar todo, se debe de pulsar en el botón “EXPORT” para comenzar a exportar los datos. Se mostrará el tiempo aproximado que tarda en exportar los datos en la parte inferior de la pantalla como se muestra en la Figura 83.

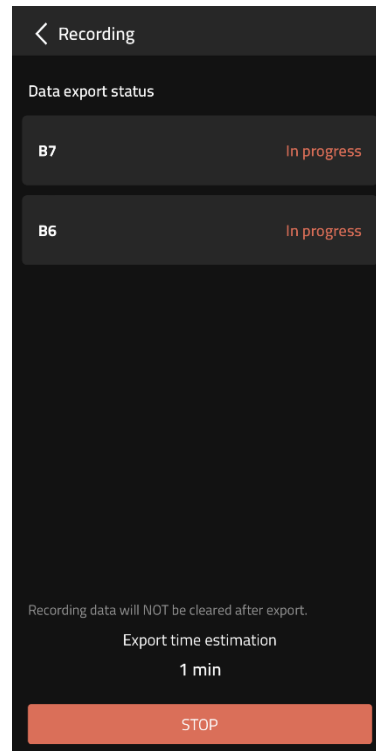


Figura 83. Exportar datos.

Cuando los datos se hayan terminado de exportar se indicará en la parte inferior de la pantalla el directorio donde se encuentran los archivos dentro del dispositivo. Por último, cuando se ha terminado de exportar todos los datos deseados, se deberá de pulsar “*FINISH*” ubicado en la parte inferior de la pantalla y así poder realizar más mediciones (véase Figura 84).

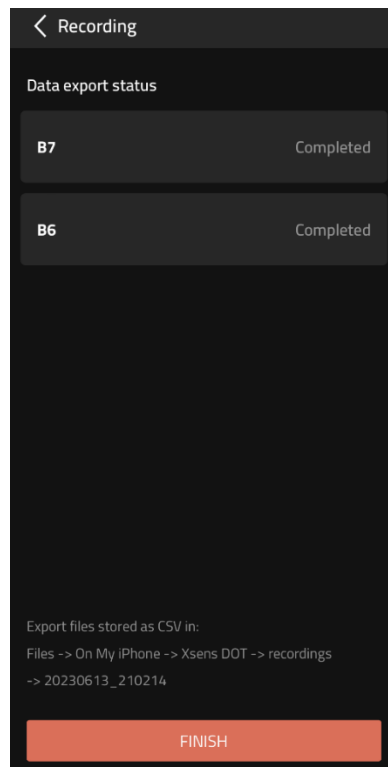


Figura 84. Finalización de la exportación de los datos.

Exportación de datos mediante USB

Para exportar grandes cantidades de datos se recomienda utilizar la opción de exportación de datos mediante USB. Para ello, se debe de instalar en el ordenador la aplicación “Xsens DOT Data Exporter” disponible para Windows o Mac. A continuación, se conectan los sensores Xsens DOT mediante un cable USB.

Se debe ejecutar la aplicación y abrir en el navegador la dirección indicada en un bloc de notas que está en la carpeta instalada. Se accederá a una pantalla como se observa en la Figura 85.

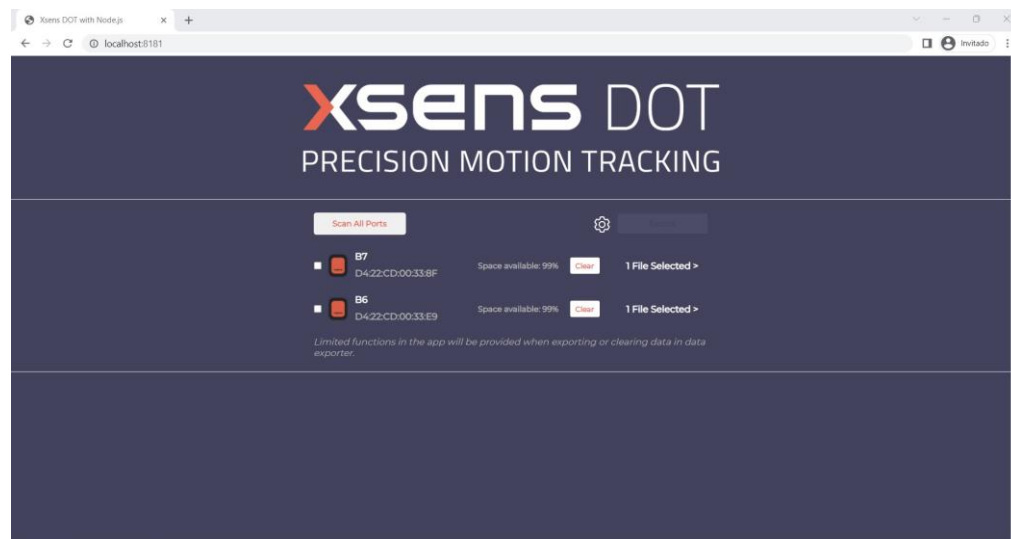


Figura 85. Pantalla inicial.

A continuación, se debe pinchar con el ratón en el botón “Scan All Ports”, el cual, escanea todos los sensores conectados mediante cable USB. Se pueden seleccionar los archivos de grabación que se quieren exportar pinchando sobre “1 File Selected >” como muestra la Figura 86.

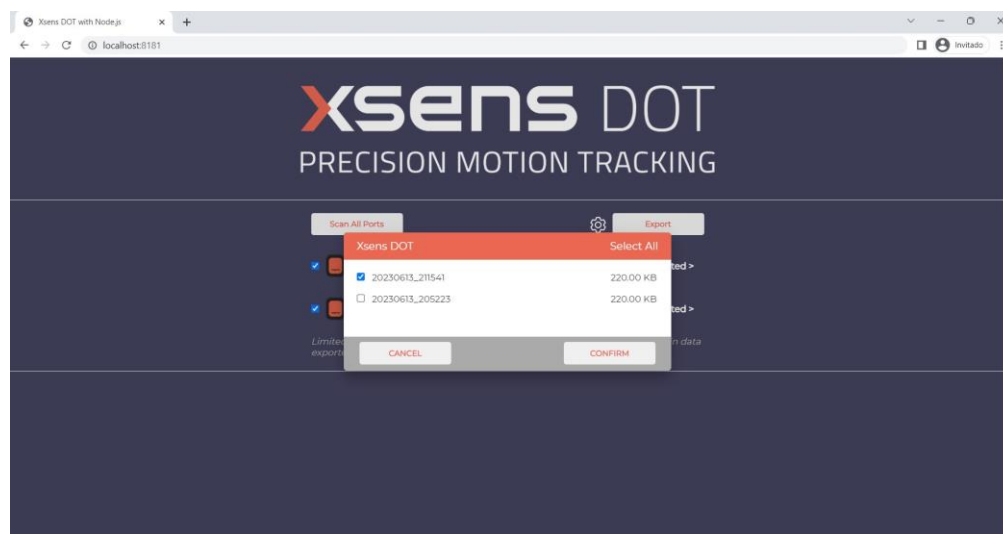


Figura 86. Selección de archivos a exportar.

Pulsando en el icono de la rueda dentada se pueden configurar las cantidades de datos a exportar (véase Figura 87).

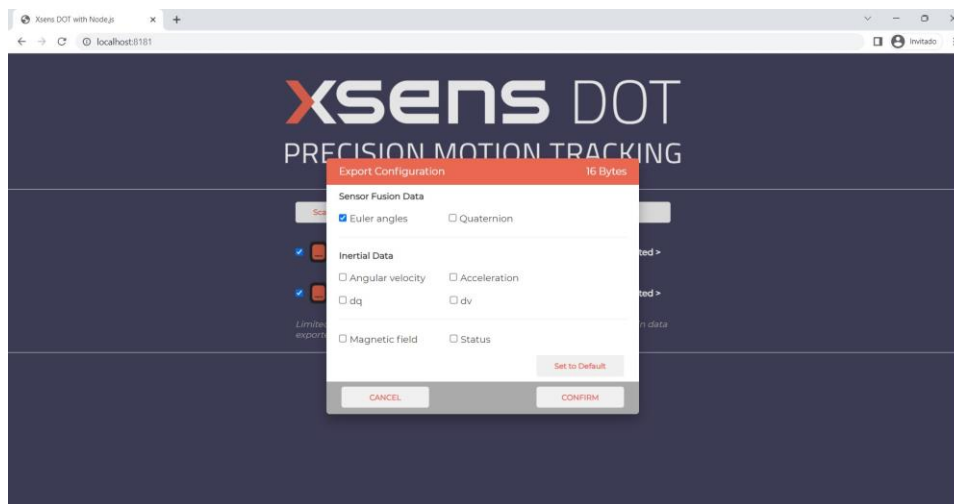


Figura 87. Selección de datos a exportar.

Una vez se tengan todos los archivos seleccionados que se quieren exportar, para iniciar la exportación solo es necesario pinchar en el botón “Export”, posteriormente, los archivos grabados se guardarán en el ordenador con el formato “.csv” (véase Figura 88). Consultar [35] para obtener más información.

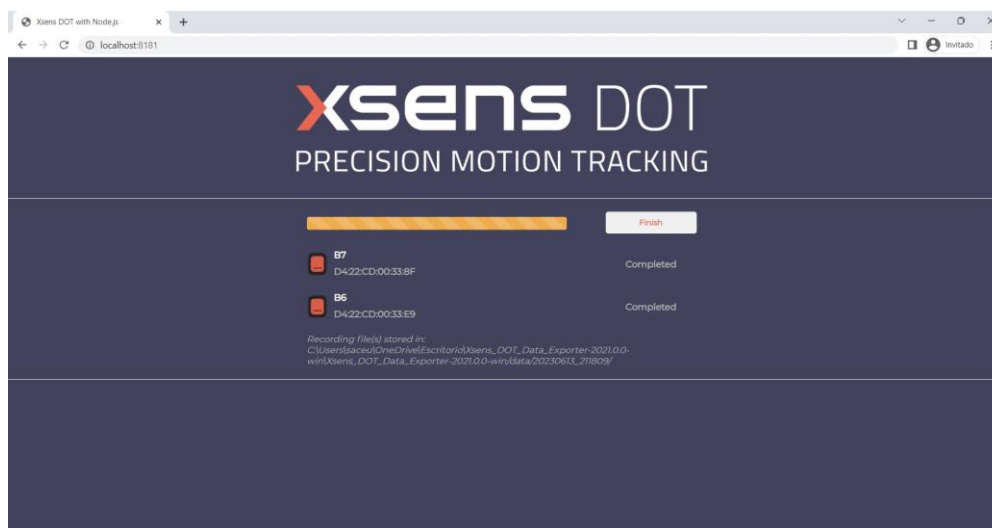


Figura 88. Archivos exportados correctamente.

Otras opciones

En la pantalla del dispositivo móvil, se encuentra una tercera pestaña denominada “Advanced” en la que se puede acceder a funciones y configuraciones avanzadas (véase Figura 89).

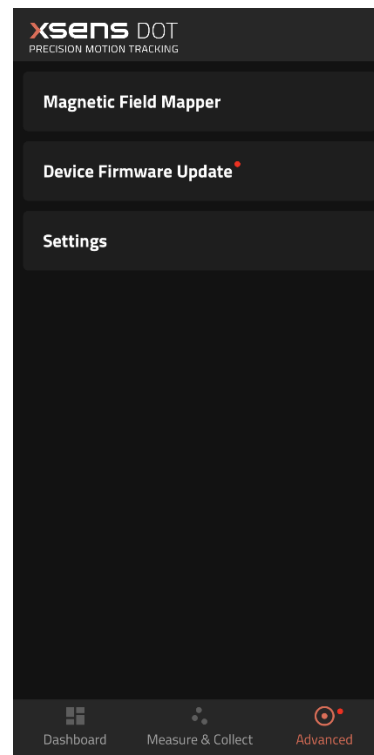


Figura 89. Tercera pestaña “Advanced”

En la primera opción, “*Magnetic Field Mapper*” se permite recalibrar el magnetómetro, se recomienda hacer un Mapeo de campos magnéticos siempre que se utilice el sensor DOT por primera vez en el entorno donde se realizará la medición [36].

La segunda opción, “*Device Firmware Update*” permite actualizar al firmware más reciente estable y de prueba (beta), seleccionando “*Upgrade*” o retroceder a la versión estable anterior, seleccionando “*Downgrade*”. Para llevar a cabo la actualización se tienen que conectar los sensores con el dispositivo móvil.

Por último, hay una tercera opción denominada “*Settings*” en la que se encuentra la opción de encendido pulsando sobre “*Power options*”, que permite elegir si encender los sensores mediante la conexión USB (véase Figura 91). La opción de ahorro de energía permite cambiar el umbral en el que el sensor entra en modo de ahorro de energía. Además, muestra los números de serie de los sensores pulsando sobre “*Serial Number*” y se puede borrar la memoria caché del teléfono pulsando en “*Clear Cache*” (véase Figura 90).

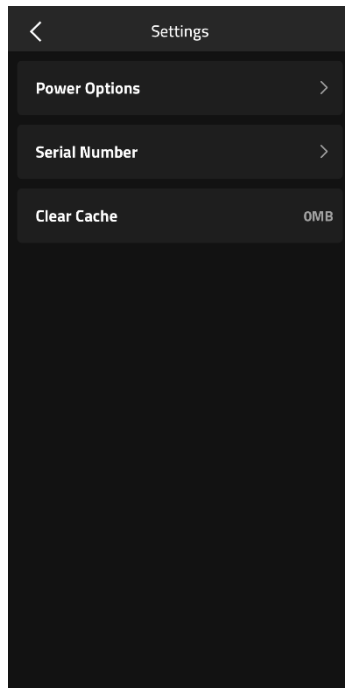


Figura 90. Opciones de “Settings”

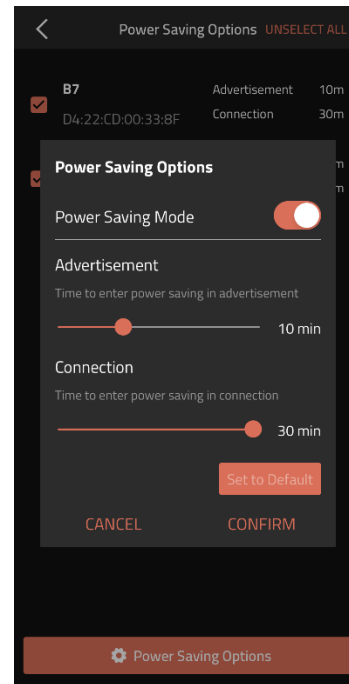


Figura 91. Opciones “Power options”

Plataformas compatibles con el software

No todos los dispositivos son compatibles con este tipo de sensores. Para que funcionen correctamente y se puedan validar las medidas registradas, se resumen en la Tabla 4 una serie de características que deben de tener los dispositivos con los que se van a realizar las mediciones.

Tabla 4. Plataformas compatibles con el software [37].

Software	Plataformas compatibles
Aplicación para iOS	iOS 11.0 o superior
Aplicación para Android	Android OS 8.0 o superior
Xsens DOT Data Exporter	Windows 10, 11
Requisitos del Bluetooth	Mejor rendimiento con BLE 5.0, compatible con DLE y compatible con Bluetooth 4.2.

Si se desea una explicación más amplia y con mayor profundidad, se recomienda consultar [23], [38] y [39].

ANEXO 2. Aplicación a la evaluación de la metodología de rescate.

Se pretende llevar a cabo un estudio para evaluar la eficacia del uso de las manos en la inmovilización de una persona con lesión medular en un entorno acuático, en comparación con la colocación tradicional del collarín antes de proceder a su extracción. El objetivo es determinar si el uso de las manos como método de inmovilización es igualmente efectivo y seguro, con la finalidad de reducir los tiempos de rescate en situaciones de emergencia en el agua.

Este estudio busca contribuir al avance en las técnicas y protocolos de rescate, proporcionando evidencia científica para mejorar las prácticas de respuesta en situaciones de lesiones medulares en entornos acuáticos.

Técnicas de rescate.

Técnica A.

La Técnica A implica la intervención acuática para salvar a una persona, donde el socorrista sujeta el cuello de la víctima con las manos como se observa en la Figura 92 y la saca del agua en caso de una lesión en la médula espinal. Una vez fuera del agua, se le coloca un collarín y se asegura con cintas. En resumen, los pasos que conforman esta técnica son los siguientes: control, posicionamiento sobre el tablero, extracción del agua de la víctima, colocación del collarín y, por último, colocación de las cinchas.



Figura 92. Técnica de rescate A, sujeción del cuello con las manos.

Técnica B.

La Técnica B, al igual que la Técnica A, se basa en el rescate acuático. Sin embargo, a diferencia de la Técnica A, en la Técnica B se lleva a cabo la inmovilización de la víctima utilizando el collarín (véase Figura 93) y las cinchas mientras aún se encuentra en el agua. En resumen, los pasos que conforman esta técnica son los siguientes: control, posicionamiento sobre el tablero, colocación del collarín, colocación de las cinchas y, por último, extracción del agua de la víctima.



Figura 93. Collarín cervical [40].

Método experimental.

En el cuerpo de la víctima se han instalado un total de cinco IMUs: uno en la región de la cabeza, uno en la parte posterior del cuello y tres en el área del pecho. El sensor utiliza un sistema de coordenadas cartesiano, el cual está fijado al cuerpo del sensor, explicado anteriormente en la Figura 10.

En cada experimento se van a llevar a cabo la medición de cuatro variables: el tiempo y los tres ángulos de Euler.

Se van a realizar los experimentos con dos grupos de socorristas. Ambos equipos llevan a cabo cada técnica en tres ocasiones. En todos los casos se emplea la misma víctima. Inicialmente, el equipo 2 realiza la Técnica B, seguida por el equipo 1 que realiza la Técnica A. Esta secuencia de alternancia entre los equipos y las técnicas continúa hasta que cada equipo haya realizado cada técnica en tres ocasiones. Sobre la víctima se van a disponer cinco IMUs según se observa en la Figura 94.

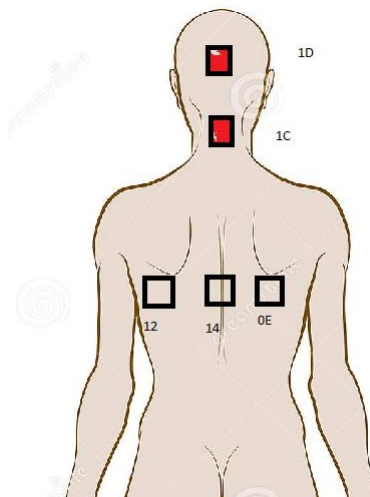


Figura 94. Posición de los IMUs en el cuerpo de la víctima.

Cada prueba se llevaba a cabo siguiendo el siguiente procedimiento detallado a continuación.

Inicialmente, la víctima se encuentra de pie en el agua y luego se deja caer hacia adelante, quedando su cuerpo boca abajo en el agua. El primer socorrista se encarga de girar a la víctima para liberar su cabeza del agua y permitirle respirar. Este paso se denomina Control. Posteriormente, mientras un socorrista inmovilizaba el cuello de la víctima, los demás socorristas la colocan sobre el tablero espinal de rescate como se muestre en Figura 95.



Figura 95. Colocación del tablero de rescate.

En el caso de la Técnica A, se extrae a la víctima del agua mientras uno de los socorristas mantiene su cuello inmovilizado con las manos, colocando luego el collarín y las cinchas en tierra. En la Técnica B, se colocan el collarín y las cinchas en la víctima y luego se la saca del agua.

Es importante tener en cuenta que, al colocar a la víctima sobre el tablero, hay que tener cuidado de que las IMUs no se apaguen, ya que se va a ejercer

presión sobre ellas y estas posee un botón central que podría activarse de manera accidental.

Finalmente, a partir de las mediciones realizadas por las IMUs, se generan una serie de archivos que almacenan de manera precisa y detallada los datos necesarios para un análisis posterior. Estos archivos se configuran como una invaluable fuente de información, ya que capturan de forma sistemática y en tiempo real las diferentes variables y parámetros registrados por las IMUs durante el proceso de rescate acuático. Dichos datos proporcionan una visión completa y objetiva de las acciones llevadas a cabo durante el rescate, permitiendo un análisis exhaustivo y preciso que puede ser utilizado para evaluar el rendimiento de los socorristas, detectar posibles mejoras en las técnicas empleadas y contribuir al desarrollo de protocolos más efectivos en situaciones de rescate.