



Universidad de Valladolid



**ESCUELA DE INGENIERÍAS
INDUSTRIALES**

UNIVERSIDAD DE VALLADOLID

ESCUELA DE INGENIERIAS INDUSTRIALES

Grado en Ingeniería Mecánica

**Correspondencia entre registros cinemáticos
y presiones plantares al andar**

Autor:

Prieto Díaz, María José

Tutor(es):

Lorenzana Ibán, Antolín
García Terán, José María
Departamento de Construcciones
Arquitectónicas, Ingeniería del
Terreno y Mecánica de los Medios
Continuos y Teoría de Estructuras

Valladolid, Julio 2024

Gracias a mi familia y amigos, un pilar fundamental para mí durante estos años de carrera, por el continuo apoyo y confianza que han depositado en mí ayudándome a alcanzar mis metas.

RESUMEN

El estudio de la marcha humana, los movimientos que realizan las diferentes partes del cuerpo al someterse un paseo, es de gran interés en diferentes ámbitos como el de la biomedicina, pero en este Trabajo de Fin de Grado, se analizará desde el punto de vista de la ingeniería. El Proyecto estará enfocado en la obtención de la marcha virtual, con la ayuda de diferentes sensores *wearables*, a partir de la marcha real de una persona en diferentes paseos.

El proceso comienza con la recogida de datos gracias a las plantillas *Loadsol* y a las unidades inerciales *XSENS*, así obteniendo los valores de las fuerzas generadas por cada pie contra el suelo y diferentes mediciones sobre los movimientos que realizan aquellas partes del cuerpo sobre las que están colocadas los *XSENS*.

Utilizando el programa informático de Excel, se trabajará con estos valores obtenidos consiguiendo los valores más realistas y analizaremos el comportamiento y se reconocerán los patrones de las magnitudes medidas como son la fuerza, la velocidad angular, los ángulos de Euler y la aceleración.

PALABRAS CLAVE

Marcha humana, sensores *wearables*, cinemática, fuerzas, patrones.

ABSTRACT

The study of human gait, the movements made by the different parts of the body when walking, is of great interest in different fields such as biomedicine, but in this Final Degree Project, will analyze it from the engineering point of view. The Project will focus on obtaining the virtual gait, with the help of different wearable sensors, from the real gait of a person in different walks.

The process begins with the collection of data thanks to the *Loadsol* insoles and the *XSENS* inertial units, thus obtaining the values of the forces generated by each foot against the ground and different measurements of the movements made by those parts of the body on which the *XSENS* are placed.

Using Excel software, we will work with these obtained values to obtain the most realistic values and we will analyze the behavior and recognize the patterns of the measured quantities such as force, angular velocity, Euler angles and acceleration.

KEY WORDS

Human gait, wearable sensors, kinematics, forces, patterns.

INDICE

CAPÍTULO 1. Introducción y objetivos.....	1
1.1 Introducción.....	1
1.2 Antecedentes y motivación.....	2
CAPITULO 2. Descripción del material de trabajo.	3
2.1 Plantillas LOADSOL.....	3
2.2 XSENS.....	5
2.3 Dispositivo móvil.....	7
2.4 Metrónomo digital	8
2.5 Ordenador.....	8
CAPÍTULO 3. Procedimiento de toma de datos.	9
3.1 Información del sujeto.....	9
3.2 Ubicación y conexión de los XSENS	9
3.3 Colocación y conexión de las plantillas LOADSOL	11
3.4 Grabación	12
3.5 Descarga de los datos.....	17
CAPÍTULO 4. Data curation con Excel.....	19
4.1 Calibración de las plantillas.....	19
4.2 Calibración Xsens	23
4.3 Sincronización del Xsens con las plantillas	25
4.4 Paso representativo	30
4.5 Fuerza vs aceleraciones	34
4.6 Fuerzas vs GYr	45
4.7 Fuerzas vs ángulos de Euler.....	60
4.8 Estudio de los datos obtenidos por todos los Xsens	73
CAPITULO 5. CONCLUSIONES.	83
5.1 Interpretación de resultados	83
5.2 Desarrollo futuro	83
5.3 Consideraciones adicionales.....	84
BIBLIOGRAFIA	87

INDICE FIGURAS, TABLAS Y ECUACIONES

Figura 1. Plantillas Loadsol.....	4
Figura 2. Elemento de sujeción y de conexión a la pila.	4
Figura 3. Xsens Dot. [2]	6
Figura 4. Correa y sujeción Xsens Dot.....	6
Figura 5. Cargador múltiple y base de carga de los XSENS.	7
Figura 6. Ubicación XSENS [3].....	10
Figura 7. Tallas plantilla Loadsol [4].....	11
Figura 8. Colores de las plantillas Loadsol.[4]	12
Figura 9. Flujograma de la metodología seguida	16
Figura 10. Xsens al que pertenece la información (color verde) y hora de la grabación (amarillo).....	18
Figura 11. Fuerza de las plantillas respecto al tiempo.	20
Ecuación 1. Segunda del del movimiento de Newton	20
Figura 12. Calibración de la plantilla derecha.....	21
Figura 13. Calibración de la plantilla izquierda.	22
Figura 14. Plantillas calibradas.	23
Figura 15. Periodo de tiempo con las aceleraciones constantes medidas sobre el sensor B7.	24
Ecuación 2. Módulo de las aceleraciones	24
Figura 16. Fuerzas y aceleraciones respecto al tiempo sin sincronizar.	26
Tabla 1. Valores máximos de la fuerza y aceleración y el instante de tiempo en el que se alcanzan.	28
Figura 17. Fuerzas y aceleraciones respecto al tiempo sincronizados.....	29
Figura 18. Fuerza grabada por las plantillas respecto al tiempo en un paso representativo.....	30
Figura 19. Fases y subfases del ciclo de la marcha. [7]	32
Figura 20. Fuerza de las plantillas respecto al tiempo.	33
Figura 21. Representación de las fuerzas de las plantillas y de la suma de estas respecto al tiempo.	34
Figura 22. Ejes positivos del Xsens B7 [3]	35
Figura 23. Fuerza de las plantillas y aceleración en x del Xsens B7 frente al tiempo.	35
Figura 24. Fuerza de cada plantilla, la suma de ambas y aceleración en x del XSENS B7 frente al tiempo.	36
Figura 25. Aceleración en el eje x del Xsens B7 (simétrico) en dos periodos de observación.....	37
Figura 26. Patrón de la aceleración en x del Xsens B7.....	37

Figura 27. Dos periodos de la aceleración en el eje x Xsens B7 de representación consecutivos por separado.	38
Figura 28. Fuerza de las plantillas y aceleración en y del Xsens B7 frente al tiempo.	39
Figura 29. Aceleración en el eje y del Xsens B7 (simétrico) en dos periodos de observación.	39
Figura 30. Patrón de la aceleración en y del Xsens B7.	40
Figura 31. Fuerza de cada plantilla, la suma de ambas y aceleración en el eje y del Xsens B7 frente al tiempo.	40
Figura 32. Aceleración del eje y del Xsens B7 durante la transición de la pisada del pie derecho al pie izquierdo.	41
Figura 33. Aceleración del eje y del Xsens B7 durante la transición de la pisada del pie izquierdo al pie derecho.	41
Figura 34. Fuerza de las plantillas y aceleración en z del Xsens B7 frente al tiempo.	42
Figura 35. Aceleración en el eje z del Xsens B7 (simétrico) en dos periodos de observación consecutivos.	43
Figura 36. Patrón compuesto por dos periodos de observación de la aceleración en el eje y Xsens B7.	43
Figura 37. Patrón compuesto por un periodo de observación de la aceleración en el eje y Xsens B7.	44
Figura 38. Fuerza de cada plantilla, la suma de ambas y aceleración en el eje z del Xsens B7 frente al tiempo.	44
Figura 39. Fuerza de las plantillas respecto al tiempo con los valores calibrados.	46
Figura 40. Fuerza de las plantillas y velocidad angular respecto al tiempo sin sincronizar.	46
Figura 41. Fuerza de las plantillas y velocidad angular respecto al tiempo sin sincronizar.	47
Figura 42. Persona andando vista desde arriba [8] y representación de los sentidos de giro respecto al eje x.	48
Figura 43. Fuerza de las plantillas y velocidad angular del eje x frente al tiempo.	48
Figura 44. Velocidad angular en el eje x del Xsens B7 (simétrico) en dos periodos de observación consecutivos.	49
Figura 45. Patrón compuesto por dos periodos de observación de la velocidad angular en el eje x Xsens B7.	49
Figura 46. Análisis de la curva de la velocidad angular respecto al eje x durante el apoyo único del pie izquierdo.	50
Figura 47. Análisis de la curva de la velocidad angular respecto al eje x durante el apoyo del pie derecho.	51

Figura 48. Persona vista de perfil [8] y representación de los sentidos de giro respecto al eje y.	52
Figura 49. Fuerza de las plantillas y velocidad angular del eje y frente al tiempo.	52
Figura 50. Velocidad angular en el eje y del Xsens B7 (simétrico) en un periodo de observación.	53
Figura 51. Repetición del patrón compuesto por dos periodos de observación de la velocidad angular en el eje y del Xsens B7	53
Figura 52. Análisis de la curva de la velocidad angular respecto al eje y durante el cambio de apoyo del pie izquierdo al derecho y el apoyo único del pie derecho.	54
Figura 53. Análisis de la curva de la velocidad angular respecto al eje y durante el cambio de apoyo del pie derecho al izquierdo y el apoyo único del pie izquierdo.....	55
Figura 54. Persona vista de frente [3] y representación de los sentidos de giro respecto al eje y.	56
Figura 55. Fuerza de las plantillas y velocidad angular del eje z frente al tiempo.	56
Figura 56. Velocidad angular en el eje z del Xsens B7 (simétrico) en dos periodos de observación.....	57
Figura 57. Repetición del patrón compuesto por dos periodos de observación de la velocidad angular en el eje z del Xsens B7	58
Figura 58. Análisis de la curva de la velocidad angular respecto al eje z entre el aplanamiento del pie derecho y el pie izquierdo (primera parte).....	58
Figura 59. Análisis de la curva de la velocidad angular respecto al eje z entre el aplanamiento del pie izquierdo y el del pie derecho.	59
Figura 60. Representación gráfica de la variación de los ángulos de Euler y fuerzas sobre las plantillas respecto al tiempo.....	61
Figura 61. Representación gráfica de los ángulos de giro del Xsens B7 respecto al eje x y fuerza de las plantillas respecto al tiempo.....	61
Figura 62. Representación de los ángulos respecto al eje x del XSENS B7 durante el paseo. [8]	62
Figura 63. Representación gráfica de los ángulos de giro del Xsens B7 respecto al eje x y fuerza de las plantillas respecto al tiempo modificada siendo el valor medio 0°.	63
Figura 64. Representación de los ángulos modificados oscilando respecto a 0 ° respecto al eje x del Xsens B7 durante el paseo. [8].....	63
Figura 65. Ángulos de giro respecto al eje x del Xsens B7 y las fuerzas de las plantillas respecto al tiempo en un periodo representativo.....	64
Figura 66. Patrón de los ángulos de giro respecto al eje x del Xsens B7 junto a la fuerza de las plantillas respecto al tiempo.....	65
Figura 67. Repetición del patrón compuesto por dos periodos de observación	

del ángulo girado respecto al eje x del Xsens B7	65
Figura 68. Representación gráfica de los ángulos de giro respecto al eje y del Xsens B7 y la fuerza de las plantillas respecto al tiempo.....	66
Figura 69. Representación de los ángulos respecto al eje y del Xsens B7 durante el paseo a estudiar. [8]	67
Figura 70. Ángulos de giro respecto al eje x del Xsens B7 y la fuerza de las plantillas respecto al tiempo en un periodo representativo.....	67
Figura 71. Posible patrón del ángulo de Euler del Xsens B7 respecto al eje y junto a la fuerza de las plantillas respecto al tiempo.....	68
Figura 72. Representación gráfica de los ángulos de giro del Xsens B7 respecto al eje x y fuerza de las plantillas respecto al tiempo.....	69
Figura 73. Representación de los ángulos respecto al eje z del Xsens B7 durante el paseo. [3]	69
Figura 74. Representación de los ángulos modificados oscilando respecto a 0 ° respecto al eje z del Xsens B7 durante el paseo. [3].....	70
Figura 75. Representación gráfica de los ángulos de giro del Xsens B7 respecto al eje z y la fuerza de las plantillas respecto al tiempo modificada siendo el valor medio 0°.	70
Figura 76. Ángulos de giro respecto al eje z del Xsens B7 y las fuerzas de las plantillas respecto al tiempo en un periodo representativo.....	71
Figura 77. Patrón del ángulo de Euler del Xsens B7 respecto al eje z junto a la fuerza de las plantillas respecto al tiempo.....	72
Figura 78. Repetición del patrón compuesto por dos periodos de observación del ángulo girado respecto al eje z del Xsens B7.....	72
Tabla 2. Gráficas estudiadas de las posibles con los datos grabados.	74
Tabla 3. Gráficas a estudiar necesarias para un estudio representativo simplificado.....	75
Figura 79. Aceleraciones Xsens B6	76
Figura 80. Aceleraciones Xsens B7	76
Figura 81. Velocidad angular Xsens B6.....	77
Figura 82. Comparación velocidades angulares respecto al eje x de los Xsens B6 y B7.....	78
Figura 83. Comparación velocidades angulares respecto al eje y de los Xsens B6 y B7.....	78
Figura 84. Comparación velocidades angulares respecto al eje z de los Xsens B6 y B7.....	79
Figura 85. Ángulos de Euler Xsens B7	80
Figura 86. Ángulos de Euler Xsens B6	81
Figura 87. Representación del giro respecto al eje y de los sensores B6 y B7	81



CAPÍTULO 1. Introducción y objetivos.

1.1 Introducción

La marcha humana es un proceso complejo y fascinante que involucra la interacción coordinada de múltiples sistemas musculares, esqueléticos y neurológicos.

A simple vista, parece ser un acto instintivo y natural. Sin embargo, detrás de este movimiento aparentemente sencillo se esconde una compleja sinfonía de estructuras biológicas que trabajan en perfecta sincronía. Desde una perspectiva científica, el estudio de la marcha humana ha sido un área de gran interés, buscando comprender los mecanismos subyacentes que permiten al cuerpo humano desplazarse de manera eficiente y segura y, ofreciendo una rica oportunidad para comprender los principios de la mecánica del movimiento, el control del sistema y el diseño de sistemas biomédicos. [1]

1.1.1. La marcha humana: Una sinfonía de movimiento y presión

- **Cinemática:** La cinemática se encarga de estudiar el movimiento del cuerpo humano sin considerar las fuerzas que lo causan. En este contexto, analizaremos la aceleración, velocidad angular y ángulos de Euler (giro) de diferentes segmentos corporales durante la marcha, identificando patrones específicos que caracterizan este movimiento.
- **Presiones plantares:** Las presiones plantares representan las fuerzas que se generan entre el pie y el suelo durante la marcha. Estas presiones proporcionan información valiosa sobre la distribución de la carga, la propulsión y la estabilidad durante el ciclo de la marcha.

1.1.2. Sensores wearables: Ventanas a la dinámica del movimiento

- **Sensores cinemáticos:** Los sensores cinemáticos, como acelerómetros y giroscopios, permiten capturar datos sobre el movimiento del cuerpo humano, proporcionando información sobre la posición, orientación y aceleración de diferentes segmentos corporales.
- **Sensores de presión:** Los sensores de presión, como plantillas sensorizadas, capturan las presiones que se generan entre el pie y el suelo durante la marcha, brindando información sobre la distribución de la carga y la dinámica del movimiento.

1.2 Antecedentes y motivación

Este proyecto se perfila como la siguiente etapa en una línea de investigación en constante evolución, donde estudios previos han profundizado en los patrones de presión plantar durante la marcha en diferentes escenarios utilizando las plantillas instrumentales Loadsol y los sensores XSENS.

A diferencia de estas investigaciones anteriores, este proyecto se distingue por la profundización de la información obtenida con los sensores Xsens y el trabajo con los resultados a diferentes velocidades y frecuencias de pasos con Excel. Este nuevo estudio pone de manifiesto nuestro firme compromiso con la búsqueda de una comprensión más profunda y holística de los movimientos corporales.

La motivación fundamental que impulsa este proyecto reside en aprovechar las capacidades únicas de estos dispositivos para obtener una visión más completa y precisa de las actividades físicas, abriendo así nuevas fronteras en el ámbito de la biomecánica y el análisis del movimiento.

1.3 Objetivos

Los objetivos principales de este estudio cubren varias dimensiones clave en el campo de la investigación de la biomecánica y el movimiento humano. En primer lugar, se propone realizar una calibración y sincronización exhaustiva de las unidades inerciales Xsens y de las plantillas Loadsol. Esta importante fase del estudio no sólo garantiza la exactitud de los datos recopilados, sino que también establece estándares rigurosos para la confiabilidad de los resultados, contribuyendo a la solidez y validez de la investigación.

En segundo lugar, se llevará a cabo una recopilación y análisis detallados de datos con el objetivo de identificar patrones específicos asociados con diferentes frecuencias de pasos en actividades de caminar y correr. En tercer y último lugar, al examinar y comparar las diferencias individuales en el desempeño de las actividades de caminar y correr, se podrá obtener información valiosa para futuras investigaciones en las áreas de biomecánica y salud, enfatizando la importancia de considerar la variabilidad individual en el análisis de datos biomecánicos.

Como conclusión de la investigación, se establece una metodología del uso conjunto de los sensores descritos de tal manera que futuros usuarios puedan obtener registros de calidad que permitan disponer de una base de datos para peatones de distintas características biométricas.



CAPITULO 2. Descripción del material de trabajo.

En este capítulo se detallarán los instrumentos utilizados. Se describirán los dispositivos más relevantes, las unidades inerciales Xsens y las plantillas Loadsol, junto a otros claves para la correcta realización del trabajo. El conocimiento de los instrumentos utilizados y la forma de aprovecharlos al máximo es indispensable para conseguir los mejores resultados.

2.1 Plantillas LOADSOL

Las plantillas Loadsol son dispositivos tecnológicos utilizados en el ámbito de la biomecánica y la podología para medir las fuerzas de presión que se ejercen sobre la planta del pie durante la actividad física. Estas plantillas están equipadas con sensores que capturan datos detallados sobre la distribución de la presión en el pie en tiempo real.

En estudios de biomecánica y fisiología del ejercicio, las plantillas Loadsol proporcionan datos precisos y detallados que son esenciales para entender mejor el movimiento humano y desarrollar nuevas intervenciones terapéuticas.

Las características principales de estos dispositivos son las siguientes:

- **Conectividad inalámbrica:** utilizan Bluetooth como tecnología inalámbrica para transmitir instantáneamente la información a computadoras o dispositivos móviles permitiendo ser analizada durante la actividad física. Esta característica facilita el uso de las plantillas por la ausencia de cables evitando cualquier interferencia con el movimiento del usuario.
- **Aplicación complementaria y software de análisis:** las plantillas vienen con una aplicación complementaria compatible con dispositivos Android e IOS que permite visualizar, almacenar y analizar la información recopilada y un software especializado en biomecánica para estudios más detallados.
- **Batería en forma de pilas.**
- **Diseño ligero y ergonómico:** no interfieren con la actividad natural del pie y se pueden usar en una gran variedad de calzados.



Figura 1. Plantillas Loadsol

La Figura 1 consta de dos fotografías hechas en el laboratorio de Estructuras de la UVa a un par de las plantillas Loadsol que se disponen para realizar diferentes estudios.

En la fotografía de la izquierda se ven las plantillas por la parte posterior, la cara de estas que al colocarse en el interior de zapato se encuentra directamente en contacto con la plantilla de este. Lo rodeado con un círculo gris es la parte de la plantilla que alberga la pila y que también sirve como elemento de sujeción al zapato ya que la tapa del orificio donde se introduce la pila (parte azul) tiene un clip para sujetar este elemento a los cordones del zapato.

En la fotografía de la derecha se observa la parte anterior de las plantillas, la cara de estas sobre las que se apoya directamente la planta del pie. En esta cara del elemento rodeado se encuentra lo siguiente (ver Figura 2):



Figura 2. Elemento de sujeción y de conexión a la pila.

- Botón de encendido y apagado de las plantillas



- Indicador de luz led que puede estar iluminada parpadeando de diferentes modos o no indicando el estado de las plantillas.
- Pegatina en la que se detalla a que pie corresponde cada una con una L de *Left* o una R de *Right*. También en esta pegatina aparece la denominación de cada una de las plantillas y, gracias a esto, se puede identificar cuáles son las plantillas que pertenecen a un mismo par ya que la denominación es la misma cambiando el último dígito (siendo estos contiguos).

2.2 XSENS

Los Xsens Dot son sensores inerciales portátiles diseñados para capturar y analizar datos de movimiento humano con alta precisión. Están fabricados con materiales robustos y resistentes con la finalidad de soportar condiciones adversas y un uso intensivo, asegurando una larga vida útil. Son desarrollados por Movella, una empresa líder en tecnología de captura de movimiento y análisis, estos sensores tienen diversas aplicaciones en campos como el deporte, la salud, la investigación y la realidad virtual/aumentada.

El sensor Xsens Dot proporciona velocidad angular 3D mediante un giroscopio, aceleración 3D mediante un acelerómetro y campo magnético terrestre 3D mediante un magnetómetro. Combinado con los algoritmos de fusión de sensores de Xsens, se proporciona orientación 3D y aceleración libre. Gracias a la naturaleza inalámbrica de Bluetooth 5.0, el sensor DOT de Xsens es una excelente unidad de medición para seguimiento de los movimientos del cuerpo humano. [2]

Gracias a su diseño pequeño y ligero, los Xsens Dot pueden ser fácilmente colocados en diferentes partes del cuerpo permitiendo una libertad de movimiento total. Su tamaño compacto facilita el uso en diversas actividades y aplicaciones. Además, utilizan tecnología Bluetooth para transmitir los datos de movimiento a dispositivos móviles o computadoras en tiempo real así permitiendo un análisis inmediato y continuo del movimiento sin necesidad de cables, los cuales podrían restringir el movimiento natural del cuerpo, y hacer ajustes sobre la marcha mejorando la eficiencia y la efectividad del entrenamiento o tratamiento.

Los sensores están equipados con baterías recargables que ofrecen varias horas de uso continuo, dependiendo de la configuración de la frecuencia de muestreo. Esto permite un monitoreo prolongado durante actividades extendidas. Estos dispositivos brindan frecuencias de muestreo ajustables, que

pueden llegar a 120 Hz, permitiendo la captura de movimientos rápidos y detallados con alta precisión obteniendo datos exactos y confiables, lo que es crucial para aplicaciones médicas, deportivas y de investigación

Los Xsens Dot vienen con una aplicación complementaria intuitiva que facilita la configuración de los sensores, la visualización en tiempo real de los datos capturados y el análisis posterior, reduciendo la curva de aprendizaje y mejorando la experiencia del usuario. La aplicación es compatible con dispositivos iOS y Android y proporciona una interfaz amigable para el usuario.

Al adquirir un sistema Xsens Dot, generalmente se incluye un conjunto de componentes y servicios esenciales para la captura y análisis de movimientos humanos, los cuales se detallan a continuación:

- **Conjunto de sensores inerciales** que dependiendo del paquete varía la cantidad de sensores adquiridos, estando compuesto un sistema básico por entre 3 y 5 sensores. Cuanto más avanzado sea el paquete, más sensores incluye con la finalidad de capturar más detalladamente movimientos más complejos. Un Xsens Dot tiene el aspecto de la Figura 3 en la cual se muestran los ejes positivos de este.



Figura 3. Xsens Dot. [2]

- **Conjunto de correas y sujeciones** para montar los sensores en las diferentes partes del cuerpo fijándolos de forma segura y cómoda durante toda la actividad. Este conjunto está compuesto por correas de diferentes longitudes a las cuales se adhieren mediante velcro las sujeciones. Ver Figura 4.



Figura 4. Correa y sujeción Xsens Dot

- **Cargador múltiple y cable de carga** (ver Figura 5) que permite cargar hasta 5 unidades simultáneamente. Estos cargadores están diseñados para recargar los sensores rápidamente asegurando que estén listos para su uso en poco tiempo. Estos elementos sirven también para la conexión al ordenador y descarga de información de los XSENS al mismo.



Figura 5. Cargador múltiple y base de carga de los XSENS.

- **Aplicación móvil** disponible para dispositivos iOS y Android que permite la configuración de los sensores, la visualización en tiempo real de los datos y el posterior análisis de los movimientos capturados. Opcionalmente, dependiendo del paquete, junto a esta aplicación, también puede incluir un **software de análisis** adicional para PC o Mac que proporciona herramientas avanzadas para análisis más detallados y personalizados.
- **Guía de Usuario y Documentación** [2] que proporcionan instrucciones detalladas sobre la configuración, uso y mantenimiento del sistema Xsens Dot.
- **Soporte técnico** para resolver cualquier incidencia o problema que pueda surgir durante el uso del sistema y **actualizaciones** de firmware y software para asegurar que el sistema está siempre al día con las últimas características y mejoras.

2.3 Dispositivo móvil

El dispositivo que se utiliza en este Proyecto es Android ya que en este se pueden descargar las aplicaciones “Movella Dot” y “LOADSOL plantillas” mientras que un dispositivo móvil iOS no permite el uso del software de las plantillas y es preferible unificar el uso de ambos softwares en un único dispositivo.

En él descargo la aplicación “Movella Dot” en la que configuro y manejo la toma de datos de los XSENS y la app “LOADSOL plantillas” para manejar la grabación

de información de las plantillas.

2.4 Metrónomo digital

Un metrónomo digital es un dispositivo electrónico que emite un pulso regular ajustable en pulsos por minuto (BPM).

En el caso de este trabajo, la función que tiene este aparato es marcar de forma objetiva a los sujetos que nos ayudan en la toma de datos, las diferentes frecuencias que deben seguir con el paso durante los diferentes paseos.

2.5 Ordenador

Es el instrumento fundamental ya que sin él no se pueden analizar todos los datos recopilados. Toda la información se almacena en los XSENS y las plantillas, pero se visualiza y se trabaja con ella más detalladamente en el ordenador.

Los datos de las plantillas, a pesar de ser visualizados desde el dispositivo móvil utilizado durante la grabación de forma aproximada, al descargarla en el ordenador y abrirla con programas como Excel o Python, tenemos la capacidad de observar y analizar los datos recopilados de forma mucho más precisa además de tener gran capacidad de procesado de datos.

Lo mismo ocurre con la información obtenida con los Xsens pero que, a diferencia de las plantillas, el ordenador es el único instrumento que nos permite tanto descargar, ver y trabajar con los datos recogidos.



CAPÍTULO 3. Procedimiento de toma de datos.

Este proceso de la toma de datos consiste en una serie de pasos que tendremos que se repetirán con cada sujeto.

3.1 Información del sujeto

En primer lugar, debemos conocer cierta información sobre el sujeto con el que se va a trabajar ya que hay factores, en los cuales nos adentraremos más adelante, que están directamente relacionados con el paso.

Saber datos como la edad, la altura, el peso, género y la forma física de la persona con la que se va a trabajar, sirve de ayuda a saber cómo tiene distribuida la masa corporal, lo cual afecta directamente al resultado de la medición de las plantillas Loadsol y, será información útil para un posterior análisis de los resultados.

Por otro lado, detalles como si el sujeto ha sido sometido a alguna operación o ha tenido una lesión reciente, especialmente relacionada con el tren inferior (el directamente vinculado con la pisada), es importante conocerla porque va a determinar los resultados que posteriormente se van a obtener.

Por último, es necesario saber la talla de pie del sujeto con el objetivo de proporcionarle las plantillas más apropiadas y el tipo de calzado que lleva a la hora de realizar los paseos porque determina la pisada. Un ejemplo muy sencillo para entender por qué es necesario esto último sería analizar los casos de una misma persona andando con unas zapatillas deportivas o con unos tacones, entre los cuáles la pisada y el movimiento del cuerpo cambia notablemente.

3.2 Ubicación y conexión de los XSENS

Para trabajar disponemos de 8 acelerómetros, los cuales se ubicarán en las partes del cuerpo más representativas para el análisis que se quiere realizar.

El movimiento de los brazos al no ser objeto de trabajo, a pesar de que influye en diferentes aspectos de la locomoción humana al crear una inercia que hace que nuestro cuerpo consuma menos energía al andar, no se estudiará directamente ubicando sensores en estas extremidades.

Por el contrario, se prestará especial atención a los movimientos realizados por el tren inferior, el tronco y la cabeza colocando los Xsens en estos de manera preestablecida.

Es muy importante respetar la ubicación de cada acelerómetro y su correcto posicionamiento porque los diferentes datos, como aceleraciones o ángulos de Euler, se miden respecto a 3 diferentes ejes (Figura 3) y, si no se cumpliesen ciertas pautas a la hora de colocar los Xsens, la posterior lectura y análisis de los datos se complicaría potencialmente.

Todos los acelerómetros menos el B5 y el B6 (ver Figura 6), se colocan en la parte anterior del cuerpo, de forma que el eje z señale hacia el exterior de la figura. A su vez, estos acelerómetros, se colocan en los laterales de la cadera de la misma forma, con el eje z señalando hacia el exterior. Para su correcto posicionamiento, es necesario puntualizar que, en todos los casos, el eje x va hacia arriba.

Sabiendo esto, para una óptima situación de los XSENS, se colocan las cintas de velcro a las siguientes alturas: encima de los tobillos, de las rodillas, cadera, cintura y frente, tal y como está señalado en la Figura 6. Una vez colocadas las bandas firmemente para que durante el movimiento no se desplacen involuntariamente, se procede pegando con el velcro los 8 acelerómetros tal y como se ha especificado anteriormente.

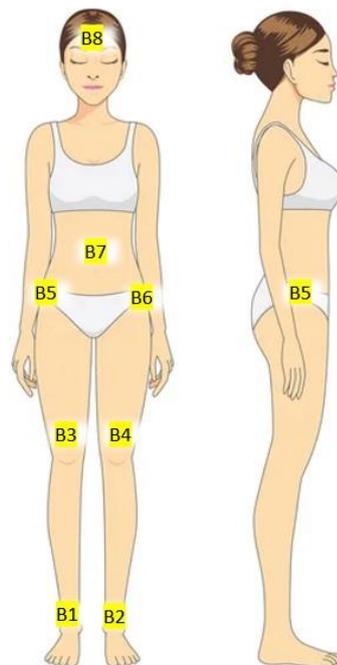


Figura 6. Ubicación XSENS [3]

El último paso antes de empezar la grabación del paseo con estos sensores es lograr la correcta conexión y sincronización de estos.

Para ello, hay que comprobar que todos están encendidos y hay que habilitar la función *Bluetooth* del dispositivo móvil en el cual está instalada la aplicación. Desde la aplicación, se comprueba que los ocho XSENS están conectados y que tienen batería y almacenamiento disponible suficiente para que durante el proceso de grabación no haya interrupción y se configuran los sensores, de forma que la frecuencia máxima de muestreo sea de 120Hz (la máxima posible para conseguir una mayor precisión a la hora del procesado de datos).

3.3 Colocación y conexión de las plantillas LOADSOL

Para este paso, utilizaremos la talla de pie del sujeto, dato que tenemos en la información recopilada (3.1 Información del sujeto). Dependiendo de esta, con la ayuda de la Figura 7, sacada del manual de las plantillas Loadsol [4], se puede seleccionar la plantilla que mejor se va a adaptar al zapato.

O	Children's Insole	24/25	7 - 8	84	20-600	View	n/a
P	Children's Insole	26/27	8 1/2 - 10	84	20-600	View	n/a
Q	Children's Insole	28/29	10 1/2 - 11 1/2	84	20-600	View	View
R	Children's Insole	30/31	12 - 13	84	20-600	View	View
S	Children's Insole	32/33	1 - 1 1/2	84	20-600	View	View
T	Children's Insole	34/35	2 - 3	84	20-600	View	View
U	Adult Standard Insole	36-37	5 1/2 - 6 1/2	99	20-600	View	View
V	Adult Standard Insole	38-39	W: 7 1/2 - 8 1/2; M: 6-7	99	20-600	View	View
W	Adult Standard Insole	40/41	W: 9 - 9 1/2; M: 7 1/2 - 8 1/2	99	20-600	View	View
X	Adult Standard Insole	42/43	W: 10 - 11; M: 9 - 10	99	20-600	View	View
Y	Adult Standard Insole	44/45	10 1/2 - 11 1/2	99	20-600	View	View
Z	Adult Standard Insole	46/47	11 1/2 - 12 1/2	99	20-600	View	View
A	Adult Standard Insole	48/49	13 - 14	99	20-600	View	View

Figura 7. Tallas plantilla Loadsol [4]

Cada tamaño de plantilla, nombrados con letras (W, X, Y...), lleva asociado un color que hace que la identificación de cada una de ellas sea un proceso mucho más sencillo y rápido.

color	loadsol size	Europe	US Men	US Women	US Children
	Q	28/29	-	-	10½-11½
	R	30/31	-	-	12-13
	S	32/33	-	-	1-1½
	T	34/35	-	-	2-3
	U	36/37	-	5½-6½	3½-5
	V	38/39	6-7	7-8½	5½-6
	W	40/41	7½-8½	9-9½	-
	X	42/43	9-10	10-11	-
	Y	44/45	10½-11	-	-
	Z	46/47	11½-12½	-	-
	A	48/49	13-14	-	-

Figura 8. Colores de las plantillas Loadsol.[4]

Una vez tenemos identificadas las plantillas se van a utilizar, es muy importante colocar cada una en el pie correcto. Cada plantilla tiene un identificador junto a una letra como podemos observar en la Figura 2. Los números corresponden con el identificador del par, por lo que las dos plantillas que componen la pareja (derecha e izquierda) deben tener el mismo número acompañado de una letra que corresponde a: “R” la plantilla del pie derecho (*Right*) y “L” la del pie izquierdo (*Left*).

El siguiente paso es introducir en los ajustes generales de la aplicación del dispositivo móvil el nombre de la persona con la que vamos a trabajar (para facilitar la identificación de los datos de cada grabación posteriormente) y el peso ya que, como he comentado anteriormente, este influye directamente en la fuerza grabada por las plantillas.

3.4 Grabación

Al utilizar un dispositivo móvil de pequeñas dimensiones como es un teléfono móvil (en el que están instaladas las dos aplicaciones desde las que se va a poder manejar las grabaciones de todos los sensores que vamos a utilizar), el sujeto que realice los paseos será el responsable de portarlo y manejarlo durante todo el ejercicio.

Para que este trabajo se haga correctamente, es indispensable dar al sujeto las indicaciones necesarias y acompañarle durante el tiempo completo de la duración de las grabaciones por si hay algún problema o si tiene alguna duda respecto al uso de las aplicaciones.



Para la obtención de todos los datos que se buscan, la persona con la que vamos a trabajar va a tener que realizar tantos paseos como sean posibles cumpliendo las siguientes características:

- Paseos tanto andando como corriendo a diferentes ritmos medidos con un metrónomo en pulsaciones por minuto.
- Seguir correctamente todos aquellos ritmos que permitan andar y correr de una manera natural. Marcar una frecuencia demasiado alta o baja puede suponer que los movimientos realizados durante el paseo no sean los naturales así afectando a las mediciones e interrumpiendo posteriormente el análisis correcto de la información obtenida.

El procedimiento es el siguiente:

3.4.1 Inicio y finalización la grabación

3.4.1.1 Aplicación plantillas LOADSOL.

El funcionamiento de las plantillas una vez se han configurado correctamente especificando la frecuencia de muestreo, en nuestro caso 200 Hz lo que corresponde a un tiempo de muestreo de 5 ms (máxima frecuencia disponible para las plantillas utilizadas), si se busca que los datos obtenidos sean en forma de presión o fuerza... y se ha introducido la información del sujeto, es muy simple.

En la pestaña principal de la aplicación hay que pulsar el botón *zero* para empezar la grabación desde 0, como el propio nombre indica. A continuación, pulsando el botón *start* comienza la grabación mostrando el aumento y la disminución de la fuerza ejercida por las plantillas vinculadas, en el caso de este trabajo dos, hasta que se decide pulsar el botón *stop* para finalizar la grabación. Para guardar la información grabada correctamente hay que introducir un nombre a la grabación y es muy importante guardar dando al botón *Yes with Ascii* para que los datos se guarden en *.do y *.txt ya que si se pulsa el botón *Yes* el archivo se guardará en *.pdo.

3.4.1.2 Aplicación XSENS.

Una vez sincronizados los sensores, hay que asegurarse de que el almacenamiento disponible de cada unidad es el suficiente para almacenar los datos de la grabación. Es preferible asegurarse de que la información que contienen en el momento de vaciarlos no va a ser necesaria y vaciar la memoria por completo para así tener la máxima capacidad posible para las grabaciones

evitando la posibilidad de que, por falta de espacio, una grabación no se complete.

A continuación, hay que pulsar *Recording (offline mode)* y dentro de esta opción se podrá pulsar en *Start recording* para comenzar la grabación de un paseo y *Stop recording* para concluirla. A diferencia de la aplicación de las plantillas, la de los Xsens no te permite nombrar cada grabación lo cual complica la posterior identificación de cada conjunto de datos teniendo que trabajar ordenadamente.

3.4.2 Calibración

Una vez iniciada la grabación de todos los sensores que se estén utilizando, lo primero que hay a hacer es calibrar. Este paso es imprescindible para obtener resultados precisos y con gran fiabilidad.

Para calibrar los XSENS, se realiza una grabación en la que nuestro sujeto tiene que mantenerse 5 segundos de pie sin hacer ningún movimiento y así poder posteriormente comprobar que la aceleración de todas las unidades (el módulo de las componentes de la aceleración en los tres ejes) toman el valor de la gravedad.

En el caso de que el valor obtenido no sea el de la gravedad, habría que modificar todos y cada uno de los valores multiplicándolos por un factor de conversión a hallar así tomando el módulo de estos nuevos valores hallados, el valor de la gravedad. (Ver apartado 4.1 para una explicación más detallada de este procedimiento con la ayuda de un ejemplo)

Para calibrar las plantillas, después de esos 5 segundos, el sujeto debe apoyarse sobre una pared o un elemento fijo para no perder el equilibrio y mantener un pie en el aire durante 5 segundos sin ejercer ninguna fuerza sobre este, de forma que todo el peso recaiga sobre el único pie apoyado. Una vez pasados estos 5 últimos segundos, se realiza lo mismo, pero cambiando de pie durante otro período de tiempo igual al anterior.

Los tiempos marcados son orientativos, lo más importante es que no sea muy corto, ya que lo que se busca es que haya unos segundos de fuerza constante en cada paso de los explicados.

Una vez hecho esto, se para la grabación siguiendo los pasos del apartado anterior consiguiendo así nuestra primera grabación y conjunto de datos con el



que calibraremos correctamente en el procesado de datos.

3.4.3 Sincronización

El procedimiento de toma de datos para la posterior sincronización entre las plantillas y los XSENS comienza una vez iniciada la grabación de cada paseo.

Si no se realizase esta etapa, serían evidentes las diferencias temporales debidas a que se está trabajando con dos aplicaciones diferentes en un único dispositivo. Esto se debe a que, a la hora de la toma de datos, es físicamente imposible activar simultáneamente el registro de información en los instrumentos de los que se disponen.

Al no tener las capacidades necesarias para solventar este problema durante la toma de datos, se soluciona con una sincronización posterior durante el procesado de los resultados como se explica más adelante. Para ello, antes de empezar a andar y al finalizar el paseo, el sujeto debe dar un salto de forma que haya un movimiento brusco y un incremento en la fuerza ejercida sobre las plantillas en un instante determinado, lo cual, quedará representado en todas las magnitudes registradas.

3.4.4 Paseo

Una vez empezada la grabación y dado el salto para la sincronización, solo queda realizar el paseo. Esta fase es la más importante porque es de donde se va a obtener la información principal. Es clave que el sujeto adopte rigurosamente con su paso la frecuencia que indica el metrónomo.

Para no tener problemas posteriormente, siempre se va a realizar la misma secuencia: empezar a grabar, saltar, empezar el paseo, dar otro salto al finalizar el paseo y, por último, parar la grabación y guardarla nombrando correctamente los datos. Ver Figura 9.

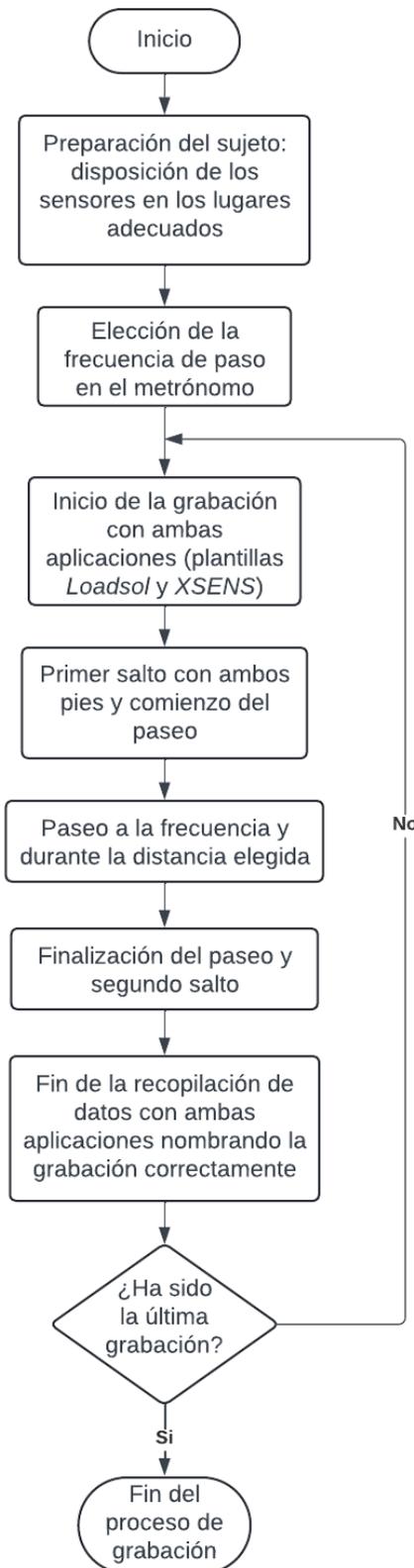


Figura 9. Flujo de la metodología seguida



El recorrido realizado en cada paseo siempre va a ser el mismo y se va a realizar dos veces a cada frecuencia de paso. El objetivo de esto último es tener una segunda grabación con el mismo sujeto en el caso de que durante la primera haya habido algún fallo que se perciba durante el posterior procesado de datos y así, evitar tener que retroceder y volver a esta fase de la toma de datos.

3.5 Descarga de los datos

3.5.1 Xsens

Los datos de los Xsens se almacenan en cada sensor hasta que no se elimine el contenido de cada uno de ellos individualmente desde la aplicación (opción *clear all*).

Para descargar la información en el ordenador hay que seguir los siguientes pasos:

En primer lugar, los insertamos en el adaptador (Figura 5) que, en al tener solo capacidad para 5 acelerómetros y en el laboratorio disponer de un paquete con 8 unidades, que van a ser los utilizados, hay que realizar la operación en mínimo dos partes para obtener todos los datos que buscamos.

A continuación, después de abrir el ejecutable, podemos ver cuáles son los XSENS conectados en el siguiente enlace <http://localhost:8181>.

Esta página web, en el momento de extraer la información, da la opción de seleccionar cuales son los datos que se quieren descargar entre todos los recopilados por cada unidad. Para este trabajo, únicamente se va a necesitar los ángulos de Euler, las aceleraciones y las velocidades angulares, información que posteriormente se va a analizar en profundidad.

Por último, quedaría esperar hasta que se complete la descarga, cuya duración variará en función de:

- 1) La duración del paseo. Al recorrer en cada paseo siempre la misma distancia, el tiempo que se tarda en recorrerla es inversamente proporcional a la frecuencia del paso, es decir, cuanto mayor sea la frecuencia, menor será el tiempo que se tardará en recorrer esa distancia. Esto, a su vez, está relacionado con la información que se va a descargar y con el peso del archivo, ya que cuanto más dure el paseo que se graba, más información contendrá el archivo y más se tardará en descargar.

- 2) Los datos que se quieren descargar. Es decir, si solo se quiere descargar la información obtenida por los acelerómetros internos el tiempo de descarga será menor a que si además de la aceleración se quiere descargar los datos grabados por el giroscopio y los ángulos de Euler.

Esta información quedará guardada en una carpeta en el ordenador con un código especial de números que nos indica el Xsens al que pertenece la información y la hora a la que fue grabada la misma (en formato hora, minuto, segundo sin espaciado entre ellos).

 B1_D422CD00359A_20221124_104818.csv 24/11/2022 10:38 Archivo de valores se... 2.976 KB

Figura 10. Xsens al que pertenece la información (color verde) y hora de la grabación (amarillo)

Una vez se tiene este archivo, es suficiente para empezar a procesar los datos en Excel abriéndolo directamente desde la aplicación.

3.5.2 Plantillas LOADSOL

La información registrada por las plantillas, a diferencia de los Xsens, se almacena en el dispositivo móvil desde el que se ha manejado la grabación.

Para visualizarla en el ordenador, es tan simple como transferir los archivos del dispositivo móvil al ordenador. Para ello, hay varias formas como son, por ejemplo, mediante la conexión directa con cable, pero, en nuestro caso, hemos utilizado la nube, una opción sencilla e instantánea.

Los archivos se guardan en formato .txt de modo que para trabajar con ellos (al igual y junto a los de los Xsens) vamos a abrir este tipo de archivo en Excel, así pasándolo a formato .csv.

Hay que tener cuidado y tener claro en todo momento con que separador decimal estamos trabajando (sistema inglés o español). Sabiendo que los datos descargados en .txt tienen como separador la coma y que Excel, dependiendo de su configuración, utiliza separador decimal u otro, hay que prestar especial atención y utilizar en ambas aplicaciones el mismo separador decimal ya sea cambiando el separador en el fichero .txt o en Excel. De esta forma se tiene toda la información con el mismo formato (fuerzas de las plantillas y todos los datos de los XSENS) y, configurando el Excel de la manera adecuada, no se debería tener ningún problema.



CAPÍTULO 4. Data curation con Excel.

Excel es una herramienta muy eficaz para obtener información a partir de grandes cantidades de datos. Esta herramienta permite identificar y reconocer de una manera más visual todos los datos obtenidos con los sensores *wearables* utilizados durante un paseo y posteriormente analizarlos.

En nuestro caso, hemos elegido un paseo realizado por nuestro sujeto “Antolin Lorenzana” andando a 100 ppm. Antolin tiene una masa corporal de 91,6 kilogramos, dato importante para el posterior cálculo de diferentes datos.

En este análisis, nos vamos a centrar en estudiar en profundidad las fuerzas extraídas de las plantillas y diferentes magnitudes obtenidas del sensor B7, colocado a la altura de la cintura en la parte anterior del cuerpo, el cual, al estar ubicado en un punto del plano de simetría del cuerpo del sujeto, representa muy bien el movimiento a realizar.

En primer lugar, procedemos como se ha comentado anteriormente, insertando los datos del paseo a analizar de las plantillas y del XSENS B7 en un mismo libro de Excel.

4.1 Calibración de las plantillas

Para comprobar cómo de calibradas están las plantillas, vamos a utilizar los datos tomados tal y como hemos explicado en el apartado 3.4.2.

El resultado directamente obtenido de la toma de datos es el de la Figura 11, correspondiendo el eje horizontal al tiempo en segundos y, el eje vertical a la fuerza en Newtons. En color azul se representan gráficamente los datos recogidos por la plantilla del pie izquierdo y, en naranja, los del pie derecho.

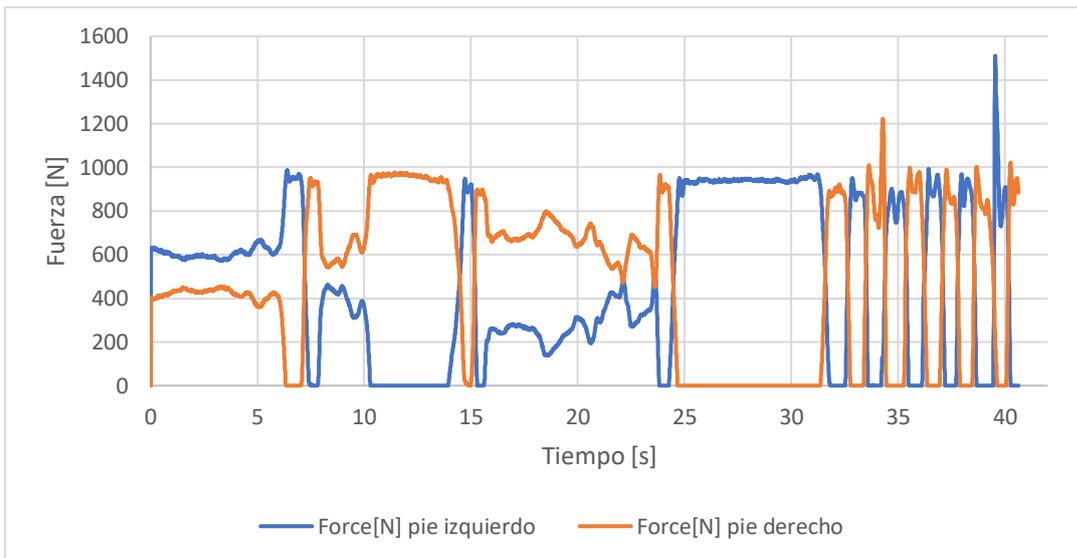


Figura 11. Fuerza de las plantillas respecto al tiempo.

El sujeto Antolin tiene una masa corporal de 91,6 kilogramos y se sabe que la aceleración a la que está sometido, estando de pie sin someterse a ningún movimiento, es la de la gravedad, 9,80665 m/s².

$$F[N] = m[kg] \times a\left[\frac{m}{s^2}\right]$$

Ecuación 1. Segunda del del movimiento de Newton

Con esta información y la ayuda de la Ecuación 1 se puede hallar el peso de Antolin que resultando 898,29 N.

Para calibrar ambas plantillas hay que trabajar con aquellos instantes de tiempo en los que un pie está apoyado completamente en el suelo y el otro se encuentra en el aire.

En los datos recogidos en el periodo de tiempo comprendido entre los 10,30 y 13,93 s desde el inicio de la grabación, se puede observar que la fuerza ejercida sobre la plantilla izquierda es nula mientras que, sobre la otra plantilla, a efectos teóricos, la fuerza debería ser la del peso de Antolin al recaer todo el peso sobre la pierna derecha.

Durante este tiempo, la fuerza sobre la plantilla derecha no toma siempre el mismo valor por dos posibles causas: la falta de exactitud (proximidad del resultado con respecto al valor verdadero) o, factores externos, como por ejemplo puede ser, la pérdida de equilibrio de la persona cuyos paseos estamos analizando. Para seguir con los cálculos lo que hay que hacer es

calcular el valor promedio durante este periodo calculándolo con la función “=PROMEDIO()” de Excel y eligiendo el rango de filas en los que la fuerza sobre el sensor del zapato izquierdo es nula. El valor resultante en este caso es de 955,82 N.

Hay diferentes causas por las que los valores de la fuerza ejercida sobre la plantilla derecha (955,82 N) y el peso del sujeto (898,29 N) no coinciden, y estas son similares a las que provocan la variabilidad de la fuerza medida sobre la plantilla durante este periodo.

Es ahora, cuando se realiza el proceso de calibración en el que se modifica la información. El objetivo principal es adquirir el valor ideal buscando la exactitud y evitando tener en cuenta aquellos factores que hacen que este valor experimental o práctico no sea el teórico o ideal.

Para ello, se necesita un factor de conversión por el que multiplicar cada valor de la columna con la información correspondiente a la fuerza directamente obtenida en la grabación de la plantilla derecha. Este factor de conversión se calcula dividiendo el valor ideal de la fuerza (898,29 N) entre el experimental promedio (955,82 N) cuyo resultado es el factor con un valor de 0,94. El objetivo de la realización de esta operación es que el promedio de la columna “resultado” coincida con el valor del peso.

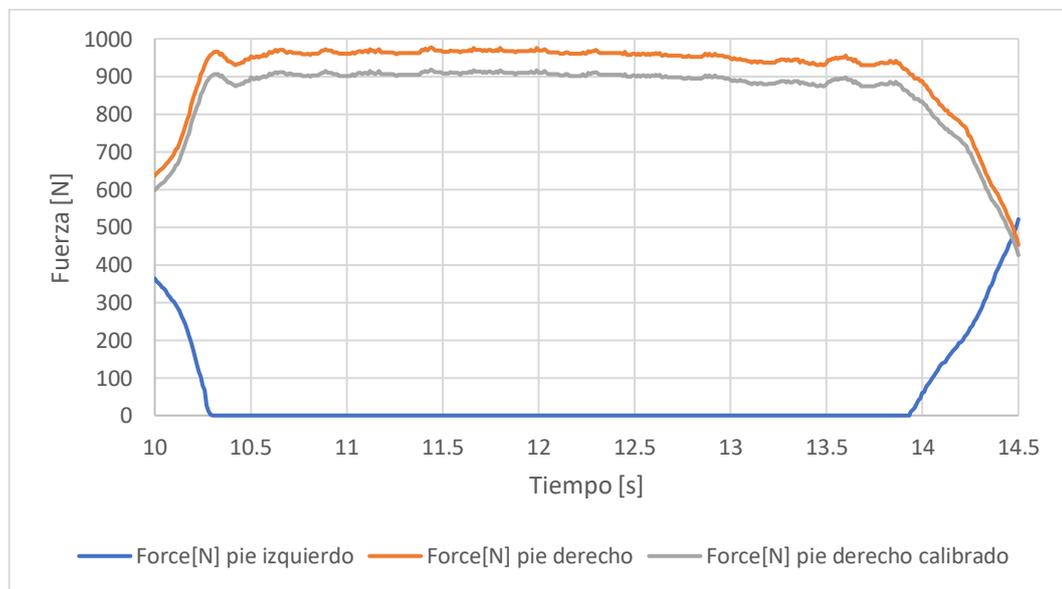


Figura 12. Calibración de la plantilla derecha.

En Figura 12 está representado tanto la grabación de las plantillas en ese periodo comentado como, de color gris, los datos de la plantilla derecha una vez calibrados con el factor de conversión.

Con el periodo de tiempo en el que el pie que está en el aire es el derecho procedemos de la misma manera. El promedio de la fuerza sobre el pie izquierdo en este periodo (desde el segundo 24,68 hasta el 31,35) toma un valor de 938,96 N, así siendo 0,96 (898,29/938,96) el valor del factor de conversión en este caso.

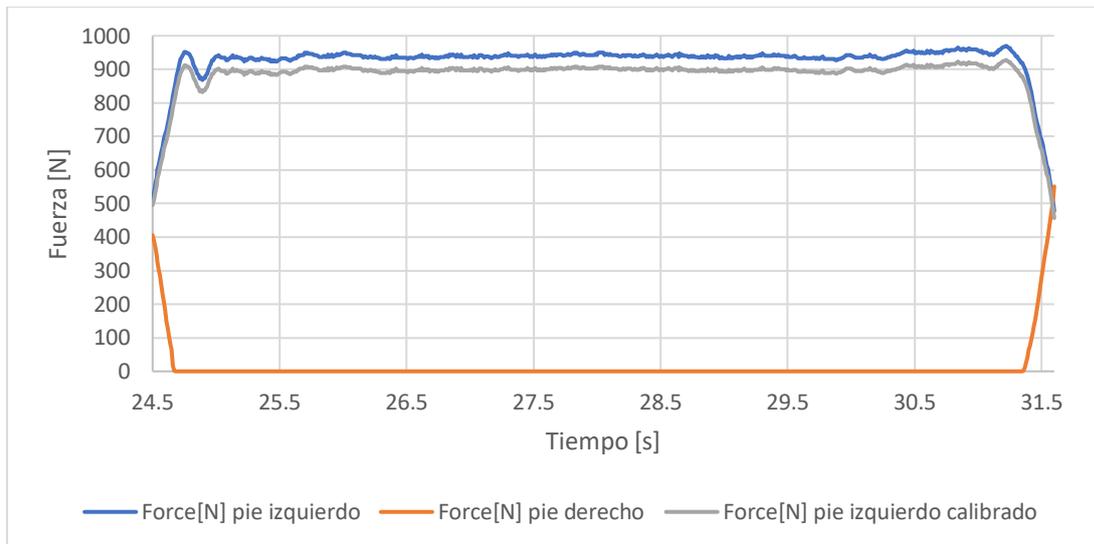


Figura 13. Calibración de la plantilla izquierda.

En la Figura 13 están representados tanto la grabación de las plantillas en ese periodo comentado como, de color gris, los datos de la plantilla izquierda una vez calibrados con el factor de conversión.

El resultado de la grabación realizada para la calibración de las plantillas con estas ya calibradas es el mostrado en la Figura 14.

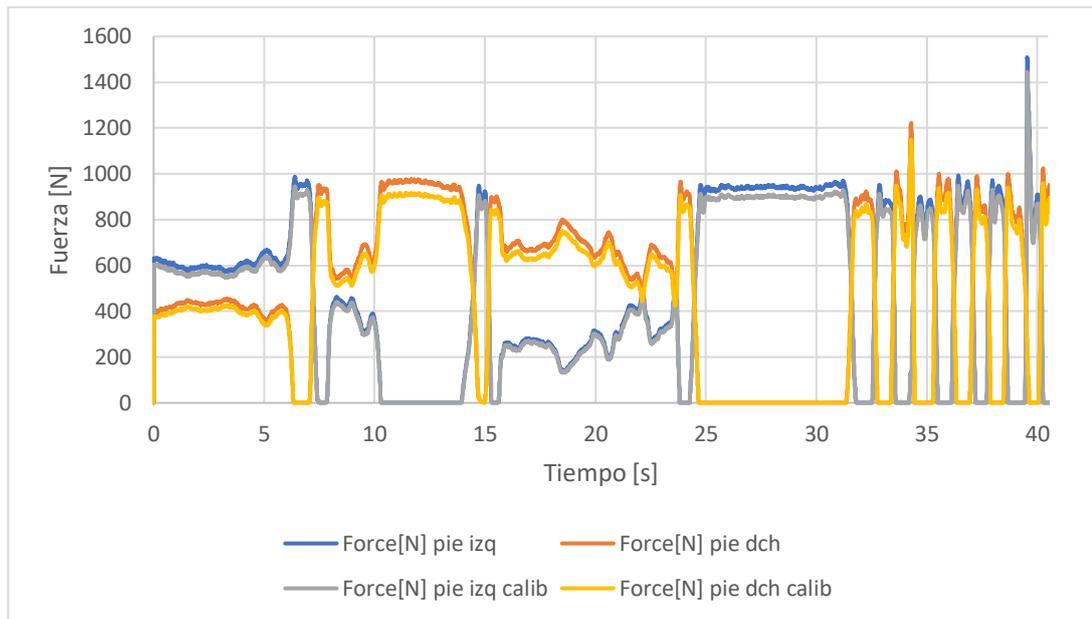


Figura 14. Plantillas calibradas.

4.2 Calibración Xsens

Para la calibración de los Xsens se procede de una manera similar a con las plantillas. Para explicar el procedimiento se va a utilizar la grabación de un paseo realizado por Antolin a 110 ppm.

Los datos que se necesitan para calibrar los Xsens son las aceleraciones del sensor en los 3 ejes del fichero descargado de Excel. Para trabajar con ellos, se crea una nueva columna de tiempo en segundos ya que es la unidad de tiempo que vamos a utilizar en todo momento en lugar del *Sample Time* del fichero. Los sensores estaban configurados durante el paseo para trabajar con una frecuencia de 120 Hz, lo que significa, que recoge un dato cada $1/120$ segundos (el periodo es la inversa de la frecuencia). La nueva columna de tiempo es una secuencia de números que comienza en 0 y sigue un patrón de $+1/120$ (0,0083333 s).

Para la calibración se va a utilizar la información conseguida en los cuatro primeros segundos de grabación, ya que son aquellos en los que el sujeto ha permanecido de pie sin realizar ningún movimiento. Teóricamente, durante este periodo de tiempo, la única aceleración a la que está sometido el sensor es la de la gravedad.

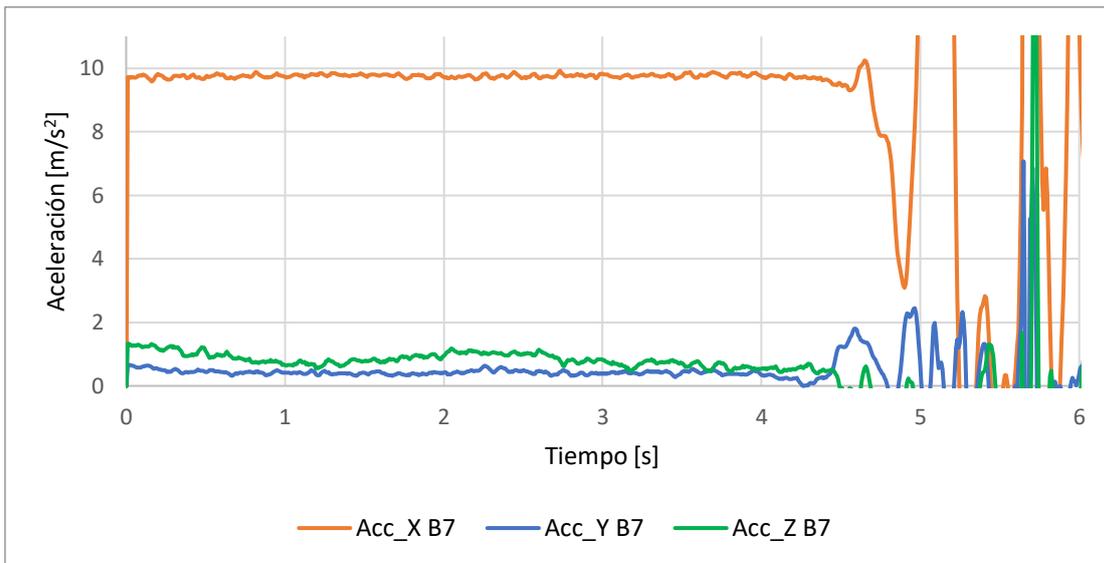


Figura 15. Periodo de tiempo con las aceleraciones constantes medidas sobre el sensor B7.

En la Figura 15 están representadas las aceleraciones recogidas en los tres ejes por el sensor a analizar respecto a los 6 primeros segundos de grabación. Durante los primeros 4 segundos se puede ver a simple vista que las aceleraciones son constantes, cada una toma un valor que prácticamente no varía con una mínima oscilación en torno a este. Esto se puede deber a diferentes causas como por ejemplo la propia respiración del sujeto, sobre todo en el caso del Xsens B7 que se está analizando ya que está situado muy cerca de los pulmones. Una vez superados los 4 primeros segundos, las aceleraciones empiezan a aumentar y disminuir de forma clara debido a que el sujeto ya no se encuentra en la situación buscada de máximo reposo posible.

Sabiendo esto, se puede analizar cómo de exacto es el Xsens con el que estamos trabajando, comparando la aceleración experimental (la medida por nuestro acelerómetro) con la teórica (la gravedad).

Si nuestro sensor estuviese verticalmente colocado sin inclinaciones, el valor de la gravedad lo tomaría la componente z de la aceleración (vector perpendicular al suelo con el eje positivo saliente del suelo). Al no trabajar en ese caso debido a un posicionamiento de forma natural de las diferentes partes del cuerpo, la aceleración que buscamos, para compararla con el valor de la gravedad, la obtenemos realizando el módulo de las tres componentes que tenemos en cada instante de tiempo (durante el periodo de aceleraciones constantes). Ver Ecuación 2.

$$acc = \sqrt{accx^2 + accy^2 + accz^2}$$

Ecuación 2. Módulo de las aceleraciones



Esta operación se realiza en Excel mediante la fórmula “=RAIZ()” así automatizando la operación matemática, evitando errores, mejorando redondeos y ganando mucho tiempo en comparación a si se hiciese manualmente debido a la gran cantidad de valores y la precisión de estos (hasta 9 decimales).

Una vez que se tiene el valor del módulo de la aceleración en todos los instantes de tiempo durante los primeros cuatro segundos de grabación (uno cada 0,0083333 segundos), se halla el promedio de todos ellos. Si nuestro instrumento estuviese perfectamente calibrado, este valor debería coincidir con el valor de la gravedad.

Según los cálculos realizados con la función “=PROMEDIO()”, el valor medio es 9,806670012 m/s², mientras que el de la gravedad es 9,80665 m/s². Estos valores son casi iguales, el experimental es un 0,0002039% superior al teórico. Se podría dar por calibrado el sensor debido a la poca diferencia entre ambos números, pero podría no ser el caso y que la precisión fuese mucho menor de manera que es preferible calibrar en todas las ocasiones para conseguir una mayor calidad en los resultados.

$$\frac{9,80667}{9,80665} = 1,000002039$$

A continuación, se modifican todos los datos de las aceleraciones, incluidos los que no pertenecen a estos cuatro primeros segundos de la grabación, para que el valor promedio coincida con el valor de la gravedad. Esto se consigue multiplicando todos ellos por un factor de conversión cuyo valor se halla haciendo la siguiente proporcionalidad.

$$\frac{9,80665}{9,80667} = 0,99999796$$

Realizando esta sencilla operación con Excel, ya estaría el acelerómetro perfectamente calibrado. Los valores se utilizarán a partir de ahora son estos nuevos con los sensores calibrados.

4.3 Sincronización del Xsens con las plantillas

Sincronizar es hacer que coincidan en el tiempo dos o más movimientos o fenómenos. Este paso es muy sencillo gracias a los saltos que ha dado el sujeto

tanto al inicio como al final de la grabación. En principio, solo se va a necesitar uno de los dos saltos eligiendo en este caso el primero a pesar de que la elección del salto no afecta al resultado final.

Si representamos las aceleraciones grabadas por el acelerómetro junto a las fuerzas medidas por las plantillas en una misma gráfica (ver Figura 16), permite observar muy claramente que el salto no coincide en el tiempo, pero la realidad no es esa. Esto se debe a que, a la hora de analizar los datos obtenidos, al haber iniciado la grabación del Xsens posteriormente a la de las plantillas, el conjunto de información que obtenemos empieza en el instante en el que se inicia cada una de las grabaciones así creando un vector tiempo diferente.

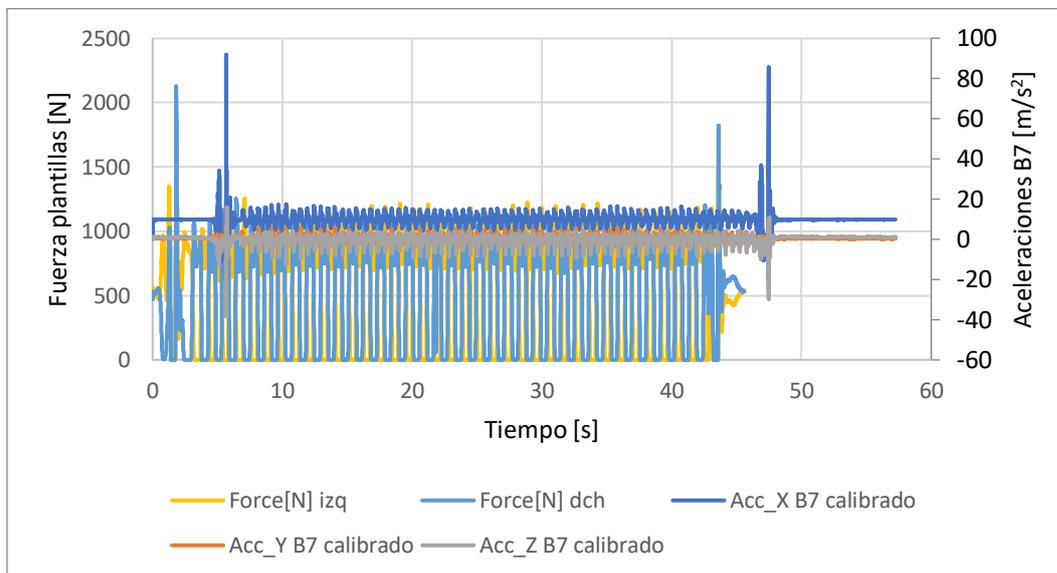


Figura 16. Fuerzas y aceleraciones respecto al tiempo sin sincronizar.

En la Figura 16 se aprecia que para el vector de tiempo que comienza con el inicio de cada grabación, el cambio brusco de la aceleración en nuestro XSENS ocurre alrededor del segundo 4,5, mientras que el de la fuerza grabada por las plantillas, aproximadamente en el segundo 1,5.

Resumidamente, lo que se va a hacer para calibrar en primer lugar es hallar los instantes de tiempo en los que se obtienen la fuerza y la aceleración máxima, los cuales se alcanzan en el momento en el que se produce el salto. Esto se debe a que, en el caso de las plantillas, al caer con fuerza después del salto, sobre él suelo se ejerce mucha más fuerza que en cualquier otro momento de la grabación. En el caso de los Xsens, cuando tiene lugar el salto vertical, en x graba la máxima aceleración de la grabación. Para obtener el momento buscado, a efectos prácticos hay que buscar el valor más alto de los grabados y ver a que instante de tiempo corresponde, pero para facilitar este trabajo es

recomendable ayudarse de Excel y utilizar las ventajas de las fórmulas (ver apartado 4.3.1) así siendo lo más exactos y precisos.

El valor máximo de ambas magnitudes se encontrará gracias a la función “=MAX()”. Esta fórmula es muy sencilla de usar, simplemente hay que meter dentro del paréntesis el rango de datos dentro del que queremos buscar el número con mayor valor. Para hallar la fuerza máxima, es indiferente que se aplique esta función en la columna de datos del pie derecho o del pie izquierdo y, lo mismo pasa, con las aceleraciones, ya que la aceleración máxima de cada acelerómetro, es alcanzada en el mismo instante de tiempo.

Una vez obtenidos los valores tanto de fuerza como de aceleración máxima, nos ayudamos de la función “=COINCIDIR()” gracias a la cual se encontrará en qué fila de nuestra página del libro de Excel (instante de tiempo) se encuentran estos valores máximos. La información que requiere la fórmula es “=COINCIDIR(valor buscado; matriz buscada; [tipo_de_coincidencia])”. En el caso actual de estudio, esos datos a introducir son los siguientes:

- Valor buscado: es el valor hallado anteriormente de la fuerza y aceleración respectivamente. Este valor corresponde al hallado anteriormente con la fórmula “=MAX()”.
- Matriz buscada: es el rango de datos en el que hemos buscado el valor máximo de la fuerza/aceleración.
- Tipo de coincidencia: dependiendo de lo que busquemos podemos introducir 3 números que son:
 - o 1: menor que.
 - o 0: coincidencia exacta.
 - o -1: menor que.

En este caso hay que introducir un “0” ya que lo que se busca es el número de fila exacta en la que se encuentra el valor máximo.

Y, por último, con la función “=INDICE()”, se puede encontrar el instante de tiempo en el que ha ocurrido el salto para cada sensor, relacionando la fila que se ha obtenido anteriormente, con la columna del vector tiempo (diferentes para las plantillas que para el Xsens). Para ello hay que introducir los datos necesarios de la siguiente forma “=INDICE(matriz; núm_fila; [núm_columna])”, dónde cada dato corresponde a:

- Matriz: es el rango de datos en el que se busca el valor máximo de la fuerza/aceleración.
- Número de fila: el correspondiente con el valor máximo de la fuerza/aceleración. Número hallado anteriormente con la fórmula “=COINCIDIR()”.
- Número de columna: aquella en la que está el valor que se busca. En

este caso, al ser la finalidad de la aplicación de esta fórmula encontrar el instante de tiempo en el que se alcanza la fuerza/aceleración máxima, la columna será la del tiempo en segundos.

Los resultados obtenidos que siguen el procedimiento detallado son los de la Tabla 1, sacada directamente del fichero de Excel.

fuerza maxima izq [N]	1827.5	accx max [m/s ²]	91.8393664
fila fuerza max	183	fila acc max	682
tiempo en el que se alcanza el maximo [s]	1.81	tiempo en el que se alcanza el maximo [s]	5.66666664

Tabla 1. Valores máximos de la fuerza y aceleración y el instante de tiempo en el que se alcanzan.

Una vez se conoce el momento en el que se alcanza la fuerza máxima y en el que se alcanza la aceleración máxima, se comparan para ver que grabación ha comenzado antes. El salto grabado por ambos dispositivos es el mismo, por lo que la grabación que ha comenzado antes es la que tiene su máximo más tarde ya que en el periodo de tiempo entre que se empieza a grabar hasta que ocurre el salto se encuentra el inicio de la grabación del segundo dispositivo y lo que ello conlleva (cerrar la primera aplicación, abrir la otra, darle al botón comenzar grabación...). Estas últimas acciones son en la práctica la causa de la diferencia temporal a pesar de ser el mismo salto.

En este caso, sabemos según los datos extraídos de los dispositivos que la grabación de los XSENS ha comenzado antes que la de las plantillas ya la fuerza máxima se alcanza antes que la aceleración máxima. Esto se ve claramente en la Figura 16.

Para sincronizar toda la información y así trabajar con los datos obtenidos de todos los sensores de manera realista hay que adelantar la grabación de los Xsens una cantidad de tiempo equivalente a la diferencia entre los picos de ambas grabaciones. En este caso habría que hacer la siguiente operación $5,67 - 1,81 = 3,86$ segundos.

En Excel hay que eliminar las filas de datos obtenidos por los acelerómetros correspondientes a los primeros 3,86 segundos de grabación. El resultado de esto es la sincronización de toda la información siendo la nueva representación sincronizada la de la Figura 17.

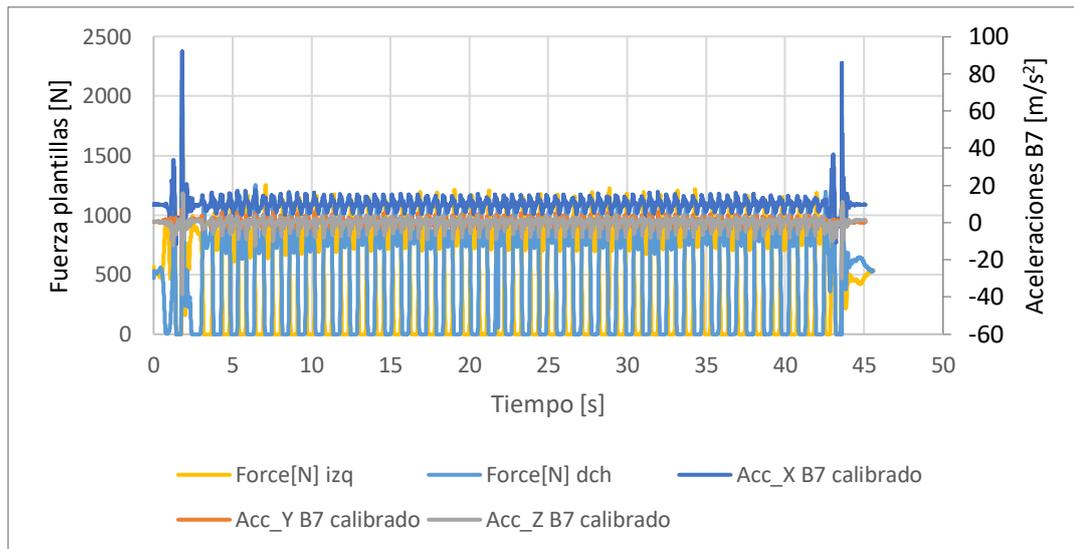


Figura 17. Fuerzas y aceleraciones respecto al tiempo sincronizados.

4.3.1 Uso de funciones y fórmulas en Excel para la calibración

Para realizar la calibración con Excel en este trabajo se ha optado por utilizar fórmulas y funciones como las explicadas anteriormente ya que estas permiten a los usuarios realizar una amplia variedad de tareas de cálculo y análisis de datos de manera eficiente [5]. Gracias a ellas se pueden obtener beneficios como los siguientes entre otros:

- **Ahorro de tiempo:** esto es especialmente útil para tareas repetitivas o cálculos complejos que tomarían mucho tiempo si se hicieran de forma manual. En nuestro caso, esta ventaja nos beneficia por ejemplo en el caso de tener que cambiar los datos de entrada de las funciones (valores de las fuerzas/aceleraciones) que, si hubiese que cambiarlos, todos los valores hallados con fórmulas se actualizarían automáticamente.
- **Precisión y reducción de errores:** con el objetivo de reducir la posibilidad de cometer errores en los cálculos. Los errores pueden ser costosos en términos de tiempo y recursos, y pueden llevar a decisiones equivocadas. En nuestro caso, se puede valorar esta ventaja de forma sencilla al utilizar la función “=MAX()” ya que si no se usase es probable que entre tantos valores se juzgase por error como máximo un número que no es el mayor de los grabados.
- **Facilita el análisis de datos:** es el principal objetivo del uso de las fórmulas en este trabajo ya que permite obtener información valiosa,

como son promedios o valores máximos, de los datos de manera rápida y sencilla.

- **Permite crear gráficos y tablas dinámicas a partir de los datos numéricos:** Facilita la visualización y la presentación de información de manera efectiva, siendo en este caso útil para el análisis y comprensión de los datos de una manera más evidente.

4.4 Paso representativo

4.4.1 Selección del paso representativo

Una vez se tienen los datos de las grabaciones de los dispositivos calibrados y sincronizados, se selecciona un paso representativo gracias al cual se puedan estudiar diferentes características del movimiento del cuerpo del sujeto durante el paseo a la velocidad analizada.

El proceso de locomoción a analizar corresponde a la marcha humana, en el cual el cuerpo humano, se mueve hacia delante siendo su peso soportado alternativamente por ambos miembros inferiores. [1]

El patrón cíclico de movimiento que se produce al caminar se conoce como ciclo de la marcha. Un ciclo de marcha comienza con el talón de un pie tocando el suelo y termina con el mismo talón tocándolo nuevamente. [6]

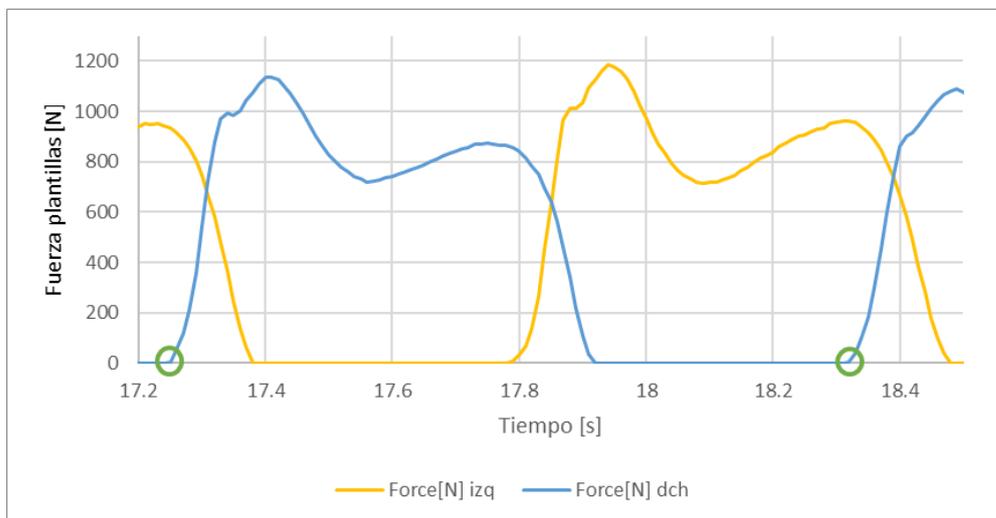


Figura 18. Fuerza grabada por las plantillas respecto al tiempo en un paso representativo.

La grabación elegida para todo este análisis duró 45 segundos aproximadamente (ver Figura 17). El ciclo elegido es el de la Figura 18, que corresponde al periodo entre el segundo 17,24 y el segundo 18,31 de dicha

grabación.

Este intervalo de tiempo del ciclo de la marcha (cuyo comienzo y fin están señalados con círculos de color verde) en el que se ve completo la fuerza ejercida por un pie sobre la plantilla durante el ciclo de la marcha lo llamaremos “1 periodo de observación”

De la grabación completa, he elegido este periodo porque es un ciclo intermedio en el que la frecuencia del paso ya es constante, es decir, si cogiese un paso completo de los primeros segundos no sería lo suficientemente representativo ya que el sujeto está acelerando su frecuencia de marcha hasta adoptar la marcada por el pulsómetro y adaptarse a ella lo mejor posible así teniendo un paso posiblemente irregular y que no nos proporciona la información correcta. Lo mismo nos pasaría si cogemos un paso de los últimos segundos ya que a pesar de que el sujeto no frena de forma seca, inevitablemente va perdiendo el ritmo.

4.4.2 Análisis del paso representativo

La marcha tiene dos principales fases o etapas que son la fase de apoyo y la fase de oscilación. [1]

- **Fase de apoyo:** es la etapa del ciclo en la que el pie se encuentra sobre el suelo sosteniendo el peso del cuerpo. Va desde el golpe de talón hasta el despegue del antepié y ocupa aproximadamente el 40% del ciclo. Esta fase es más corta que la fase de oscilación ya que se inicia y finaliza con periodos relativamente cortos de apoyo bipodal.

Esta fase consta de 5 subfases:

- o **Golpe de talón.** Corresponde al momento en el que el talón del pie hace contacto con el suelo. Ver Figura 19 (A).
 - o **Respuesta de la carga** o aplanamiento del pie. En la cual el pie se desplaza hacia delante hasta que la cara plantar está completamente en contacto con el suelo. Ver Figura 19 (B).
 - o **Apoyo medio.** Comienza cuando el peso del cuerpo se impulsa hacia delante. Ver Figura 19 (C).
 - o **Apoyo terminal** o despegue del talón que incluye el levantar el talón del suelo. Subfase que ocurre cuando se comienza a transferir el peso del cuerpo hacia la otra pierna. Ver Figura 19 (D).
 - o **Preoscilación** o despegue de los dedos. Etapa final que incluye el empuje de los dedos contra el suelo mientras el talón realiza una flexión plantar así creando un impulso hacia delante. Ver Figura 19 (E).
- **Fase de oscilación:** es la segunda fase de la marcha que va desde el

despegue del antepié hasta el golpe de talón y ocupa el 60% del ciclo. En esta fase el pie queda libre para moverse hacia adelante.

Esta fase está compuesta por 3 subfases:

- **Oscilación inicial** o fase de aceleración. Durante esta subfase el pie se levanta del suelo con la intención de mover la pierna hacia delante. Ver Figura 19 (F).
- **Oscilación media.** Subfase durante la cual la pierna que no sostiene la carga pasa por delante de la pierna apoyada mientras que el tronco se mueve hacia adelante. Figura 19 (F).
- **Oscilación terminal** o fase de desaceleración. El pie se desplaza hacia adelante, la rodilla se estira y el movimiento se ralentiza. En este instante la pierna está lista para recibir otro golpe de talón y transferir el peso del cuerpo, comenzando la siguiente fase de apoyo. Ver Figura 19 (G).

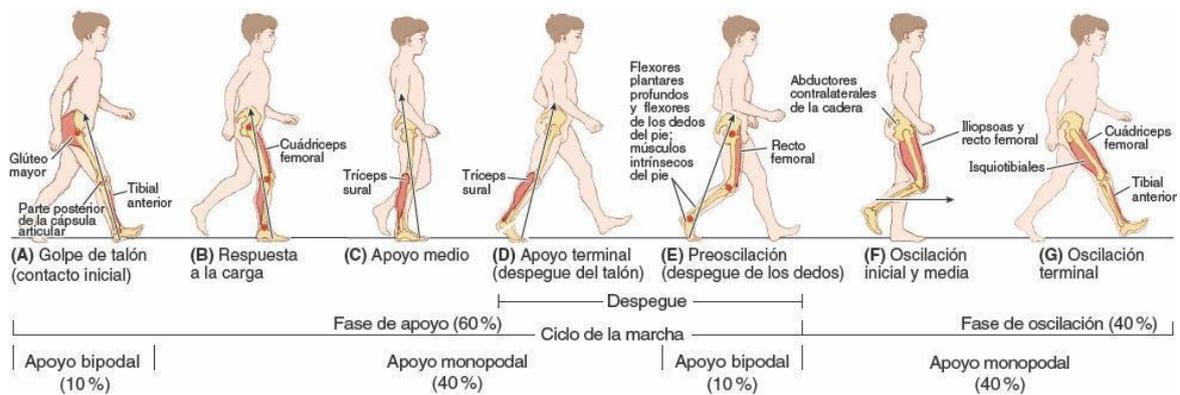


Figura 19. Fases y subfases del ciclo de la marcha. [7]

La fuerza generada por un paso durante la fase de apoyo sigue un patrón con el siguiente aspecto:

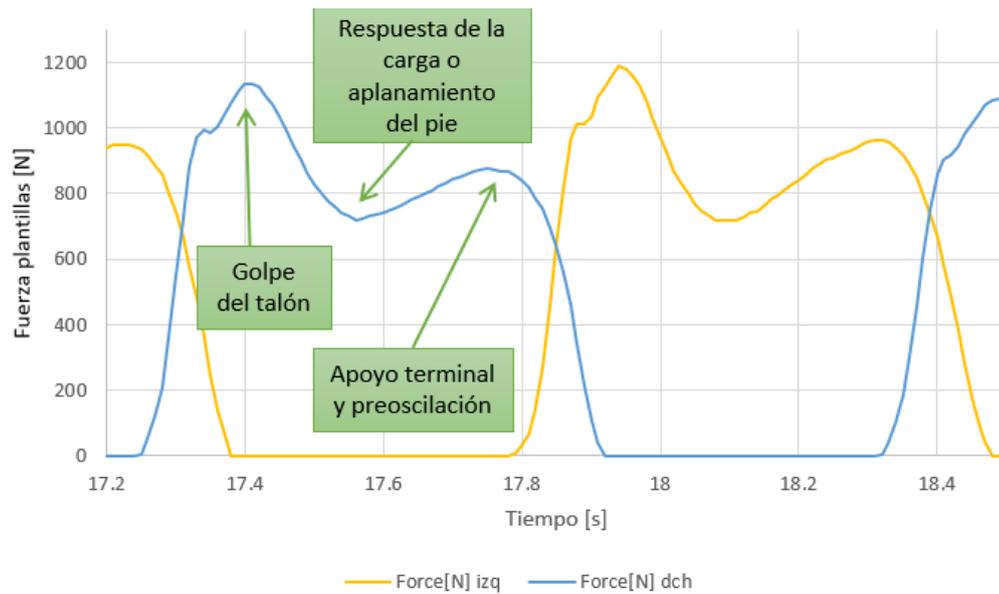


Figura 20. Fuerza de las plantillas respecto al tiempo.

En la gráfica de la Figura 20 se aprecia que la representación de la fuerza de las plantillas respecto al tiempo tiene forma de “M” con dos máximos y un mínimo relativo.

En el segundo 17,24 el pie derecho se comienza a apoyar así empezando a recaer el peso del sujeto sobre la pierna derecha. La fuerza sobre la plantilla derecha aumenta progresivamente a la vez que disminuye la ejercida sobre la plantilla izquierda.

En el caso de esta marcha seguida, centésimas de segundo más tarde del levantamiento completo del pie izquierdo del suelo (fuerza nula), se alcanza el primer máximo que corresponde al golpe de talón.

Una vez alcanzado este punto, disminuye la fuerza progresivamente, lo que corresponde a la respuesta de la carga, hasta alcanzar el mínimo relativo de esta “M”, instante en el que la planta del pie está completamente apoyada en el suelo.

Por último, tras volver a aumentar la fuerza durante el apoyo medio, fase en la que se empieza a levantar el talón del suelo y a ejercer progresivamente más fuerza sobre la punta del pie, llegamos al segundo máximo de la curva de la gráfica. Este punto coincide en la grabación con el instante en el que se comienza a apoyar el pie contrario y, al dejar de recaer todo el peso sobre la pierna derecha, a partir de este momento, la fuerza comienza a disminuir aumentando el peso que recae sobre la pierna izquierda, llegando así a la subfase de la preoscilación.

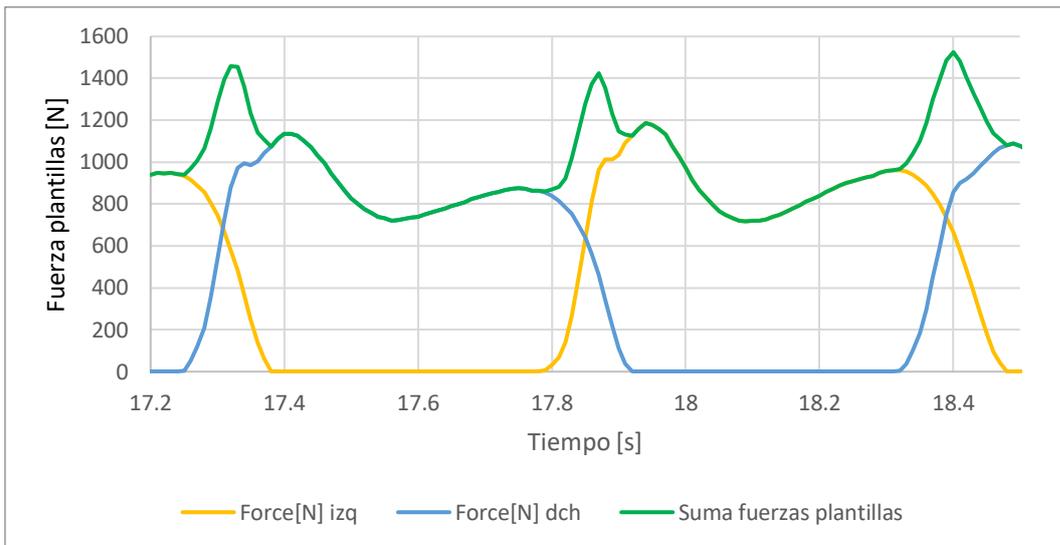


Figura 21. Representación de las fuerzas de las plantillas y de la suma de estas respecto al tiempo.

La línea de color verde trazada en la gráfica del paso representativo elegido (Figura 21) corresponde a la suma de las fuerzas grabadas por ambas plantillas en cada instante de tiempo.

Al pertenecer el ciclo de marcha a un paseo en el que el sujeto camina en vez de correr, hay un periodo de tiempo en el que ambos pies están apoyados como por ejemplo el comprendido entre los segundos 17,79 y 17,92. El inicio de este periodo de tiempo corresponde al instante en el que el pie izquierdo, específicamente el talón de este, contacta con el suelo y, finaliza con la separación completa del pie derecho (dedos o puntera) de la superficie. En este tiempo se alcanza un máximo de entre 1400 y 1500 Newtons aproximadamente de la suma de ambas fuerzas.

Durante el tiempo restante, aquel en el que solo hay un pie apoyado, la curva de la suma de la fuerza es equivalente a la de la fuerza de ese pie que se encuentra apoyado.

4.5 Fuerza vs aceleraciones

Una vez se ha acotado el periodo con el patrón de la marcha se puede analizar la información grabada con los Xsens relacionándola con el movimiento de la marcha.

Uno de los datos más representativos de los Xsens es la aceleración. Gracias a estos dispositivos, en especial al sensor B7 cuya información estamos estudiando, se puede analizar la relación entre las aceleraciones en los 3 ejes de un punto centrado en el abdomen a la altura de la cintura con la marcha.

En la Figura 22 se puede comprender fácilmente la ubicación del XSENS B7 junto con los ejes positivos de las aceleraciones.

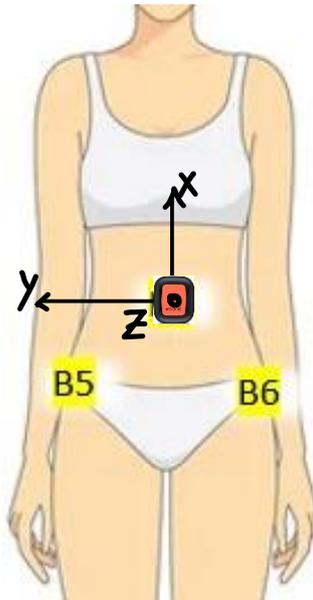


Figura 22. Ejes positivos del Xsens B7 [3]

Con esta información, se pueden ir analizando los diferentes patrones que se repiten de las aceleraciones del sensor B7 calibrado en cada eje junto a la marcha gracias a la fuerza de las plantillas.

Aceleración en el eje x

En primer lugar, se va a analizar el resultado de la representación de la aceleración en el eje x frente al tiempo y su relación con las curvas de las fuerzas de las plantillas. Una vez estudiado esto, se relacionará con el movimiento del sensor en la realidad así dándole explicación y sentido a los patrones analizados.

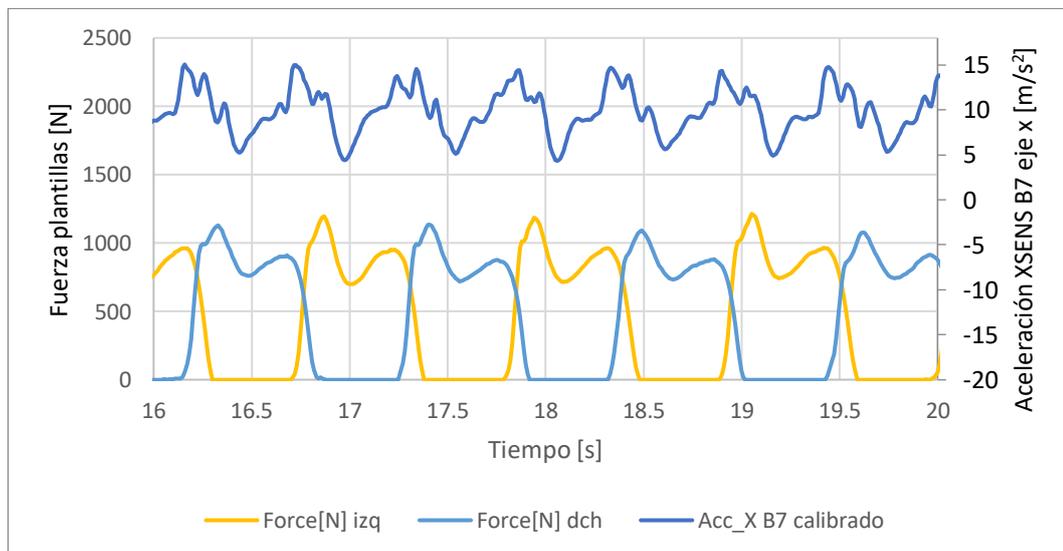


Figura 23. Fuerza de las plantillas y aceleración en x del Xsens B7 frente al tiempo.

Como se puede ver en la Figura 23, la aceleración en el eje vertical del sensor sigue un patrón. Lo más claro es que la aceleración mínima se alcanza en el instante justo anterior a en el que la fuerza de las plantillas alcanza el mínimo de la “M”.

También se puede observar a simple vista que la aceleración toma valores entre 5 y 15 m/s^2 aproximadamente oscilando en torno a $9.81 m/s^2$ que es el valor de la gravedad y de la aceleración en este eje cuando el sujeto está en la posición inicial.

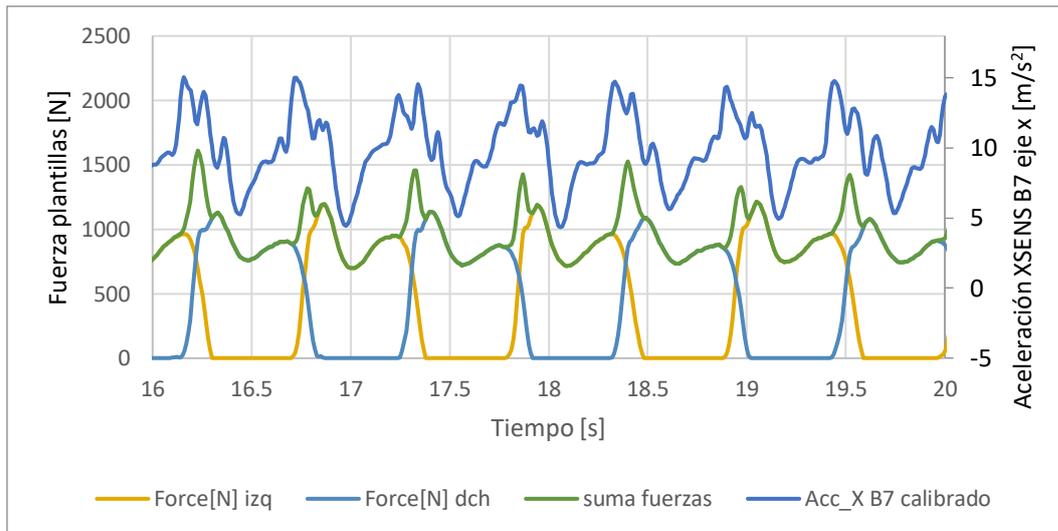


Figura 24. Fuerza de cada plantilla, la suma de ambas y aceleración en x del XSENS B7 frente al tiempo.

Para analizar más en profundidad la forma de la curva, ya que el patrón que se repite tiene varios máximos y mínimos relativos, se ha representado en una misma gráfica (Figura 24) cada fuerza individualmente y la suma de ambas junto a la aceleración en el eje x.

Al estar el sensor que está siendo estudiado situado en el eje simétrico del cuerpo, con representar únicamente un periodo de observación debería de ser suficiente para analizar el patrón que sigue la aceleración en este eje. A pesar de que la forma que adquiere la curva en dos periodos de observación consecutivos es muy parecida, es muy difícil que sea exactamente igual debido a muchas variabilidades que supongan una mínima asimetría y por ello se va a considerar necesario el estudio de dos periodos de observación consecutivos como patrón.

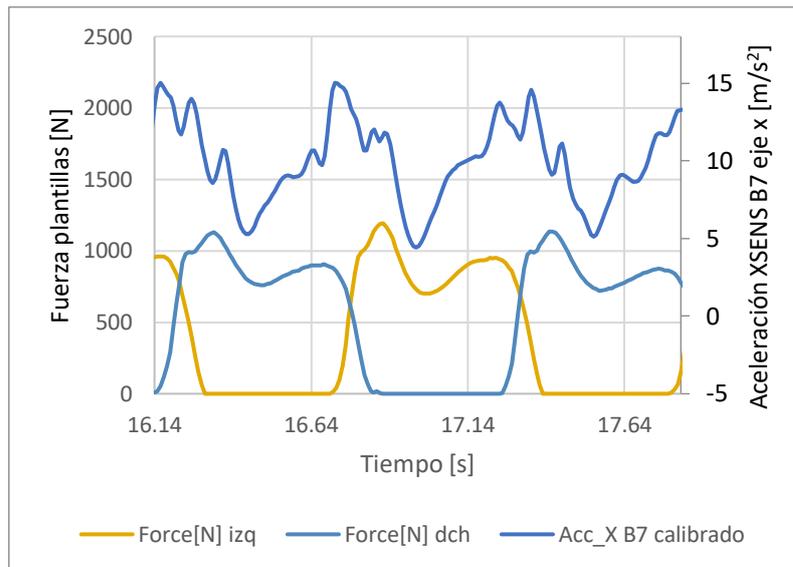


Figura 25. Aceleración en el eje x del Xsens B7 (simétrico) en dos periodos de observación.

En la Figura 25 están representados un ciclo de paso completo con cada pie, lo que corresponde a dos periodos de observación completos comenzando con el apoyo del pie derecho y finalizando con el levantamiento completo del pie izquierdo. En esta gráfica realizada con los datos obtenidos experimentalmente, se puede comprobar que, son necesarios dos periodos de observación para describir el comportamiento de la curva durante todo el paseo. Como ya se ha comentado, esto se debe a circunstancias externas como puede ser que el sujeto haya cojeado durante el paseo. Aun así, las diferencias entre dos periodos de observación consecutivos son mínimas, pero para un estudio más detallado, es preferible trabajar con dos periodos de observación.

Dos periodos de observación constituyen un patrón porque este se repite constantemente como se puede comprobar en la Figura 26.

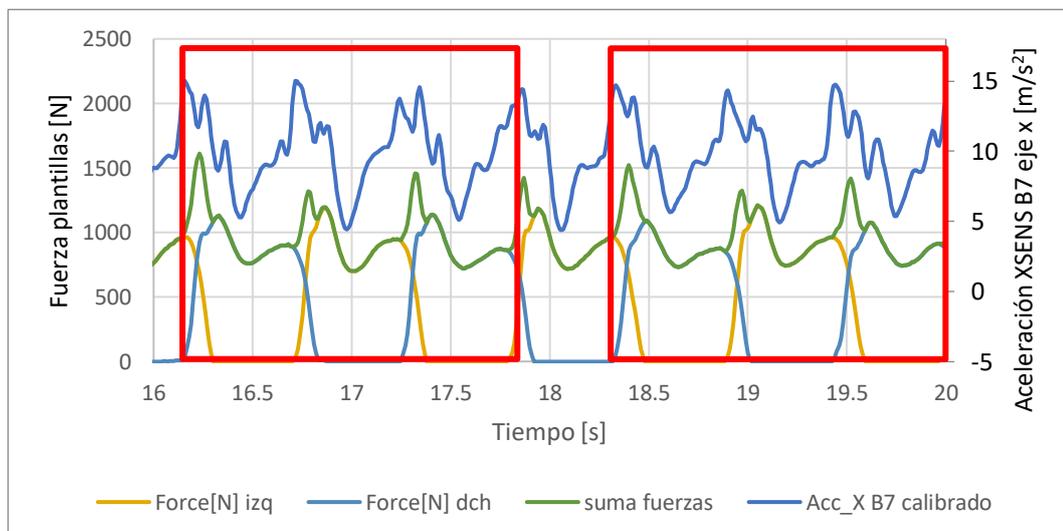


Figura 26. Patrón de la aceleración en x del Xsens B7.

En la Figura 27 están representados dos periodos de observación consecutivos por separado y gracias a estas gráficas se puede observar la diferencia entre ellos.

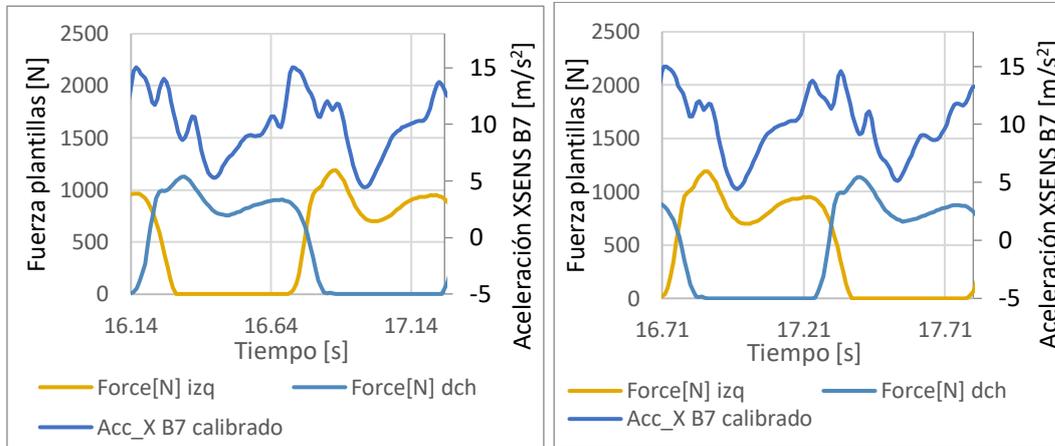


Figura 27. Dos periodos de la aceleración en el eje x Xsens B7 de representación consecutivos por separado.

Con la ayuda de las gráficas de las gráficas anteriores, se pueden sacar las siguientes conclusiones sobre el patrón que se repite constituido por dos periodos de observación. El patrón va a ser dividido en dos partes para su análisis: la primera abarca desde el aplanamiento del pie derecho hasta el aplanamiento del pie izquierdo y la segunda desde el aplanamiento del pie izquierdo hasta el aplanamiento del pie derecho.

La primera parte consiste en una subida no constante hasta alcanzar un máximo absoluto de 15 m/s^2 . No es constante ya que hay dos pequeñas oscilaciones coincidiendo la segunda de ellas con el segundo máximo de la curva de la fuerza de la plantilla derecha (subfase apoyo terminal). Una vez alcanzado el máximo, la aceleración disminuye hasta aproximadamente 11 m/s^2 y, a continuación, la curva toma la forma de una "M" coincidiendo esta con el máximo absoluto de la curva de la fuerza de la plantilla izquierda. Para acabar esta primera parte de la división hecha para estudiar el patrón, la aceleración disminuye hasta alcanzar un valor de 5 m/s^2 aproximadamente en el instante en el que la curva de la fuerza de la plantilla izquierda está en su mínimo relativo.

La segunda parte, comienza cuando la aceleración toma el valor de 5 m/s^2 comentado y a partir de ahí aumenta hasta estabilizarse durante unas centésimas de segundo en torno a una aceleración de 9 o 10 m/s^2 . Después continúa creciendo hasta alcanzar el primer máximo relativo que coincide con el apoyo terminal del pie izquierdo (máximo relativo de la curva de la fuerza de la plantilla izquierda), vuelve a disminuir hasta el instante en el que la suma de las fuerzas de ambas plantillas es máxima y vuelve a aumentar así llegando al máximo absoluto de esta segunda parte del patrón de la curva. Por último, disminuye de nuevo hasta los 9 m/s^2 y hace un último pico en el momento en

el que la fuerza sobre la plantilla derecha es máxima antes de disminuir hasta el aplanamiento del pie derecho.

Aceleración en el eje y.

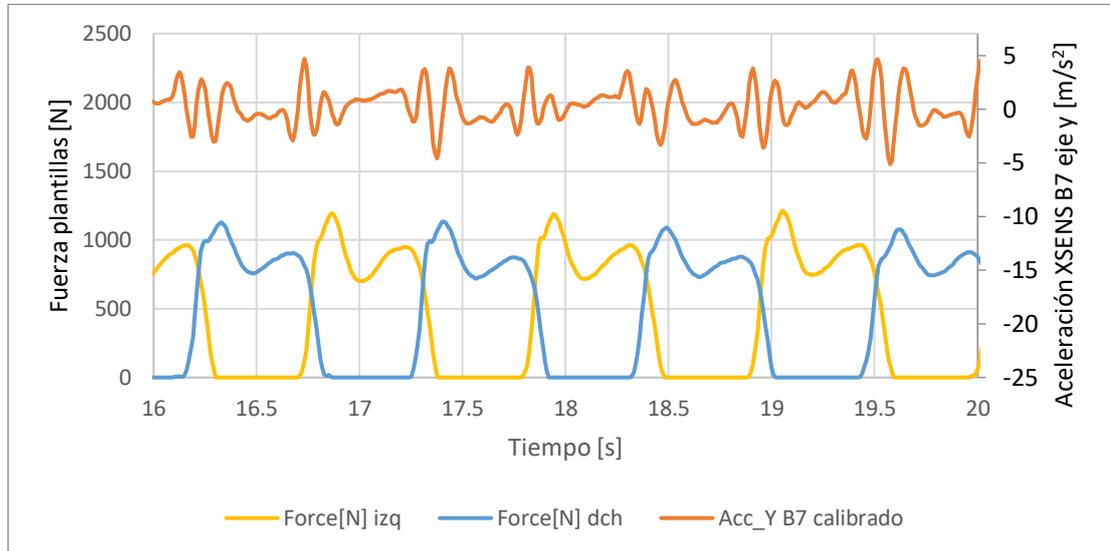


Figura 28. Fuerza de las plantillas y aceleración en y del Xsens B7 frente al tiempo.

Con la gráfica de la Figura 28 realizada en Excel se puede apreciar que la aceleración del eje y, al igual que la del eje x analizada anteriormente, sigue un patrón repetido con el ciclo de paso. Este patrón está compuesto por dos periodos de observación, es decir, dos ciclos de paso completos, uno con cada pie. El patrón es el de la Figura 29 mientras, que en la Figura 30, se señalan dos patrones consecutivos.

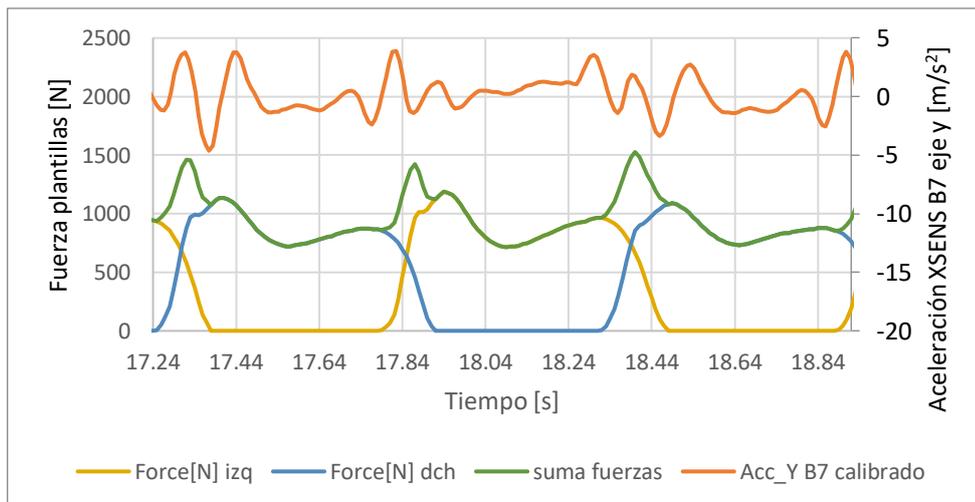


Figura 29. Aceleración en el eje y del Xsens B7 (simétrico) en dos periodos de observación.

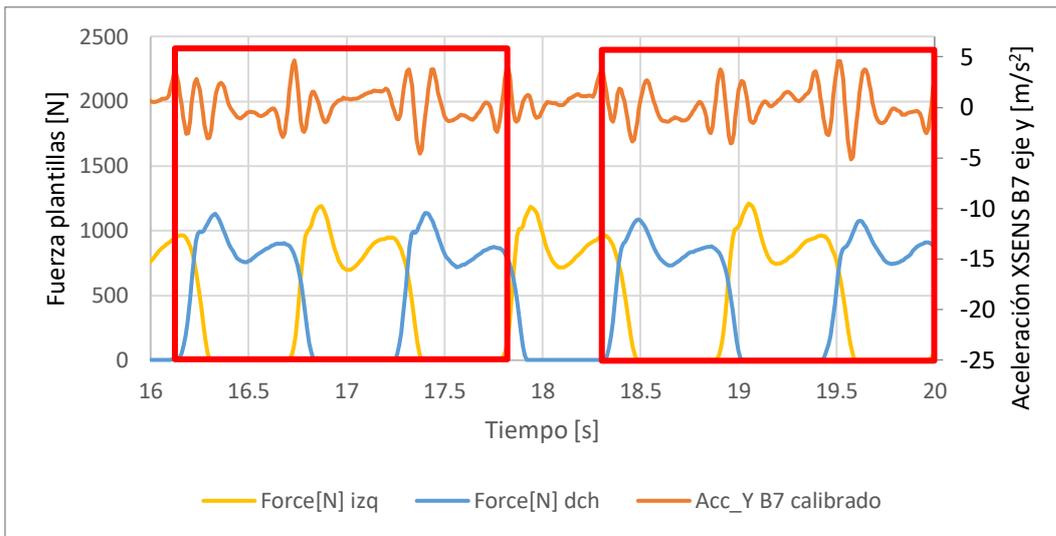


Figura 30. Patrón de la aceleración en y del Xsens B7.

Una vez se confirma la existencia del patrón se procede a analizar. Para ello sirve de ayuda la Figura 31, gráfica en la que está representada únicamente un ciclo de la marcha (fuerza de ambas plantillas y la suma de estas) junto a la aceleración en este eje.

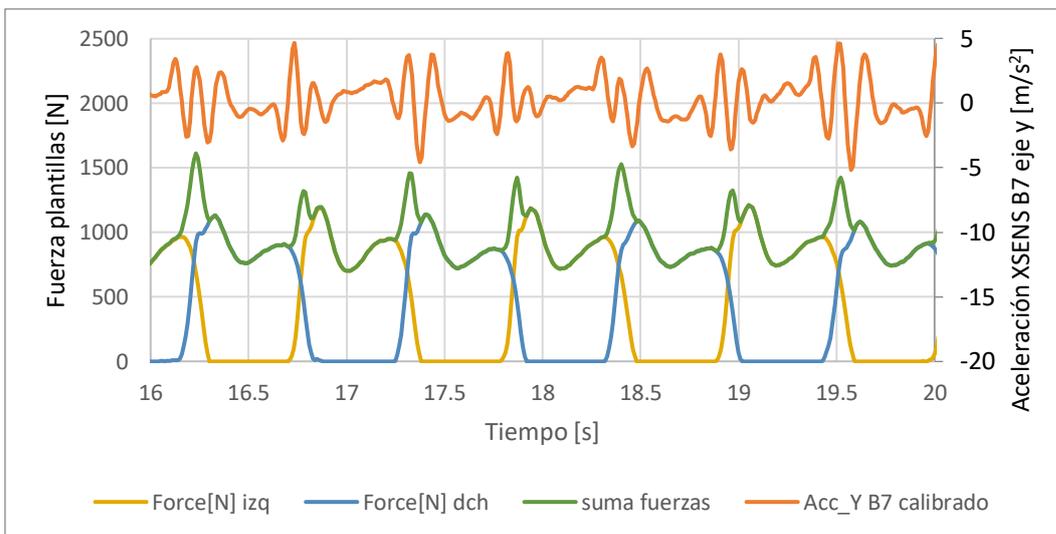


Figura 31. Fuerza de cada plantilla, la suma de ambas y aceleración en el eje y del Xsens B7 frente al tiempo.

Lo que más llama la atención de la línea de la aceleración son las claras variaciones de la aceleración entre -5 y 5 m/s² siendo la aceleración media aproximadamente nula. Estas oscilaciones ocurren aproximadamente en el momento de cambio del pie de apoyo sobre la superficie.

Entre estos cambios de apoyo, correspondiendo con las fases de respuesta de la carga y apoyo medio, se puede ver que la aceleración es más o menos

constante.

Mirando detalladamente la forma que adopta la línea naranja de la aceleración en la gráfica, además de seguir un patrón aproximado que se repite con cada paso, sigue un patrón que se repite con cada ciclo de la marcha. Dependiendo del pie que se vaya a apoyar en el cambio de pie, las oscilaciones son diferentes y esto está directamente relacionado con el movimiento de nuestro cuerpo.

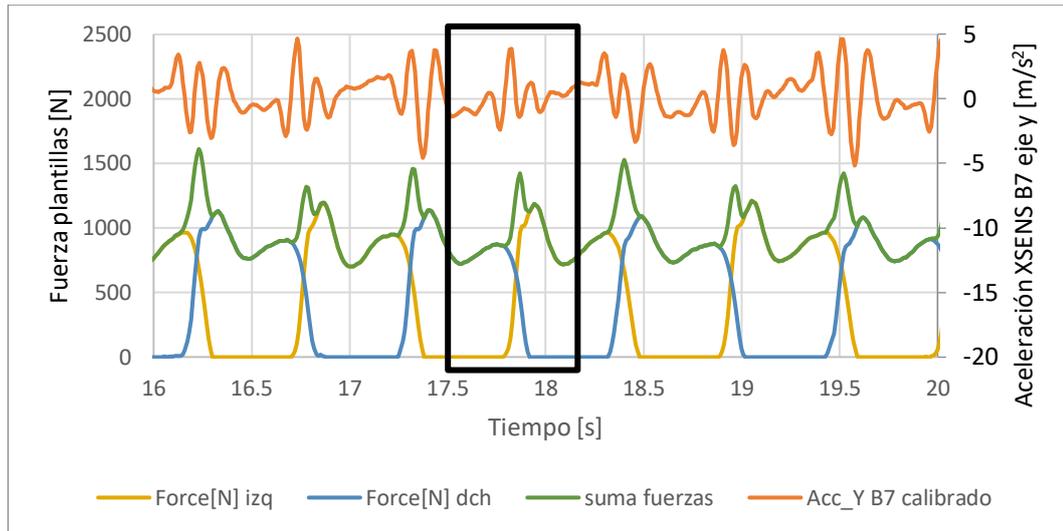


Figura 32. Aceleración del eje y del Xsens B7 durante la transición de la pisada del pie derecho al pie izquierdo.

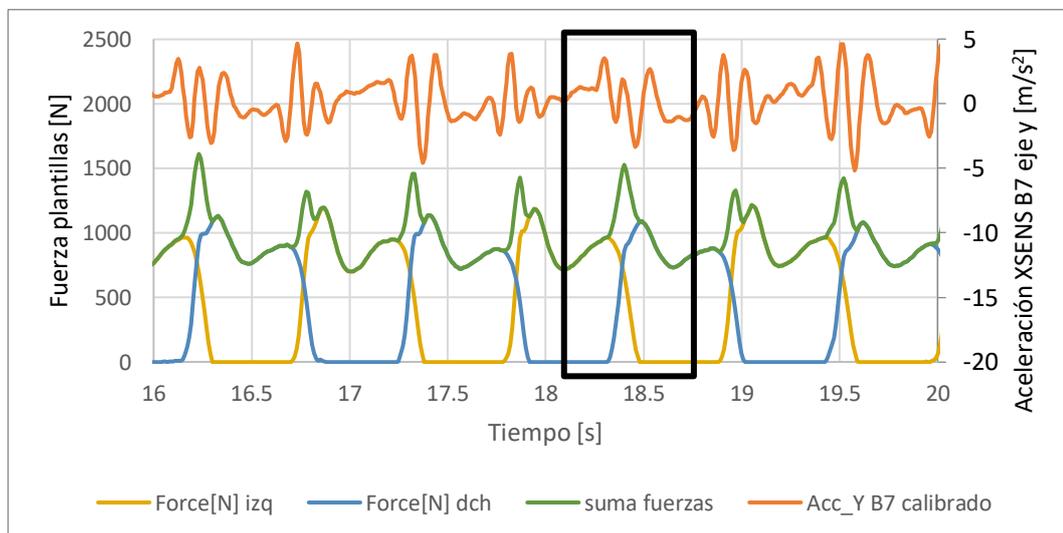


Figura 33. Aceleración del eje y del Xsens B7 durante la transición de la pisada del pie izquierdo al pie derecho.

En la Figura 32 y la Figura 33 se puede observar que en ambos cambios de pie de apoyo la curva de la aceleración en el eje y adquiere una forma similar. Esto se debe a que el Xsens cuya información se está estudiando está ubicado en el eje de simetría del cuerpo del sujeto. Aún así, como en el caso anterior, se van a utilizar dos periodos de observación, ver Figura 30, para definir el patrón seguido ya que así se consigue una menor dispersión entre las repeticiones del

patrón.

En el instante del cambio de apoyo se alcanza entre 5 y 6 máximos y mínimos que corresponden al momento del ciclo de marcha en el que la cintura aumenta la velocidad de manera más predecible en la dirección paralela al suelo de nuestro eje y. Los máximos y mínimos se deben a los movimientos no lineales del tronco del sujeto casi inapreciables a simple vista al caminar. Estas oscilaciones, al seguir un patrón con un número más o menos fijo de máximos y mínimos y al estar en un intervalo bastante acotado, datos que nos pueden aportar gran información, puede ser objeto de estudio futuro como análisis de los movimientos del tronco con una mayor precisión.

Una vez analizada la parte de la curva con las oscilaciones, se puede observar que, durante unos instantes, la aceleración en este eje se mantiene constante tomando el valor de 0 m/s^2 aproximadamente. Este valor medio de las oscilaciones se alcanza coincidiendo con la fase de apoyo medio de cada pie en el que la planta completa de este está apoyada y se debe a que, al recaer todo el peso sobre uno de los pies, el acelerómetro junto con el tronco no se desplaza en el eje estudiado siendo así la velocidad y la aceleración nula.

Aceleración en el eje z.

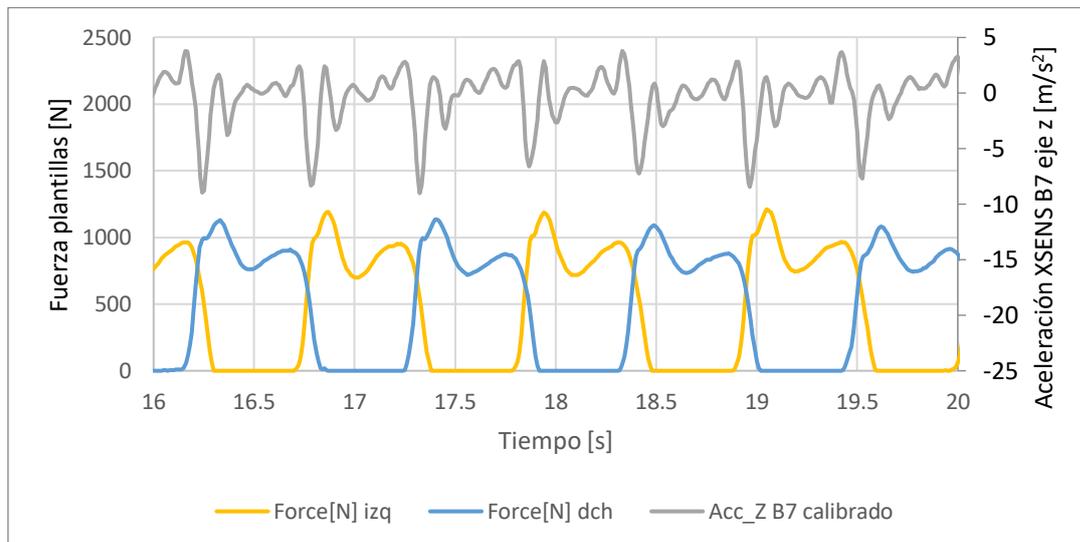


Figura 34. Fuerza de las plantillas y aceleración en z del Xsens B7 frente al tiempo.

La aceleración grabada por el Xsens colocado en la cintura en el eje z frente al tiempo también sigue un patrón muy claro tal y como se observa en la Figura 34.

Entre las aceleraciones de los tres ejes vistos, en la que más claramente se ve que el Xsens está en un punto simétrico es en el eje y ya que con un periodo de observación es suficiente para definir el patrón al no destacar a simple vista diferencias en la forma adoptada por la curva entre dos periodos.

En la Figura 35 se representan dos periodos de observación consecutivos, pero, analizando un único periodo como el recuadrado en color rojo podemos sacar toda la información necesaria. En este caso, se va a utilizar como patrón dos periodos de observación consecutivos para unificar el análisis de todas las magnitudes a pesar de que, como se ha comentado anteriormente con un periodo como patrón sería suficiente. Esto se puede ver en la Figura 36 y en la Figura 37 en las que se ve la repetición de los patrones compuestos tanto de un periodo de observación como de dos.

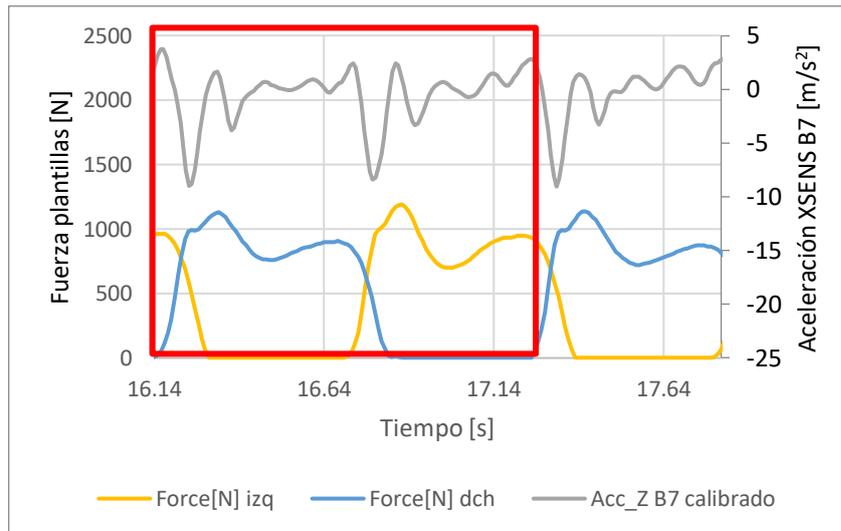


Figura 35. Aceleración en el eje z del Xsens B7 (simétrico) en dos periodos de observación consecutivos.

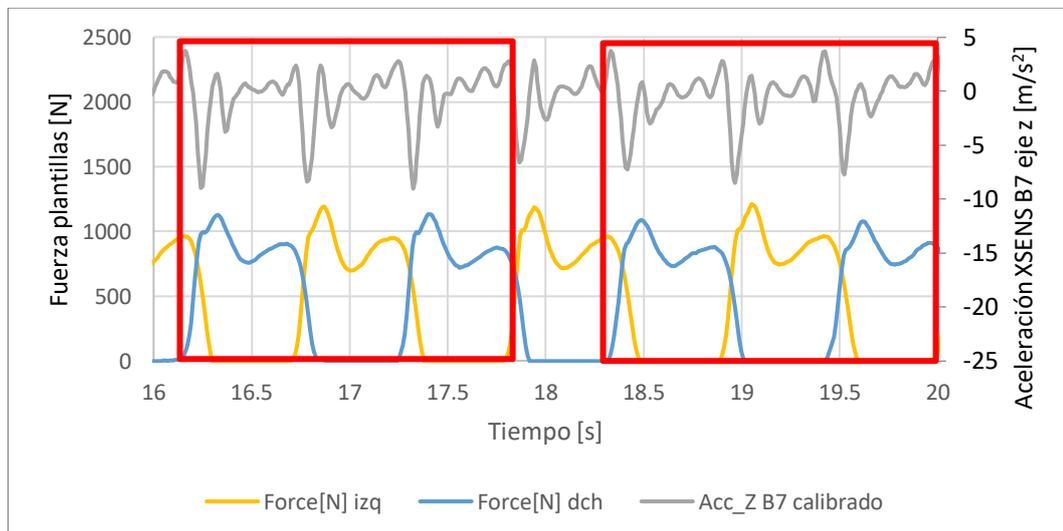


Figura 36. Patrón compuesto por dos periodos de observación de la aceleración en el eje y Xsens B7.

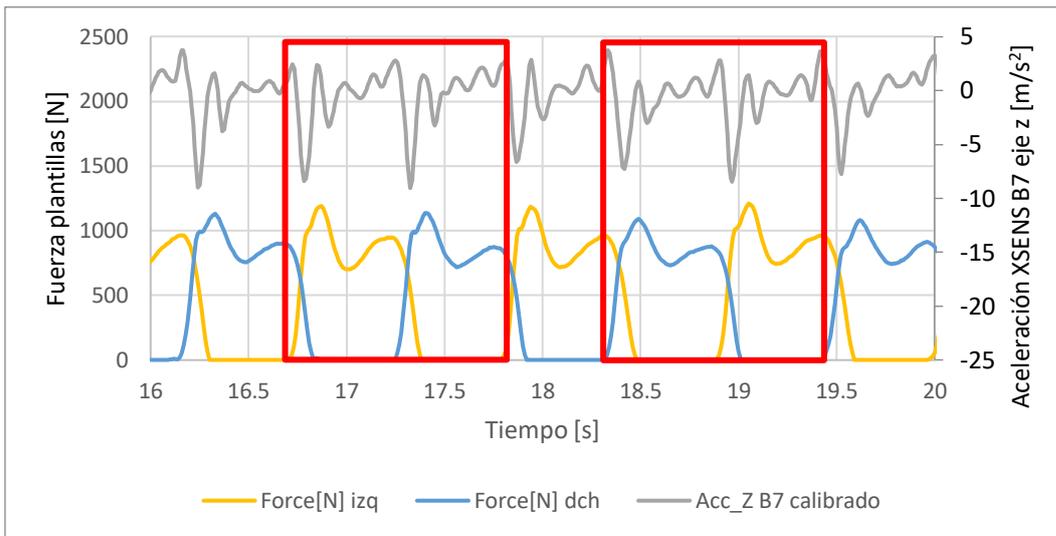


Figura 37. Patrón compuesto por un periodo de observación de la aceleración en el eje y Xsens B7.

Para analizar e intentar conseguir la máxima información que nos aporta esta curva, será de ayuda la Figura 38, representación gráfica realizada con Excel de las fuerzas de cada pie y la suma de ambas junto a la aceleración del Xsens B7 en el eje y.

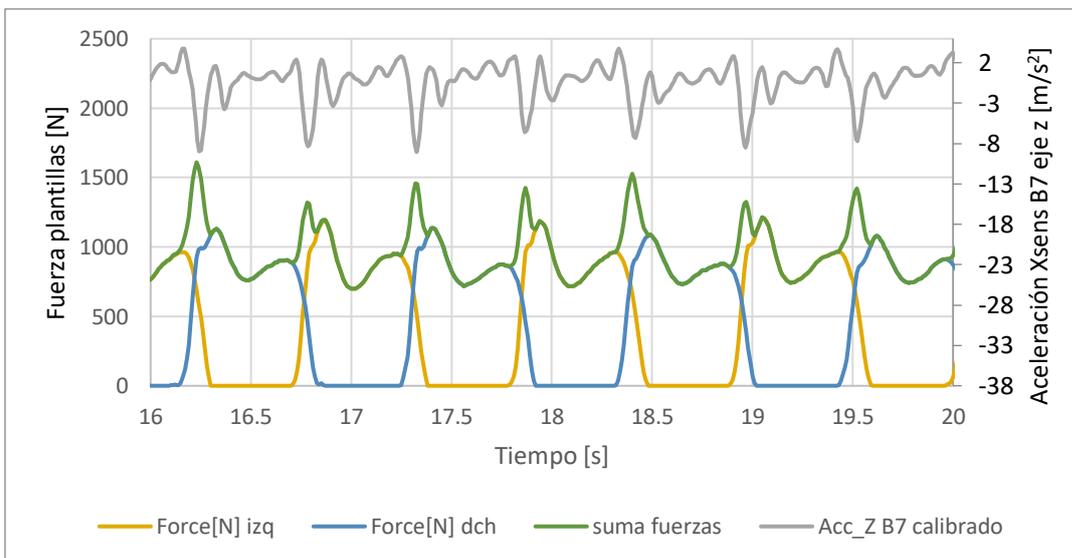


Figura 38. Fuerza de cada plantilla, la suma de ambas y aceleración en el eje z del Xsens B7 frente al tiempo

Lo más destacable a simple vista es el mínimo absoluto que se alcanza en el mismo instante de tiempo en el que se alcanza el máximo de la suma de las fuerzas. Además, justo antes de este mínimo, se alcanza el máximo de la aceleración absoluta.

Teniendo en cuenta que el eje z sobre el que está grabada esta aceleración es perpendicular al Xsens, siendo el sentido positivo el del avance con el paso,



damos sentido al momento en el que encontramos este máximo y mínimo.

Durante la oscilación inicial o fase de aceleración, como su propio nombre indica, el cuerpo del sujeto se acelera en dirección positiva del eje z así impulsándose para mover el pie que se queda detrás hacia delante y seguir las fases del paseo. En esta fase se alcanza el máximo. Justo en el siguiente instante en el que ambos pies están apoyados ejerciendo la fuerza máxima sobre el suelo, se alcanza el mínimo absoluto adquiriendo un valor de entre -7.5 y -8 m/s².

Los valores de la aceleración que comprende la curva en la parte del periodo de observación no estudiada hasta ahora oscilan en pequeña magnitud en torno a 0 m/s². Estas pequeñas variaciones se asocian a pequeños movimientos del Xsens que a simple vista no son muy visibles, pero en la gráfica si, debido a la precisión del dispositivo utilizado.

4.6 Fuerzas vs GYr

Nuestros dispositivos Movella llevan integrados unos giroscopios. Un giroscopio o giróscopo es un instrumento que nos permite determinar la orientación de un dispositivo. [9] Otra información muy relevante que nos aportan estos dispositivos son los giros respecto a cada uno de los ejes. La velocidad angular medida en grados por segundo.

Por lo tanto, la diferencia entre un giroscopio y un acelerómetro es que el giroscopio mide la orientación y la rotación del cuerpo, en cambio, el acelerómetro mide la aceleración lineal de un cuerpo.

Para analizar la información que nos proporcionan los giroscopios durante la grabación se procede de la misma forma que con las aceleraciones (ver 3.5.1). En este caso, al estudiar el B7, se puede sacar esta información del archivo Excel descargado con todos los datos.

Al utilizar la misma grabación, mismo paseo, no hace falta calibrar de nuevo los datos de las plantillas si no que se usarán los ya trabajados anteriormente. La Figura 39 corresponde a la gráfica de la fuerza de las plantillas una vez los datos están calibrados respecto al tiempo.

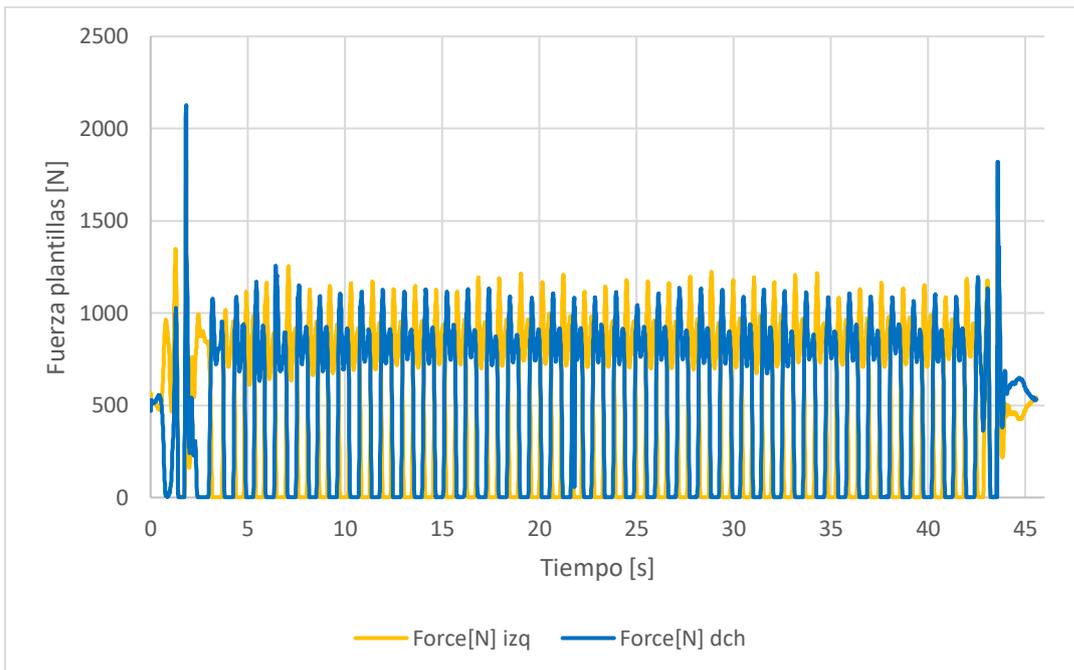


Figura 39. Fuerza de las plantillas respecto al tiempo con los valores calibrados.

Si a esta gráfica se le añaden los giros obtenidos directamente de los dispositivos Xsens el resultado es el de la Figura 40.

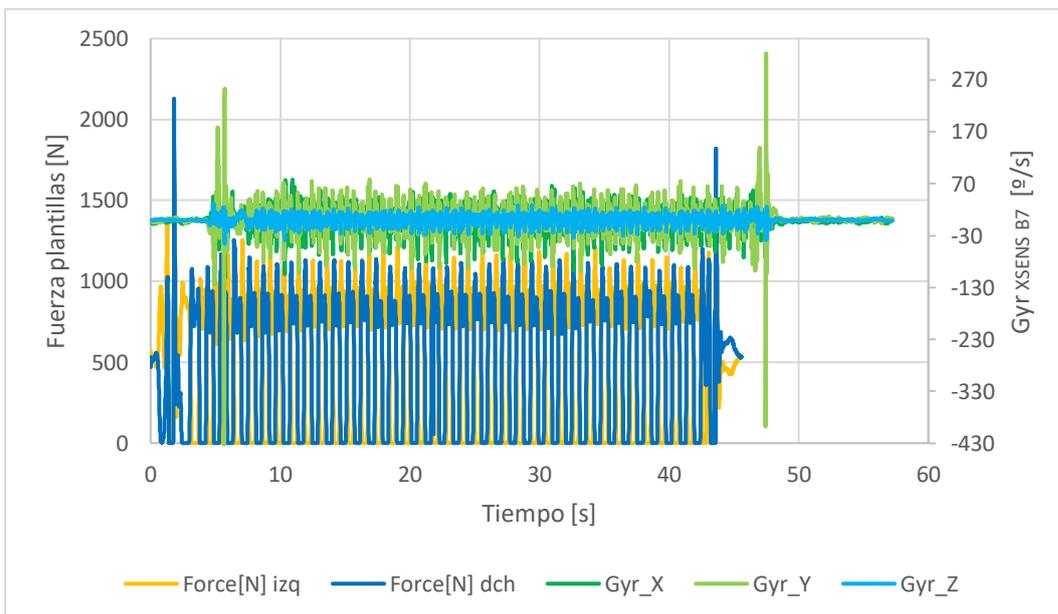


Figura 40. Fuerza de las plantillas y velocidad angular respecto al tiempo sin sincronizar.

Se observa con claridad, al igual que en el caso de las aceleraciones que, sabiendo que el salto se ha dado en el mismo instante de tiempo, los dispositivos han comenzado a grabar en momentos diferentes. Para ello se procede como antes restando a la grabación que comienza antes y, por tanto, tiene un período mayor de tiempo sin variaciones mayor, el tiempo necesario

para que se sincronicen las líneas de las fuerzas y las de las velocidades angulares. Este tiempo corresponde al que se tarda durante el procedimiento seguido en cerrar la aplicación del dispositivo con el que se ha comenzado a grabar, cambiar de aplicación y dar al botón de iniciar grabación para el segundo instrumento. Este periodo no excede los 5 segundos.

La gráfica resultante una vez sincronizadas las grabaciones es la de la Figura 41 dónde claramente se puede ver que los saltos coinciden en el tiempo así pudiendo analizar las gráficas y relacionarlas entre ellas correctamente.



Figura 41. Fuerza de las plantillas y velocidad angular respecto al tiempo sin sincronizar.

Antes de analizar con detalle las velocidades angulares con la ayuda de esta gráfica, se puede deducir que está compuesta por unas oscilaciones entorno a la velocidad nula siguiendo un patrón relacionado con el paso. Cuando el Gyr es positivo, es decir, mayor que 0, es que el sensor gira en torno al eje estudiado en sentido positivo, y si es negativo, al revés. En los puntos en los que la curva es creciente la velocidad aumenta y en los que decrece la velocidad disminuye mientras que en los máximos y mínimos la velocidad pasa de aumentar a disminuir o viceversa.

Gyr en el eje x.

La dirección y el sentido del eje x es el señalado en la Figura 22. Debería ser el giro más representativo ya que respecto a este eje se hace un movimiento muy descriptivo del tronco debido al balanceo de los brazos para lograr el equilibrio durante el paseo. La velocidad angular sobre el eje x es la velocidad del giro representado en la Figura 42 con las curvas de color negro. En esta figura está representado con un punto de color rojo el sentido positivo del eje x (perpendicular al suelo hacia arriba).

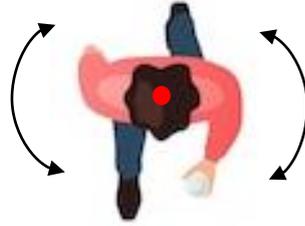


Figura 42. Persona andando vista desde arriba [8] y representación de los sentidos de giro respecto al eje x.

Para analizar la velocidad angular en el eje x, ocultando de la gráfica anterior las curvas de la velocidad angular de los otros dos ejes, se consigue una mayor claridad. Además, acotando el intervalo de tiempo, escogiendo uno más pequeño, servirá de ayuda para observar mejor el comportamiento de la línea.

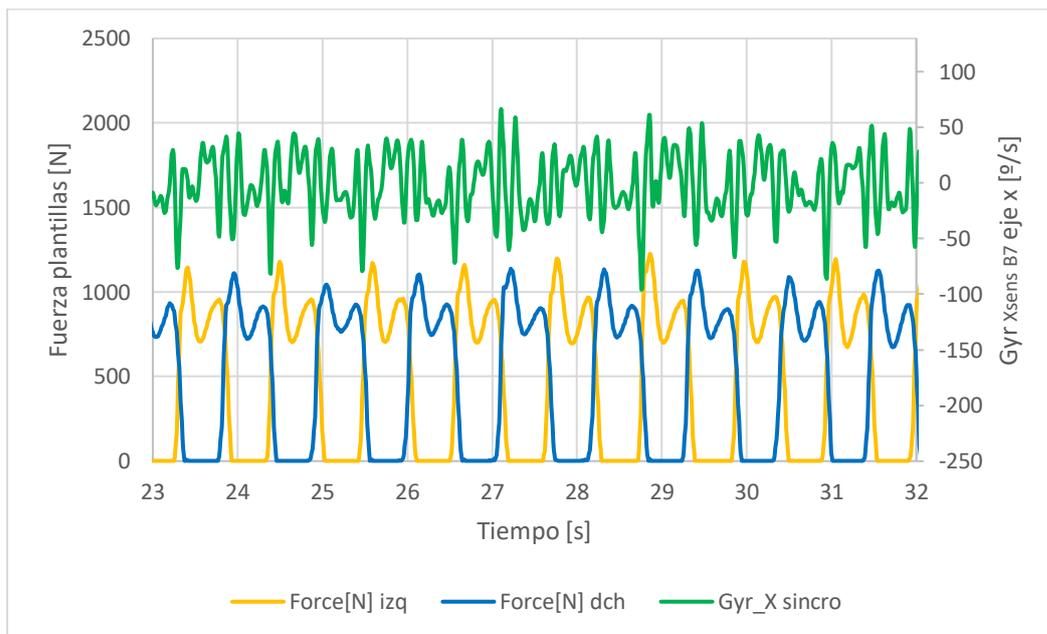


Figura 43. Fuerza de las plantillas y velocidad angular del eje x frente al tiempo.

En la Figura 43, resultado de las modificaciones detalladas hechas sobre la Figura 41, la curva verde a analizar oscila alrededor de 0 °/s tomando valores entre -50 y 50 °/s, a excepción de los mínimos que alcanzan valores menores a -50 °/s.

Tomando como referencia varios pasos completos, varios ciclos, se puede deducir el patrón. Con la velocidad angular en el eje x ocurre lo mismo que en los casos anteriores, el sensor que se está estudiando está colocado en un punto simétrico del cuerpo y, por ello, con un periodo de observación debería de ser suficiente para describir el comportamiento de la curva al repetirse

constantemente. Aun así, se ha decidido hacer todo el estudio del proyecto utilizando como patrón dos periodos de observación así analizando las diferencias mínimas entre ambos periodos, a pesar de ser mínimas, y unificando tanto para aquellos casos con grabaciones correctas de un sensor ubicado en el plano de simetría del cuerpo como para un Xsens ubicado fuera del mismo. En la Figura 44, están representados dos periodos de observación consecutivos los cuales componen el patrón mientras que en la Figura 45 se puede observar la repetición de este.

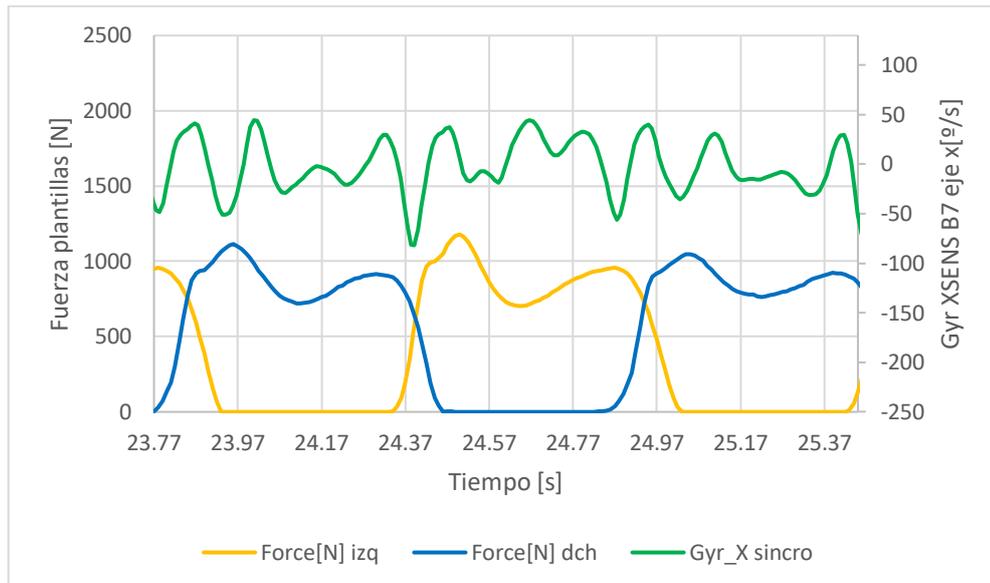


Figura 44. Velocidad angular en el eje x del Xsens B7 (simétrico) en dos periodos de observación consecutivos.

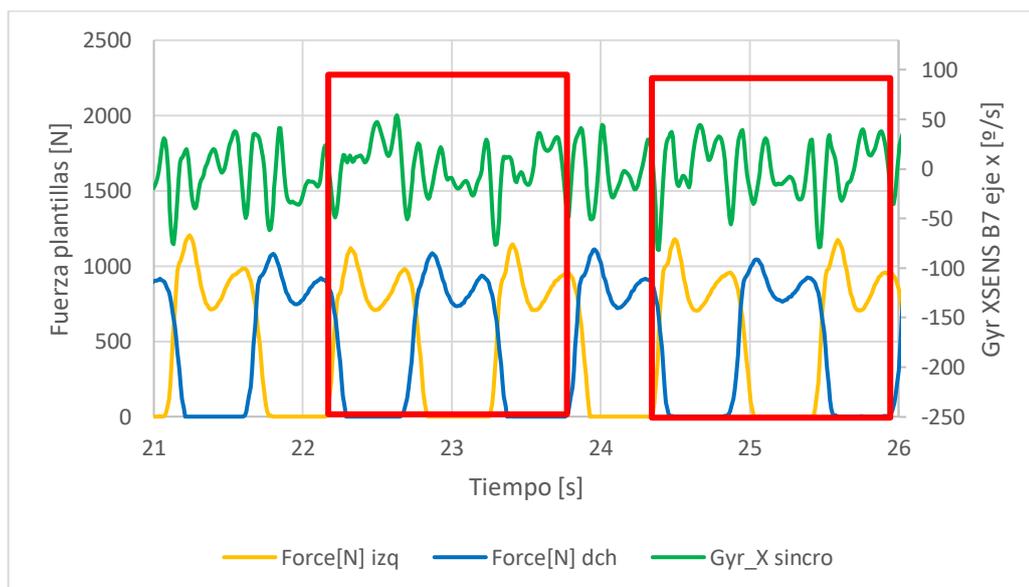


Figura 45. Patrón compuesto por dos periodos de observación de la velocidad angular en el eje x Xsens B7.

Los mínimos absolutos se alcanzan durante el cambio de apoyo de la pierna derecha a la izquierda mientras que en el cambio de apoyo contrario se alcanzan mínimos relativos.

Para analizar el comportamiento de la curva de la velocidad angular del eje x, se va a dividir el patrón en dos partes.

En primer lugar, se analizará la velocidad angular en el eje x durante el apoyo únicamente del pie izquierdo. Para ello se acotará más el intervalo de tiempo obteniendo la gráfica de la Figura 46.

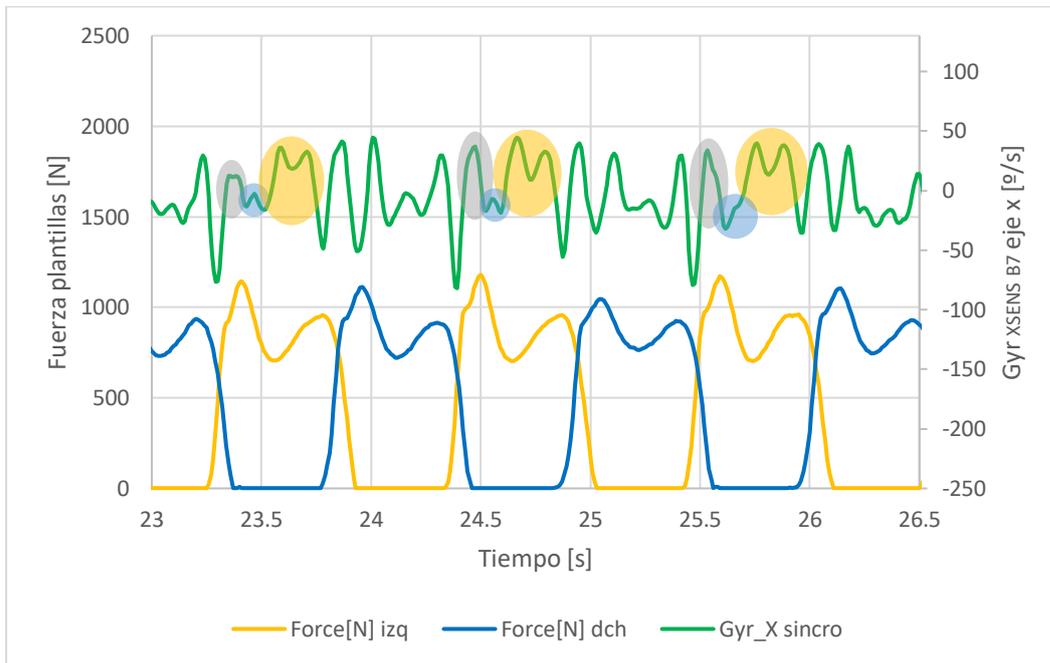


Figura 46. Análisis de la curva de la velocidad angular respecto al eje x durante el apoyo único del pie izquierdo.

Durante la primera parte de la curva se alcanza un máximo (ver círculos de color gris), justo después del mínimo absoluto comentado anteriormente y, a continuación, hay una oscilación (ver círculos de color azul) con una amplitud de aproximadamente 5 veces menor que las demás.

En la fase de apoyo medio la curva del giro empieza a aumentar y continúa oscilando entre -40 y 40 °/s aproximadamente, dibujando una especie de “M” como las rodeadas de amarillo.

En segundo lugar, para finalizar el estudio del patrón de la velocidad angular en el eje x, bastará con analizar la curva en aquellos instantes de tiempo en los que el pie derecho está apoyado (Figura 47). A diferencia de la primera parte en la que se estudiaba la curva cuando el peso recaía únicamente sobre el pie izquierdo, el periodo de tiempo analizado ahora comprende tanto cuando todo el peso recae sobre la plantilla derecha como cuando ambos pies están apoyados sobre el suelo, independientemente de la fuerza ejercida sobre cada

una de las plantillas.

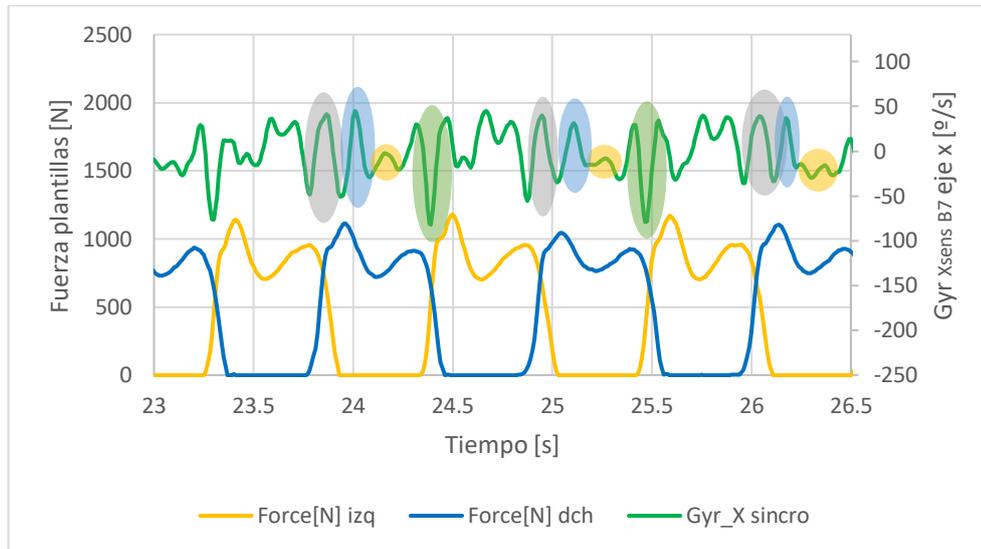


Figura 47. Análisis de la curva de la velocidad angular respecto al eje x durante el apoyo del pie derecho.

Durante los primeros instantes de tiempo en los que empieza a recaer todo el peso sobre la pierna derecha, aumenta notablemente alcanzando un máximo de 40 °/s aproximadamente (pico gris). Cuando la fuerza alcanza su máximo absoluto, la curva de la velocidad angular alcanza un mínimo relativo, el cuál es absoluto si se estudia únicamente la parte de la curva correspondiente al apoyo del pie derecho. A continuación, (ver color azul) se alcanza un nuevo máximo que toma un valor muy parecido al anterior máximo.

Durante la segunda parte de este patrón repetido, se alcanza un pequeño máximo coincidiendo el punto más bajo antes de la subida de la curva con el mínimo relativo de la “M” de la fuerza de la plantilla derecha. Después de este pico señalado en la Figura 47 de color amarillo, hay una última subida y bajada señaladas de color verde con su máximo relativo dentro del patrón estudiado. El punto que alcanza el mayor valor de esta última parte de la curva correspondiente al apoyo del pie derecho coincide con el máximo relativo de la curva de la fuerza de la plantilla derecha (segundo máximo de la “M”) y, tras disminuir por última vez, el valor mínimo coincide con el despegue del pie del suelo.

GYr en el eje y.

La dirección del eje y del Xsens es perpendicular al eje x cuyo giro acabamos de analizar tal y como se puede observar en la Figura 22. En la Figura 48 se representa los sentidos de la velocidad angular y con el punto rojo el sentido positivo del eje y del Xsens B7 (hacia la derecha del cuerpo del sujeto).

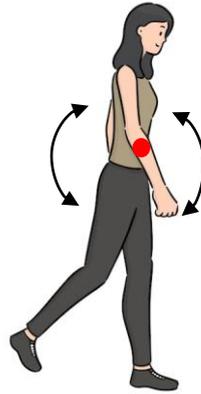


Figura 48. Persona vista de perfil [8] y representación de los sentidos de giro respecto al eje y.

Lo que representa esta magnitud que se va a estudiar es la velocidad angular del sensor respecto al eje y. En este caso, al estar todos los sensores colocados en la parte anterior del cuerpo, cara delantera, indicará la velocidad y balanceo hacia delante y hacia atrás de las diferentes partes del cuerpo en las que estos dispositivos están colocados.

Para obtener una gráfica con mayor claridad, se procede de la misma manera que anteriormente, simplificando al representar únicamente la velocidad angular que se busca analizar y acotando el intervalo.



Figura 49. Fuerza de las plantillas y velocidad angular del eje y frente al tiempo.

En la Figura 49, se puede observar a simple vista que la mayor parte de los datos se encuentran en un intervalo entre -60 y 60 $^{\circ}/s$ oscilando en torno a 0 $^{\circ}/s$. Además, sigue un patrón, que se analizará a continuación, en el que las mayores oscilaciones coinciden con el cambio de apoyo aumentando o

disminuyendo hasta 130 °/s en centésimas de segundos. En cambio, en los instantes en los que ocurre la fase de apoyo medio, las oscilaciones de la velocidad angular son mínimas.

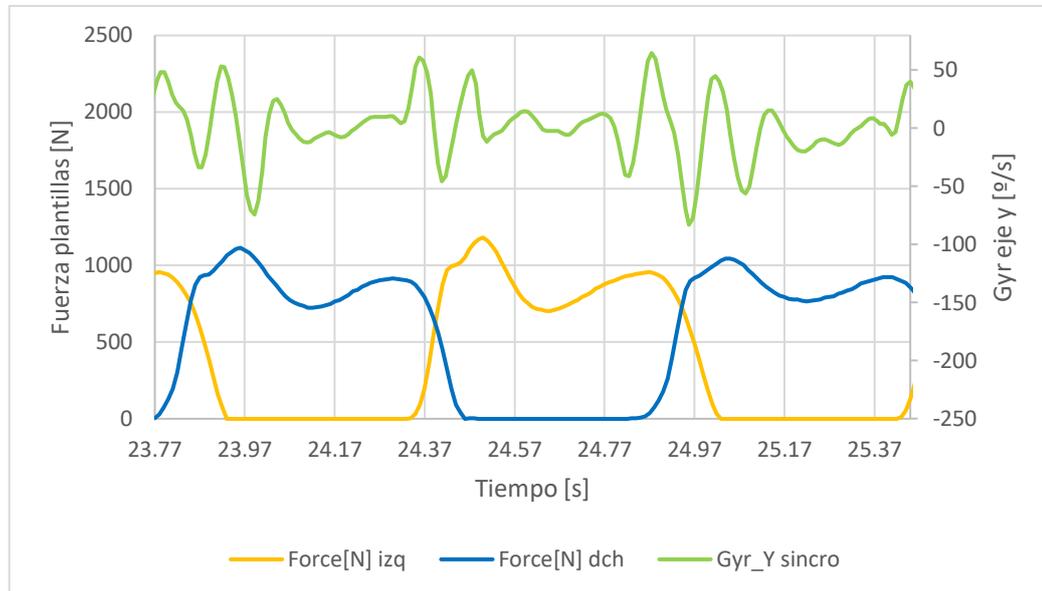


Figura 50. Velocidad angular en el eje y del Xsens B7 (simétrico) en un periodo de observación.

El patrón, representado en la Figura 50, está compuesto por dos periodos de observación como en los casos anteriores y, en la Figura 51 se puede apreciar su continua repetición.

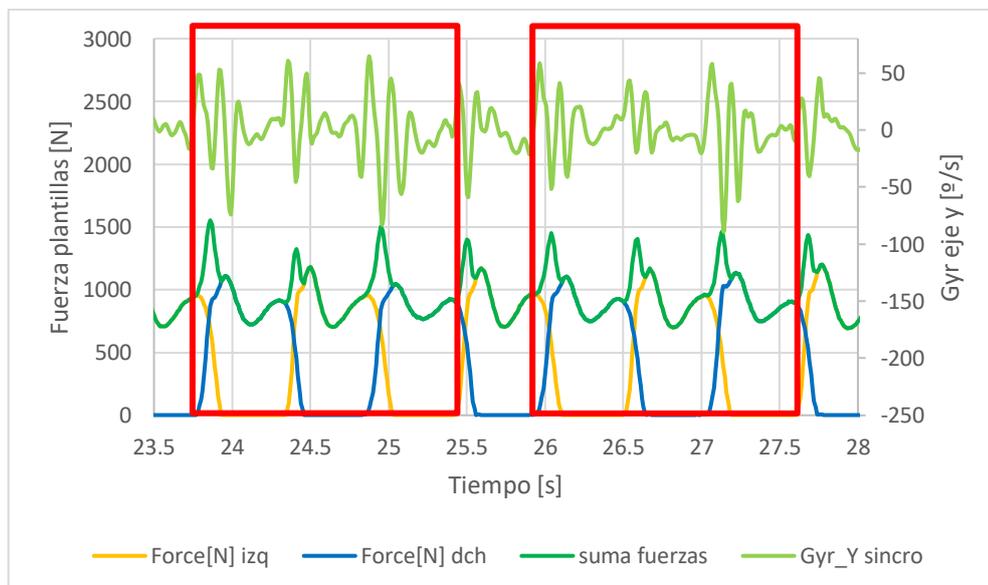


Figura 51. Repetición del patrón compuesto por dos periodos de observación de la velocidad angular en el eje y del Xsens B7

Al igual que para analizar la velocidad angular en el eje x, para estudiar la del

eje y, se opta por utilizar de ayuda dos gráficas (la Figura 52 y la Figura 53) dividiendo en dos partes el patrón para simplificar y clarificar.

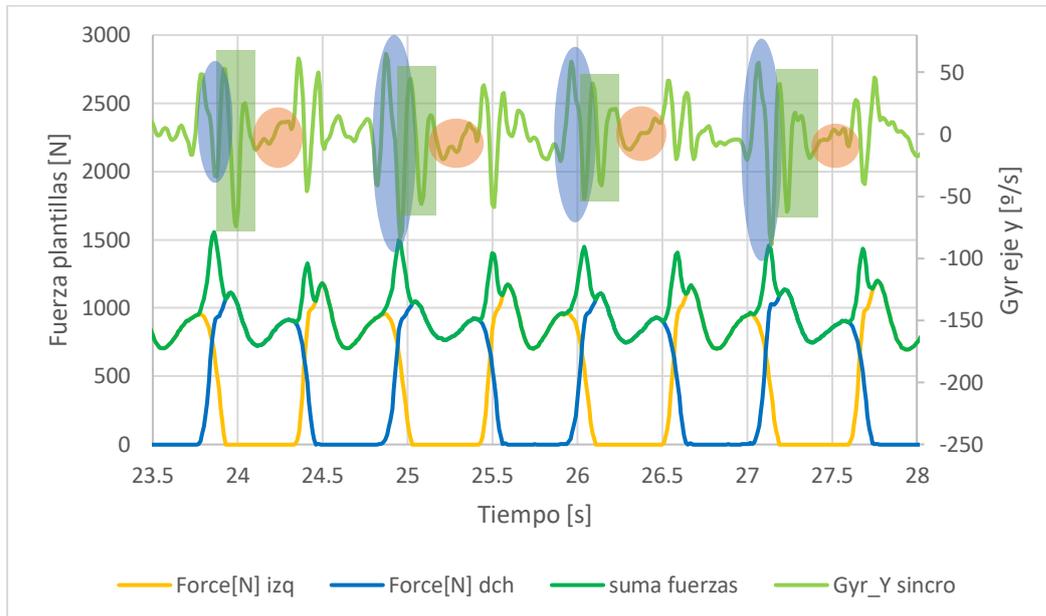


Figura 52. Análisis de la curva de la velocidad angular respecto al eje y durante el cambio de apoyo del pie izquierdo al derecho y el apoyo único del pie derecho.

En primer lugar, con la ayuda de la Figura 52, se analizará el comportamiento de la curva de la velocidad angular del eje y en aquellos instantes de tiempo comprendidos entre el primer apoyo del pie derecho sobre el suelo e inicio del apoyo del pie izquierdo. Esta primera parte se va a dividir en 3 zonas tal y como señalan los círculos de colores de la figura para un análisis más sencillo.

Según el peso empieza a recaer sobre el pie derecho, así aumentando la fuerza sobre la plantilla derecha, la aceleración aumenta exponencialmente hasta alcanzar aproximadamente un valor de 50 °/s y seguidamente vuelve a disminuir haciendo un punto de inflexión a la altura aproximada de los 25 °/s. Esta bajada de la curva incluida en el primer tercio de esta gráfica no alcanza siempre el mismo valor al igual que el máximo que se acaba de comentar, pero se puede observar que el momento en el que se alcanza este mínimo corresponde al instante en el que la suma de las fuerzas es máxima.

Después de esta bajada, el patrón está compuesto por unas oscilaciones (rodeadas en la figura 40 de color verde) con forma de “M” en la que el segundo máximo alcanza un valor menor que el primero ya que el primer pico alcanza aproximadamente los 50 °/s siendo el máximo absoluto del patrón mientras que el segundo alcanza la mitad de velocidad, 25 °/s. El mínimo de este segundo periodo de tiempo del patrón que se está analizando alcanza valores entre -40 y -80 °/s, variando en el paso a analizar, pero siempre coincidiendo con el máximo absoluto de la fuerza grabada por la plantilla derecha.

Por último, faltaría por analizar la parte rodeada de naranja de la Figura 52 la

cual está compuesta por una subida con un máximo y mínimo intermedio. Comienza con un valor de la velocidad de $-20^{\circ}/s$ aumentando hasta los $-5^{\circ}/s$ dónde por unos instantes se mantiene la velocidad o disminuye mínimamente y a continuación vuelve a subir hasta alcanzar los $10^{\circ}/s$ aproximadamente. Para acabar este tramo, vuelve a disminuir creando otro mínimo relativo el cual coincide en el tiempo con el máximo relativo de la fuerza de la plantilla derecha y el comienzo del apoyo del pie izquierdo.

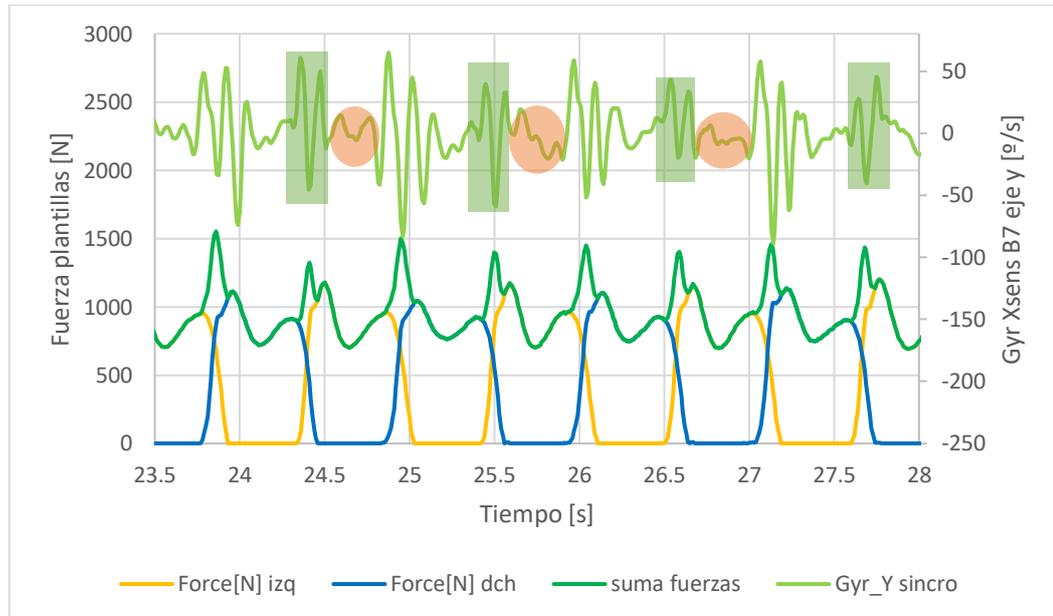


Figura 53. Análisis de la curva de la velocidad angular respecto al eje y durante el cambio de apoyo del pie derecho al izquierdo y el apoyo único del pie izquierdo.

Con la ayuda de la Figura 53, se analiza la segunda parte del patrón seguido por la curva de la velocidad angular del eje y. Este periodo de tiempo a estudiar coincide con el cambio de apoyo del pie derecho al pie izquierdo y de los instantes de tiempo en el que todo el peso del sujeto recae sobre el pie izquierdo ya que el otro está en el aire en la fase de oscilación.

Al igual que en la primera parte del patrón, hay una parte de esta segunda en la que la curva adquiere la misma forma de “M” en la que el mínimo absoluto de ella se alcanza en el centro de esta mientras que los mínimos de los extremos de la “M” son relativos. Como en el anterior caso, este mínimo absoluto se alcanza en el instante de tiempo en el que la suma de las fuerzas de las plantillas es máxima. El primer mínimo relativo al final de la “M” coincide en el tiempo con el máximo relativo de la curva de la fuerza de la plantilla derecha mientras que el segundo mínimo relativo, corresponde con el máximo absoluto de la fuerza sobre la plantilla izquierda.

A continuación, la curva oscila en torno a $0^{\circ}/s$ a la vez que decrece empezando en un valor aproximado de $10^{\circ}/s$ y acabando con un valor negativo de entre -40 y $-20^{\circ}/s$ cuando la curva de la plantilla izquierda alcanza el máximo relativo correspondiente con el apoyo terminal y la preoscilación.

Gyr en el eje z.

La última velocidad angular por estudiar del sensor B7 es la del eje z. Este eje es perpendicular a la cara anterior del Xsens señalando el sentido positivo hacia el exterior del cuerpo del sujeto. A diferencia de la velocidad angular sobre el eje y, que indica la velocidad del balanceo hacia delante y hacia atrás de nuestro cuerpo, esta indica la del balanceo lateral indicado con las líneas curvas negras en la Figura 54.

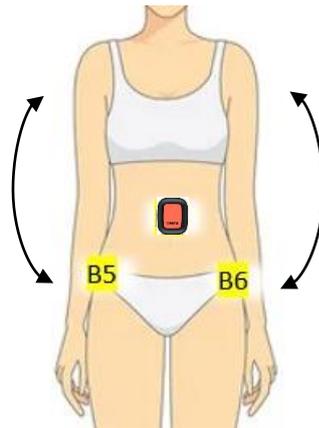


Figura 54. Persona vista de frente [3] y representación de los sentidos de giro respecto al eje y.

La gráfica de la Figura 55 es la resultante de la velocidad angular en el eje z del sensor B7 tras haber sincronizado los Xsens y las plantillas y acotado un periodo de estudio que sea representativo.

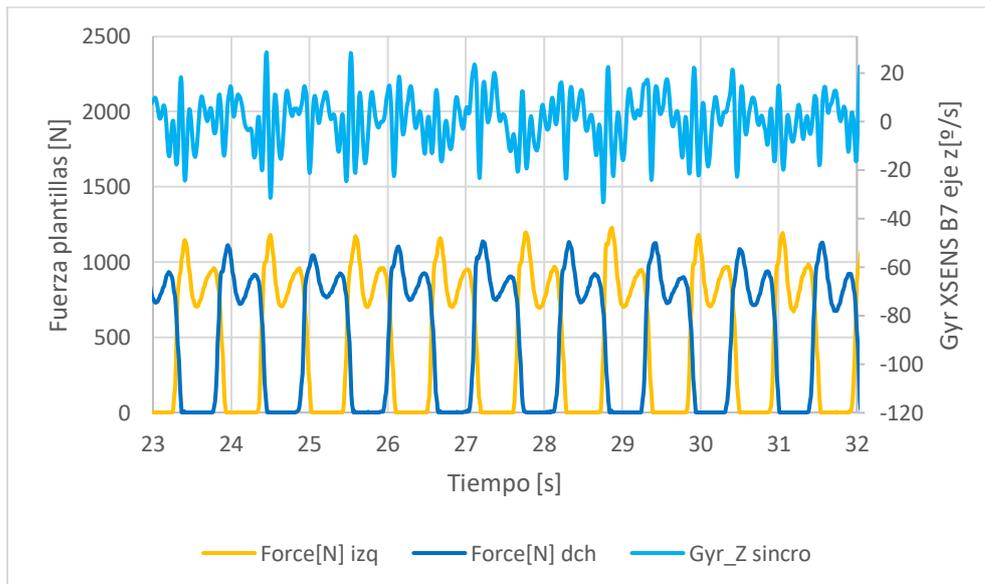


Figura 55. Fuerza de las plantillas y velocidad angular del eje z frente al tiempo.

A pesar de haberse escogido un periodo de tiempo más acotado para la

representación de la gráfica anterior, no es lo suficientemente pequeño como para poder ver detalladamente el patrón que sigue la curva, pero se puede sacar cierta información general. La velocidad angular sobre el eje z del Xsens que está siendo estudiado, oscila en torno a 0 °/s estando la mayoría de los valores entre -15 y 15°/s, pero llegando a alcanzar los máximos y mínimos valores de hasta -30 y 30 °/s.

Para un estudio más profundo del comportamiento del Gyr es preferible encontrar el patrón que sigue y entenderlo junto a las curvas de las fuerzas de las plantillas y la curva de la suma de ambas.

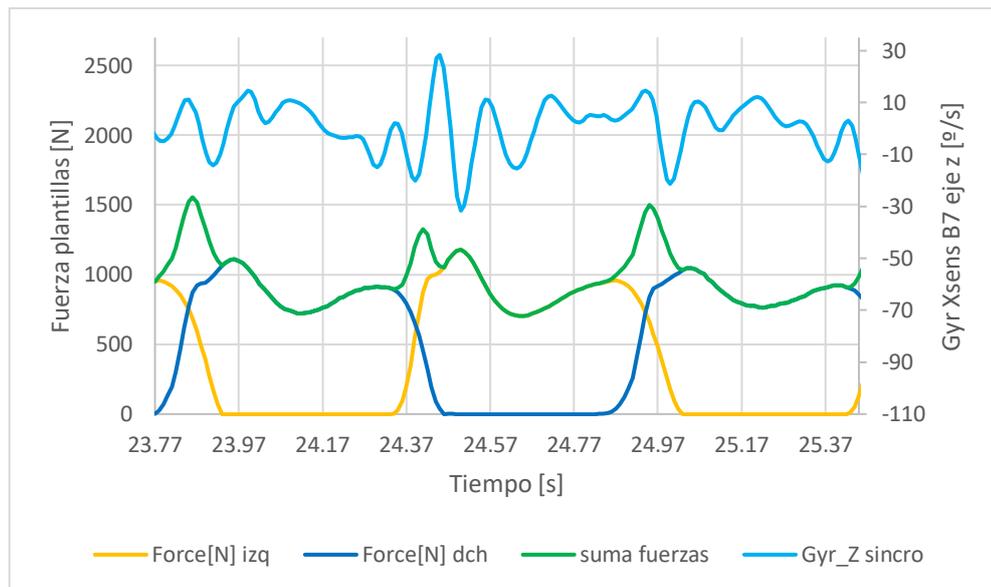


Figura 56. Velocidad angular en el eje z del Xsens B7 (simétrico) en dos periodos de observación.

El patrón, representado en la Figura 56, está compuesto por dos periodos de observación y en la gráfica de la Figura 57, se observa la repetición de este patrón.

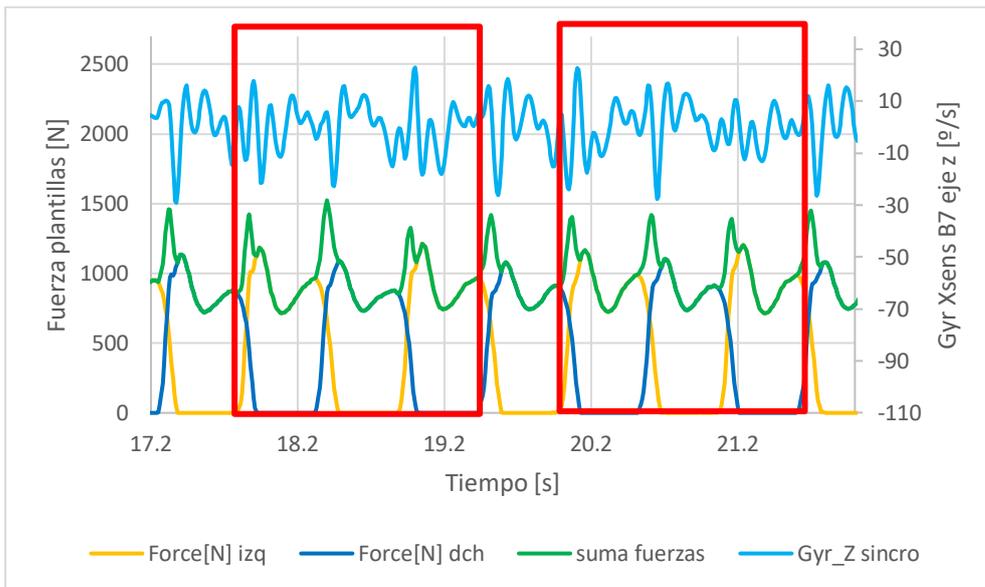


Figura 57. Repetición del patrón compuesto por dos periodos de observación de la velocidad angular en el eje z del Xsens B7

Como en los casos anteriores, el patrón se va a estudiar en dos partes. En este caso, la división va a ser la siguiente: la primera parte consiste en el periodo de tiempo entre el aplanamiento completo del pie derecho (mínimo relativo de la curva de la fuerza sobre la plantilla derecha) hasta el aplanamiento del pie izquierdo (mínimo relativo de la curva de la fuerza sobre la plantilla izquierda) y, la segunda parte abarcará el periodo restante del patrón.

En la Figura 58 y en la Figura 59 está representada la repetición de varios patrones consecutivos junto a la primera y segunda parte del patrón comentadas anteriormente.

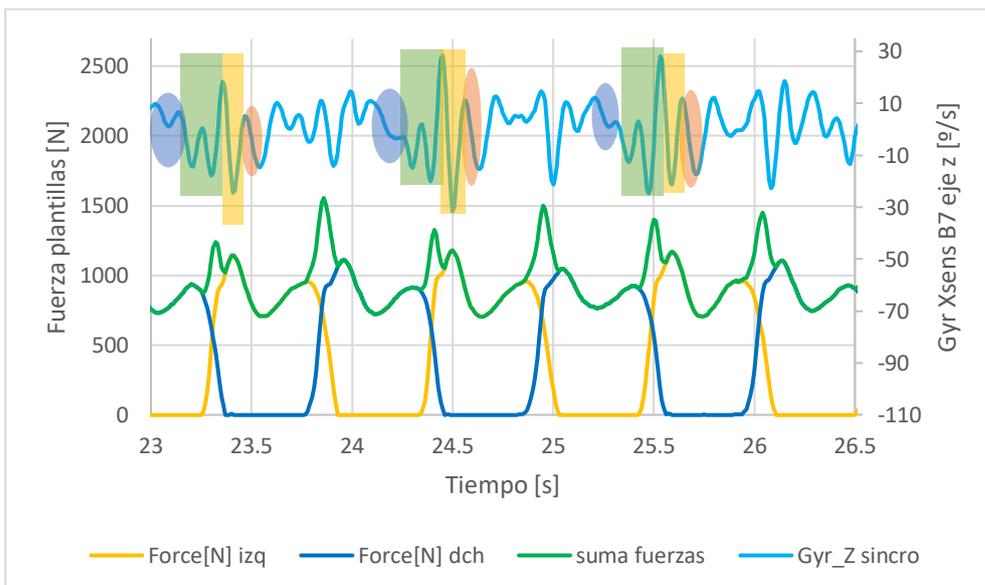


Figura 58. Análisis de la curva de la velocidad angular respecto al eje z entre el aplanamiento del pie derecho y el pie izquierdo (primera parte).

La primera parte (entre el aplanamiento completo del pie derecho y del pie izquierdo), cuyo análisis corresponde con la Figura 58, comienza con una disminución de la velocidad angular con alguna oscilación intermedia hasta llegar a 0 °/s aproximadamente.

A partir de ese punto, la curva toma la forma de una “W” (resaltado en la Figura 58 de color verde) con los máximos y mínimos a diferentes alturas. El primer máximo de la “W” es el que alcanza la menor velocidad angular siendo este el punto en el que acababa la disminución anteriormente comentada (0 °/s). El primer mínimo es el mínimo relativo siendo el segundo el absoluto. El primero coincide con el máximo relativo de la curva de la fuerza sobre la plantilla derecha mientras que el mínimo absoluto de la curva coincide en el tiempo con el valor máximo de la suma de las fuerzas de las plantillas.

Tras adoptar la curva la forma de la “W”, la curva realiza (como se puede ver resaltado de color amarillo) una forma de “V” coincidiendo el final de la “W” con el inicio de la “V” y siendo este punto el máximo absoluto tanto de la “V” como de esta primera parte del patrón. El mínimo de la “V” coincide con el primer pico de la curva de la fuerza de la plantilla izquierda.

Para finalizar esta primera parte, desde el último punto de la “V” a 10-15 °/s aproximadamente, la velocidad angular disminuye alcanzando la misma velocidad, pero con signo negativo, es decir, en sentido contrario.

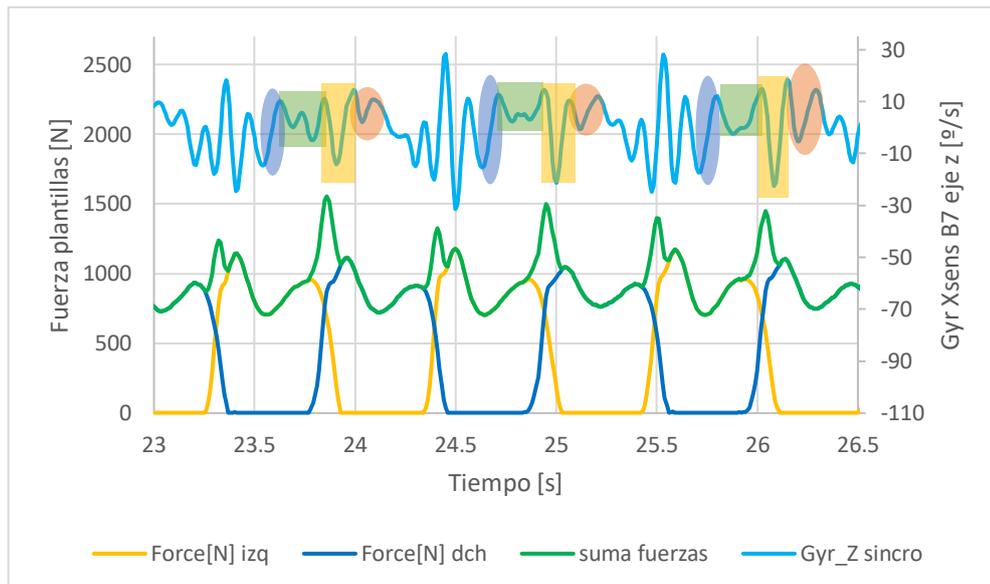


Figura 59. Análisis de la curva de la velocidad angular respecto al eje z entre el aplanamiento del pie izquierdo y el del pie derecho.

Por otro lado, la Figura 59 corresponde al estudio de la segunda parte de la división hecha del patrón. Ambas partes son bastante similares por lo que, en este caso, en vez de estudiar la primera y la segunda parte del patrón por separado, es preferible comparar y analizar las diferencias y, gracias al uso de colores para la explicación en la gráfica, esto es más sencillo.

Mientras que la primera parte comienza con una disminución de la velocidad angular pasando de un valor positivo a 0 °/s, la segunda empieza con un

aumento, pasando de ser una velocidad negativa de unos $-15^\circ/\text{s}$ a una positiva de $15^\circ/\text{s}$ aproximadamente.

En la primera parte, de color verde, al igual que en la segunda parte, la curva tiene forma de “W” pero la diferencia es que en esta segunda parte de la división (ver Figura 59) se puede apreciar que, además de que las oscilaciones son menores, el segundo mínimo de esta “W” se alcanza a la vez que el segundo máximo de la curva de la fuerza sobre la plantilla izquierda mientras que en la primera parte es el primer mínimo de la “W” el que coincide con el segundo máximo de la curva de la fuerza sobre la plantilla derecha.

La diferencia de las zonas amarillas es que en la primera parte el inicio de la “V” y final de la “W” corresponde a un valor bastante más mayor que en la segunda parte mientras que el mínimo y el otro extremo de la “V” en ambas partes toman valores similares.

Por último, la segunda parte de la división finaliza con una disminución seguida de un aumento de la velocidad angular pero siempre tomando valores positivos correspondiendo el último punto del aumento con el aplanamiento de pie derecho. En cambio, la primera parte finaliza con una única disminución con valores tanto negativos como positivos de la velocidad, coincidiendo el último punto con el aplanamiento del pie izquierdo.

4.7 Fuerzas vs ángulos de Euler

Los ángulos de Euler son una herramienta matemática utilizada para describir la orientación de un cuerpo en el espacio tridimensional. Los ángulos de Euler son ampliamente utilizados en campos como la navegación inercial, la robótica y la animación por computadora. Por ejemplo, en la navegación inercial, caso bastante parecido al nuestro, los ángulos de Euler se utilizan para determinar la posición y orientación de un vehículo en movimiento. [10]

En este caso de estudio, los ángulos de Euler obtenidos van a ser utilizados para conocer el giro del Xsens respecto a cada uno de los ejes a analizar (por separado), y por tanto del punto del cuerpo humano del sujeto que ha realizado el paseo y sobre el cual está colocado el sensor, respecto a una posición inicial.

Una vez sincronizados los datos como en el caso de las aceleraciones y de las velocidades angulares, se obtiene la siguiente gráfica en la que los ángulos de Euler están en $^\circ$ lo que facilita su comprensión.

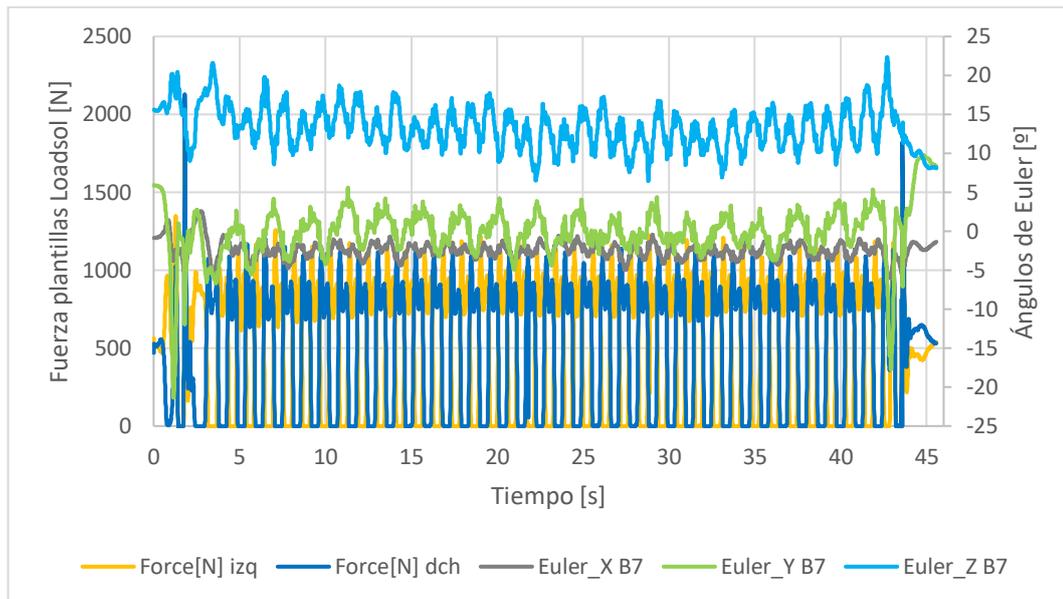


Figura 60. Representación gráfica de la variación de los ángulos de Euler y fuerzas sobre las plantillas respecto al tiempo.

Como se puede observar en la Figura 60, los ángulos respecto a cada eje siguen un patrón con unas oscilaciones más o menos variables que se van a estudiar a continuación.

Ángulos de giro respecto al eje x.

Lo que indica esta magnitud es el giro que realiza el Xsens sobre su eje x. Estos grados se miden sobre el movimiento de giro indicado en la Figura 42, la cual indicaba también las direcciones y sentidos de la velocidad angular sobre el eje x de este mismo sensor.

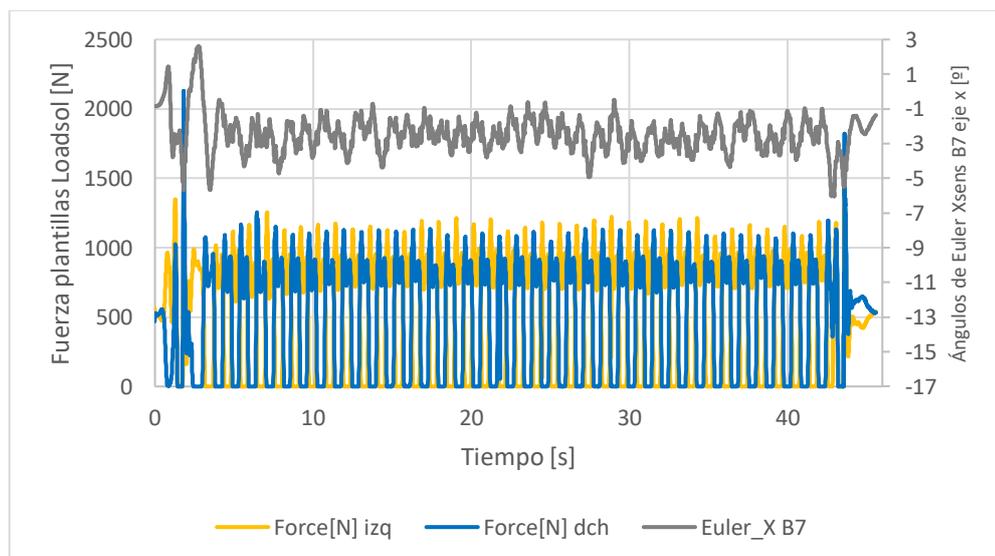


Figura 61. Representación gráfica de los ángulos de giro del Xsens B7 respecto al eje x y fuerza de las plantillas respecto al tiempo.

En la Figura 61 está representada la gráfica con las fuerzas de las plantillas y los ángulos de Euler en los ejes vertical primario y secundario respectivamente representados frente al tiempo en segundos. En los primeros y últimos segundos de la grabación, tanto las fuerzas como los ángulos oscilan de una manera poco coherente y eso se debe a que corresponden al inicio y el final de la grabación, incluyendo el salto que ayuda a sincronizar las grabaciones y aquellos segundos en los que la frecuencia de paso no es constante. En cambio, durante el periodo de tiempo entre los segundos 4,5 y 42,5, las oscilaciones que hacen las tres curvas representadas siguen un patrón.

En esta gráfica se puede observar que los ángulos, en la zona representativa, toman valores entre $-3,8$ y -1 ° a excepción de los valores de los primeros y últimos instantes de tiempo los cuales son valores no representativos. Esto significa que el giro total del Xsens en este eje son $2,8$ ° aproximadamente (resta entre ambos valores, amplitud). Esto supone que el punto neutro del sujeto respecto al que el Xsens gira corresponde a un giro de $-2,4$ ° (valor correspondiente al valor medio de los valores recogidos durante la grabación). El punto neutro es la posición del cuerpo respecto a la cual oscila con el movimiento. Este valor se calcula así ya que, al estar colocado el sensor en el eje de simetría del cuerpo, idealmente al andar el Xsens gira el mismo ángulo en sentido positivo que en sentido negativo.

Para entender mejor el movimiento de giro junto a la relación de este con los valores obtenidos en la Figura 61, es recomendable ver la Figura 62 en la que se representa cómo está girado el sensor respecto al cuerpo y los ángulos anteriormente comentados.

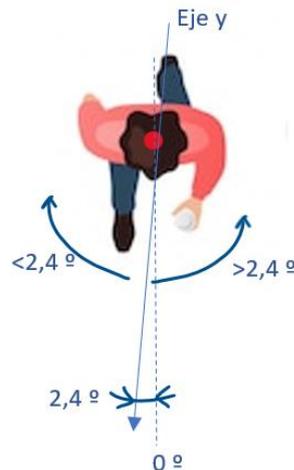


Figura 62. Representación de los ángulos respecto al eje x del XSENS B7 durante el paseo. [8]

Para facilitar la comprensión de estos ángulos, al estar estudiando por separado el ángulo girado en cada eje, se puede modificar la gráfica buscando que en el instante de tiempo en el que el Xsens B7 está girado $-2,4$ ° en esta nueva gráfica equivalga a 0 ° así indicando que el sujeto no está girado en el eje x. La gráfica de la Figura 61, se modifica sumando a todos los valores $2,4$ °

asi equivaliendo a 0° el nuevo valor del ángulo girado cuando el tronco del sujeto (lugar sobre el que está situado el Xsens B7) está en su posición neutral. El resultado es el de la Figura 63.

A nivel práctico, esta modificación de los datos ya grabados podría corresponder o sería equivalente a un cambio en la colocación del Xsens (antes de la grabación) girándolo $2,4^\circ$ en el sentido positivo del eje x, indicado en la Figura 62.

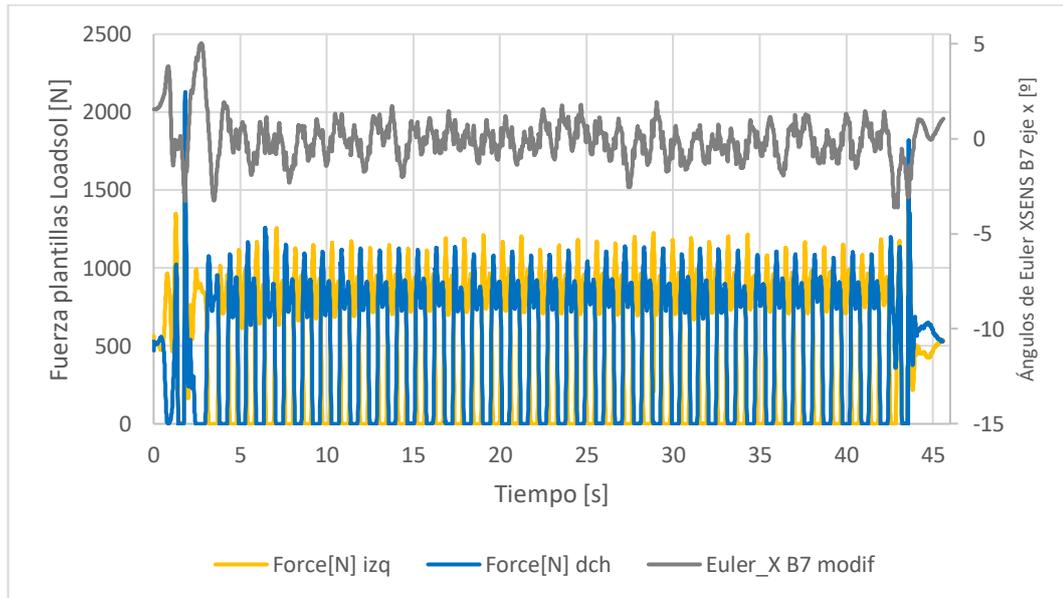


Figura 63. Representación gráfica de los ángulos de giro del Xsens B7 respecto al eje x y fuerza de las plantillas respecto al tiempo modificada siendo el valor medio 0° .

La curva del ángulo girado en el eje x modificada, efectivamente oscila en torno a 0° tomando valores en la zona representativa de entre $-1,2$ y $+1,2^\circ$. Gracias a esta modificación se aprecia que este giro es simétrico con más facilidad, el sensor gira la misma cantidad en cada sentido de giro, pero a diferencia de los datos sin modificar (cuyo punto neutro está ubicado a $-2,4^\circ$) la oscilación es respecto a 0° .

Si el objetivo no fuera este y fuese, por ejemplo, analizar la posición del sensor en el espacio, no se podría modificar este conjunto de datos ya que, para saber la posición, se necesita toda la información obtenida por todos los ángulos de Euler.

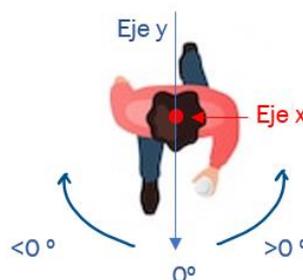


Figura 64. Representación de los ángulos modificados oscilando respecto a 0° respecto al eje x del Xsens B7 durante el paseo. [8]

En la Figura 64 se resume gráficamente el significado de los valores que toman los ángulos. Cuando el ángulo obtenido es de 0° significa que el Xsens B7 está en su posición inicial (refiriéndonos al ángulo de giro respecto al eje x). El signo del ángulo, positivo o negativo, da información sobre el sentido de giro mientras que el valor absoluto indica el giro de en $^\circ$.

Al igual que para las aceleraciones y velocidades angulares, para estudiar en más profundidad el giro que se realiza durante un ciclo de marcha, es preferible acotar un periodo en la gráfica para visualizar con más claridad la dinámica de la curva. Es recomendable coger un periodo lo más intermedio posible para evitar analizar una parte del paseo en la que la frecuencia de paso no sea constante o haya alteraciones en los movimientos realizados y así hacer un estudio lo más realista y representativo posible. Por ello, el periodo a analizar es el abarcado entre los 15 y 20,8 s de la grabación, representado en la Figura 65.

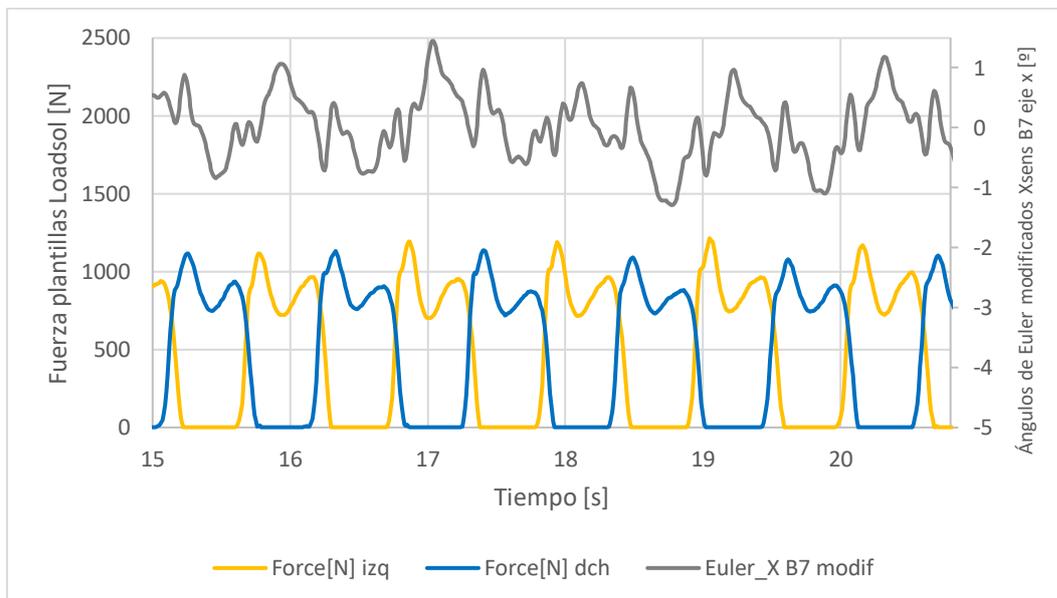


Figura 65. Ángulos de giro respecto al eje x del Xsens B7 y las fuerzas de las plantillas respecto al tiempo en un periodo representativo.

Como durante todo el estudio de este Xsens ubicado en una zona simétrica del cuerpo del sujeto, con un periodo de observación debería de ser suficiente para definir el patrón de la curva, pero se observa claramente que debido a alguna perturbación en el paseo se pierde esta simetría entre los pasos realizados con el pie izquierdo y los realizados con el derecho. Por ello y al igual que en los casos anteriormente analizados, el patrón está compuesto por dos periodos de observación, es decir, por dos ciclos de marcha completos y consecutivos, uno realizado con cada pie.

En la Figura 66 está representado el patrón mientras que en la Figura 67 se representa la continua repetición de este.

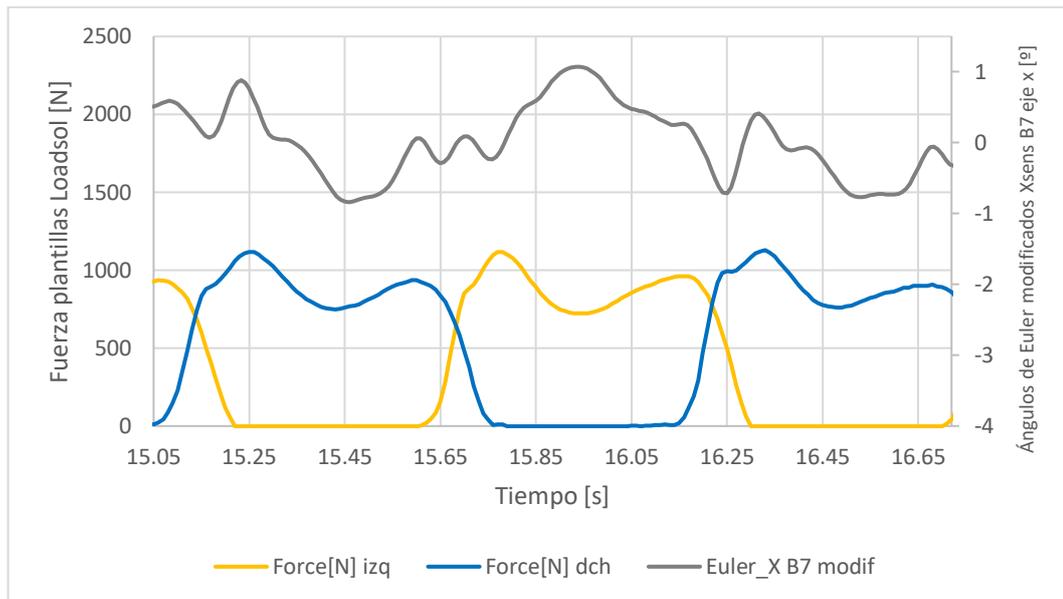


Figura 66. Patrón de los ángulos de giro respecto al eje x del Xsens B7 junto a la fuerza de las plantillas respecto al tiempo.

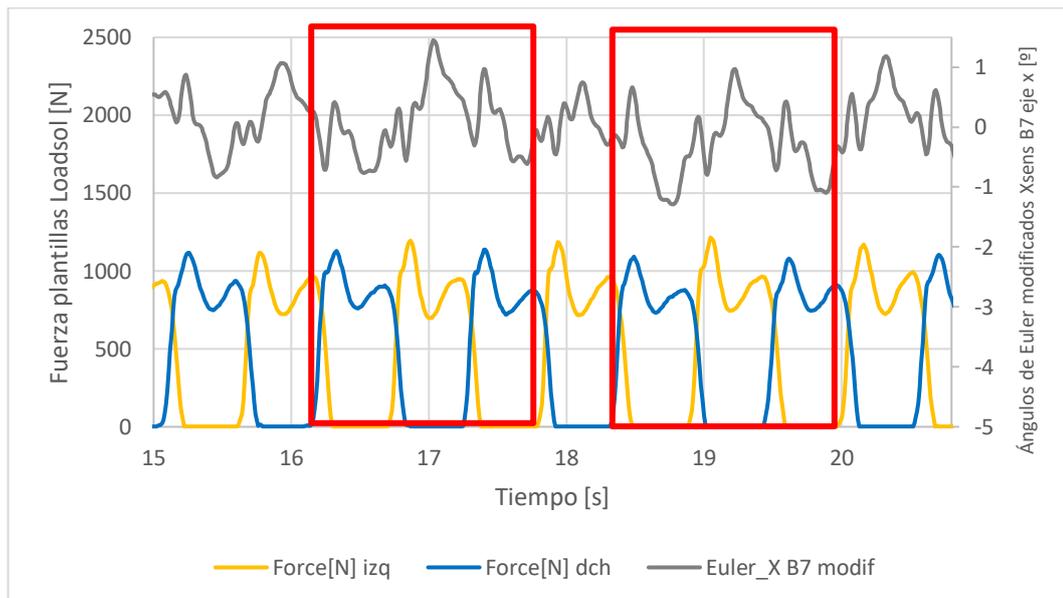


Figura 67. Repetición del patrón compuesto por dos periodos de observación del ángulo girado respecto al eje x del Xsens B7

Con la ayuda de las gráficas de las figuras anteriores y conociendo qué significa que un punto del giro sea positivo o negativo, se puede estudiar el giro realizado por el Xsens respecto al eje x relacionándolo con el paso gracias a las curvas de las fuerzas realizadas sobre las plantillas.

En rasgos generales se puede observar que, durante el aplanamiento del pie derecho se alcanza el valor más negativo, de entre $-1,3$ y $-0,7$ °, el cual se mantiene durante unas centésimas de segundos. En el instante anterior, cuando el peso empieza a recaer sobre el pie derecho y el izquierdo se despega

del suelo, la curva alcanza un máximo relativo de $0,5^\circ$ aproximadamente, cuyo valor es positivo.

El giro en el caso del apoyo del pie izquierdo está relacionado tomando valores parecidos, pero con signo contrario lo cual significa que se gira en sentido contrario. Es decir, durante el aplanamiento del pie izquierdo, el giro alcanza su máximo absoluto alcanzando un valor positivo de entre $0,9$ y $1,3^\circ$ mientras que en el aplanamiento del pie derecho se alcanzaban los mismos valores, pero en negativos. Además, justo antes de este máximo, cuando el peso empieza a recaer sobre el pie izquierdo y el derecho se despega del suelo, la curva alcanza un mínimo relativo de $-0,7^\circ$ aproximadamente mientras que el máximo alcanzado justo antes del aplanamiento del pie derecho alcanzaba un valor de en torno a los $0,5^\circ$.

Esto tiene sentido ya que, al estar el sensor en un punto del plano de simetría, los giros también son simétricos así consiguiendo el equilibrio durante el paseo.

Ángulos de giro respecto al eje y.

Lo que indica esta magnitud es el giro que realiza el Xsens B7 sobre su eje y. Estos grados se miden sobre el movimiento de giro indicado en la Figura 48, la cual indicaba también las direcciones y sentidos de la velocidad angular respecto al eje y de este mismo sensor.

La gráfica de la Figura 68 corresponde a la representación del ángulo girado sobre el eje y del sensor junto con las fuerzas de las plantillas frente al tiempo.

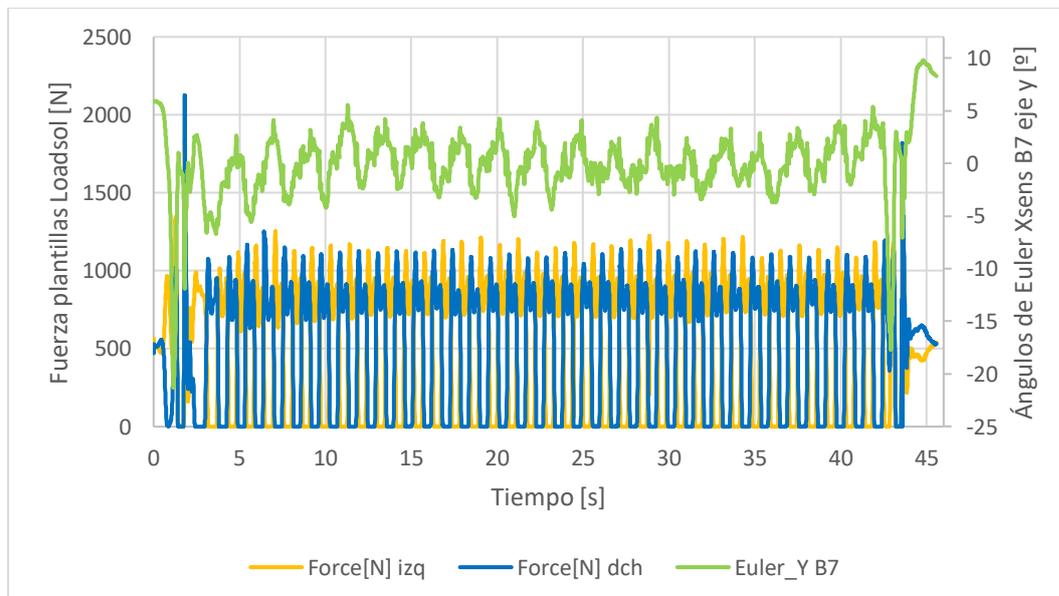


Figura 68. Representación gráfica de los ángulos de giro respecto al eje y del Xsens B7 y la fuerza de las plantillas respecto al tiempo.

Al oscilar respecto a 0° la curva durante el periodo representativo de la

grabación, no es necesario proceder como en el caso anterior, facilitando la comprensión del movimiento simétrico. Estas oscilaciones toman valores entre -5 y $+5$ °.

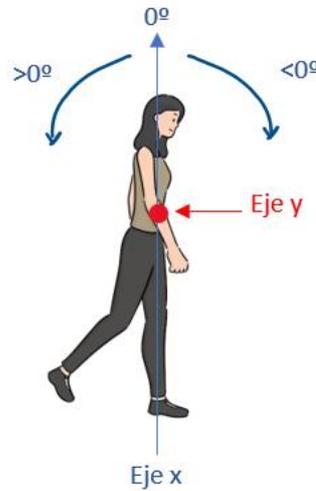


Figura 69. Representación de los ángulos respecto al eje y del Xsens B7 durante el paseo a estudiar. [8]

En la Figura 69 se resume gráficamente el significado de los valores que toman los ángulos. Cuando el ángulo obtenido es de 0 ° significa que el Xsens B7 está en su posición neutra, siendo en este caso completamente vertical y perpendicular a la superficie sobre la que se anda. El signo del ángulo, positivo o negativo, da información sobre el sentido de giro mientras que el valor absoluto indica el giro de en °.

Para estudiar estos ángulos se acota y representa, en la gráfica de la Figura 70, como en los casos anteriores un periodo representativo que permita obtener la información más fiable y realista posible del movimiento de giro en el paseo realizado.

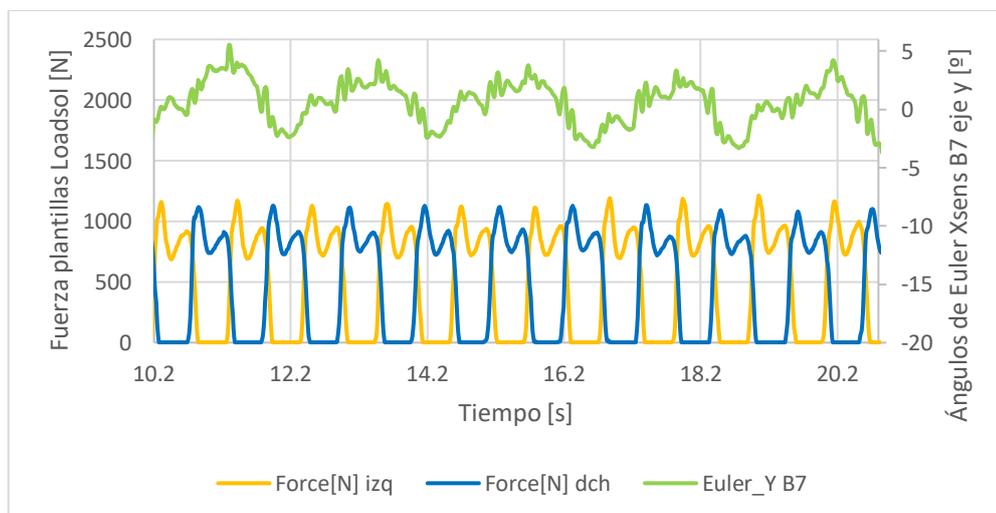


Figura 70. Ángulos de giro respecto al eje x del Xsens B7 y la fuerza de las plantillas respecto al tiempo en un periodo representativo.

Se observa que se sigue un patrón, pero a diferencia de los casos anteriores, este patrón no está comprendido por uno ni dos periodos de observación lo que hace deducir que la grabación de los ángulos de Euler en esta grabación no es representativa.

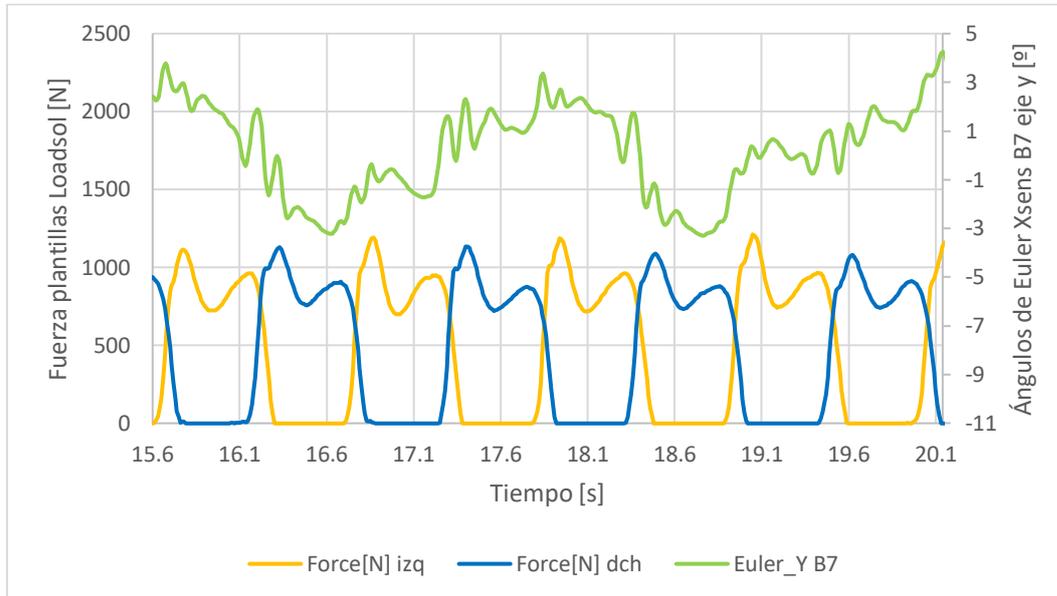


Figura 71. Posible patrón del ángulo de Euler del Xsens B7 respecto al eje y junto a la fuerza de las plantillas respecto al tiempo.

Este movimiento periódico debería de estar relacionado con el paso de manera similar a los casos anteriores. La gráfica que obtenemos no da información coherente ya que a pesar de que el patrón se cumple, no tiene sentido que no se cumpla ni cada uno (como se ha explicado anteriormente, a pesar de estar el sensor colocado en un punto del plano de simetría, puede haber factores externos que afecten) ni cada dos periodos de observación, si no cada más.

Ángulos de giro respecto al eje z.

Lo que indica esta magnitud es el giro que realiza el Xsens B7 sobre su eje z. El sistema de referencia utilizado para la medición de estos grados es el representado en la Figura 54, la cual indicaba también las direcciones y sentidos de la velocidad angular respecto al eje z de este mismo sensor.

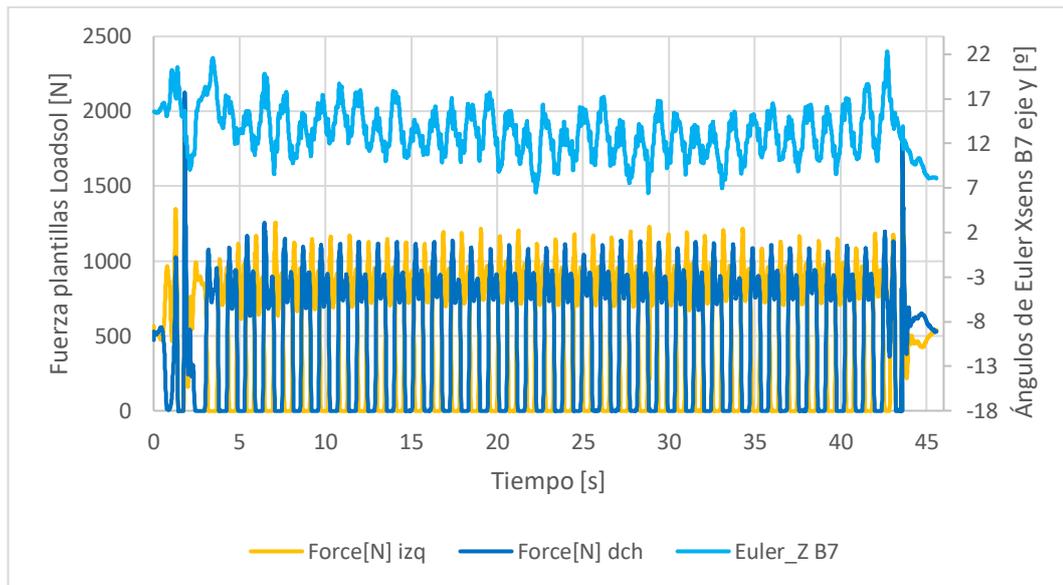


Figura 72. Representación gráfica de los ángulos de giro del Xsens B7 respecto al eje x y fuerza de las plantillas respecto al tiempo.

En la gráfica de la Figura 72 se muestra la representación del ángulo girado sobre el eje z del sensor junto con las fuerzas de las plantillas frente al tiempo correspondiente durante toda la grabación del paseo.

En el caso de la curva del ángulo girado respecto al eje que se está estudiando, el valor medio es $12,9^\circ$ y este podría ser considerado el punto respecto al cual el Xsens y el cuerpo oscilan. En el caso de este giro, ocurre algo parecido al giro respecto al eje x, el Xsens no está centrado desde el principio de forma que el eje vertical no se encuentra (en lo que hemos denominado punto neutro) completamente perpendicular al suelo. En la Figura 73 está representado el giro respecto al eje z centrado en $+12,9^\circ$ y la relación entre los grados y el sentido de giro.

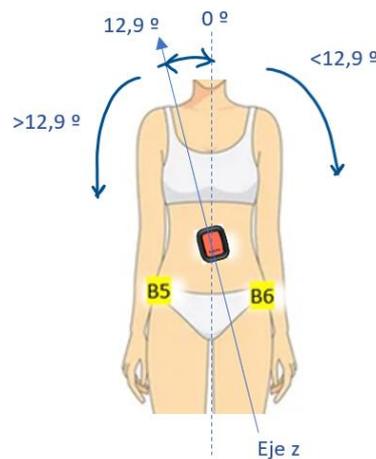


Figura 73. Representación de los ángulos respecto al eje z del Xsens B7 durante el paseo. [3]

Para facilitar el análisis se va a modificar la información obtenida

experimentalmente para conseguir un nuevo conjunto de datos que simule el perfecto posicionamiento del Xsens de manera que el eje z sea completamente perpendicular al suelo y esté completamente ubicado dentro del plano de simetría del cuerpo. Para conseguir esto, al igual que con el giro respecto al eje x, hay que restar a cada dato experimental $12,9^\circ$, así consiguiendo que la nueva media de los valores sea 0° . Antes de comenzar la grabación, a nivel práctico esta corrección hecha numéricamente después de la grabación del paseo correspondería con un perfecto posicionamiento del dispositivo.

El resultado de la equivalente modificación física junto con la representación del significado de los valores de estos nuevos datos modificados está representado en la Figura 74 mientras que esta gráficamente sería el de la Figura 75. Cuando la curva del giro respecto al eje z decrece (a medida que se avanza en el tiempo, los grados que indican la posición en la que se encuentra el sensor son más negativos) significa que el Xsens B7 gira en el sentido positivo de las agujas del reloj.

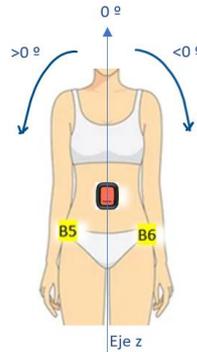


Figura 74. Representación de los ángulos modificados oscilando respecto a 0° respecto al eje z del Xsens B7 durante el paseo. [3]

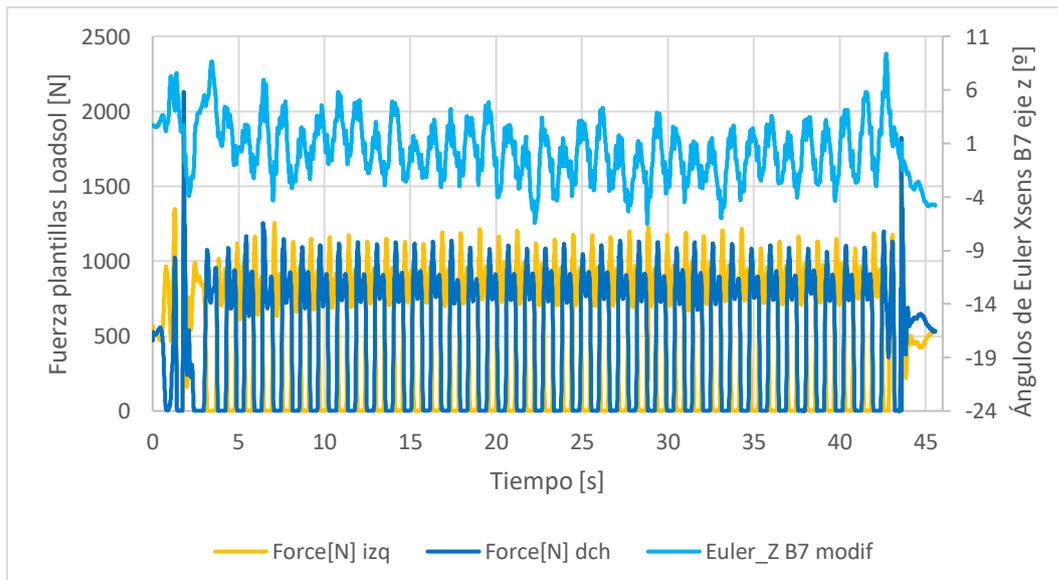


Figura 75. Representación gráfica de los ángulos de giro del Xsens B7 respecto al eje z y la fuerza de las plantillas respecto al tiempo modificada siendo el valor medio 0° .

Durante la grabación completa se observa que las oscilaciones no son perfectamente constantes ya que los máximos y mínimos las primeras y las últimas oscilaciones tienden a ser más positivas que las oscilaciones del periodo central del paseo. Para estudiar el comportamiento de esta curva, se utilizarán los datos del periodo central (Figura 76) ya que corresponde con el periodo representativo.

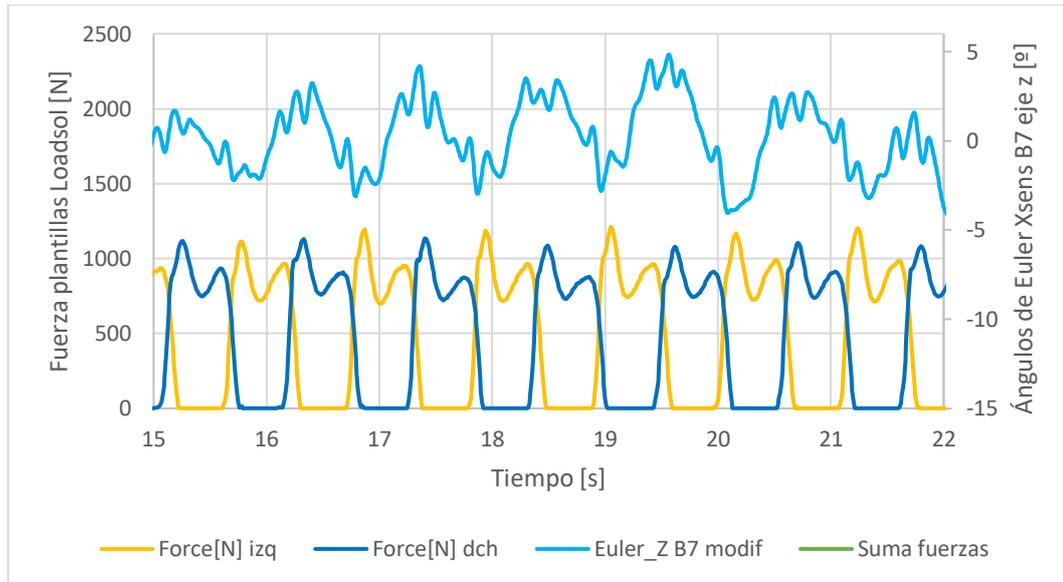


Figura 76. Ángulos de giro respecto al eje z del Xsens B7 y las fuerzas de las plantillas respecto al tiempo en un periodo representativo.

A pesar de que los mínimos alcanzados por las oscilaciones en esta zona central del paseo son parecidos entre ellos tomando un valor de -3° aproximadamente, los máximos alcanzados varían desde 2 a 5° . Aunque en la gráfica se aprecie mucho la diferencia, un giro del tronco de $\pm 3^\circ$ es prácticamente notable a la vista por lo que no es una variabilidad con necesidad de estudio.

El patrón que sigue la curva es el de la Figura 77 y está compuesto por dos periodos de observación, dos ciclos completos de marcha consecutivos, uno con cada pie.

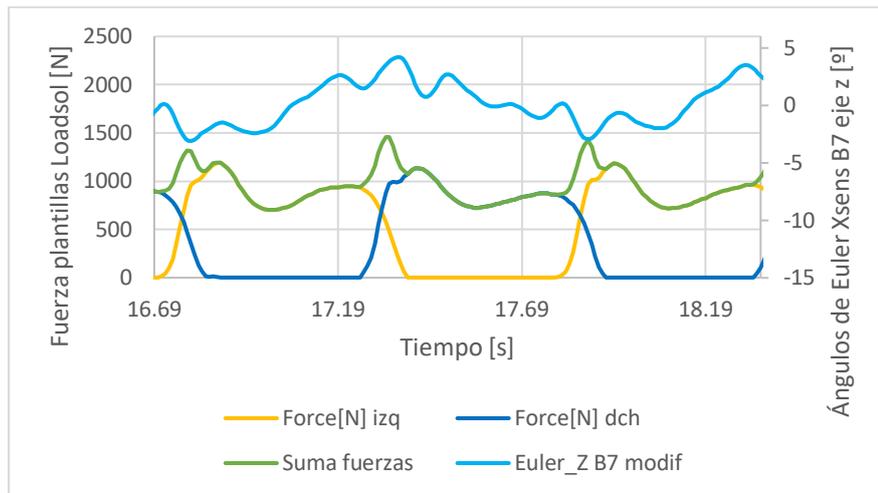


Figura 77. Patrón del ángulo de Euler del Xsens B7 respecto al eje z junto a la fuerza de las plantillas respecto al tiempo.

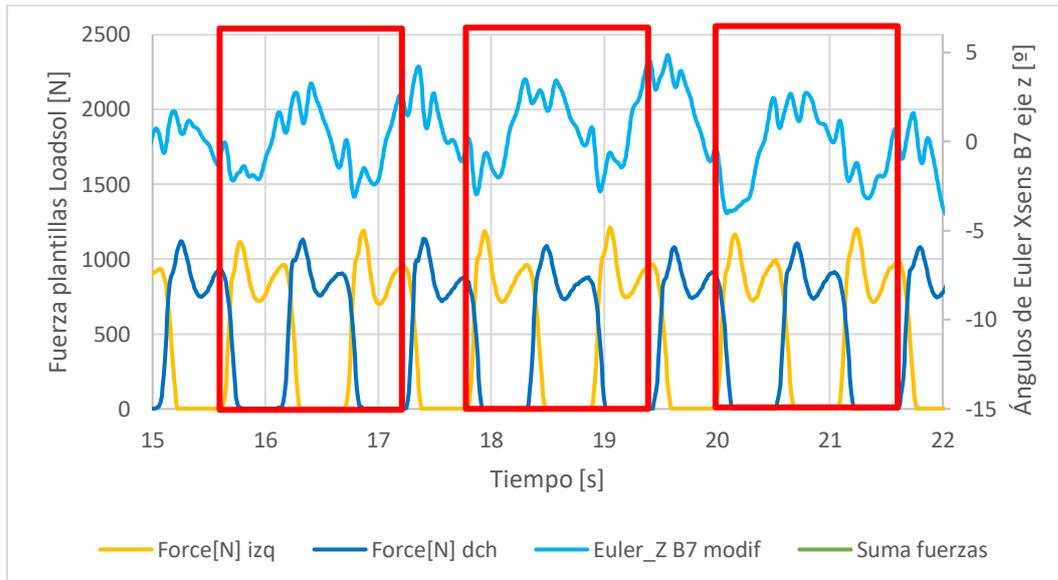


Figura 78. Repetición del patrón compuesto por dos periodos de observación del ángulo girado respecto al eje z del Xsens B7.

Con la ayuda de la Figura 78 en la que se demuestra la repetición del patrón y con la Figura 77 en la que se aprecia con claridad el comportamiento de la curva en el patrón repetido con relación a las fuerzas de las plantillas tanto individualmente como con la suma de ambas, se va a estudiar el giro que realiza el Xsens B7 en el eje z.

Antes de analizar detalladamente la forma de la curva del giro, se puede apreciar la coherencia entre esta curva y las de las fuerzas de las plantillas ya que, al transferir el peso de la pierna derecha a la izquierda, el tronco oscila en sentido horario y viceversa.



La curva comienza periodo de tiempo abarcado por dos periodos de observación consecutivos como los señalados junto con el inicio del apoyo del pie izquierdo y del paso del peso de la pierna derecha a la izquierda, instante en el que el Xsens no está girado respecto al eje x (ángulo de giro 0°). A medida que el peso va recayendo sobre la pierna izquierda, el cuerpo va girando en sentido horario (la curva es decreciente) hasta que se alcanza el mínimo absoluto en el instante en el que la suma de las fuerzas de ambas plantillas es máxima. Este giro máximo alcanzado es de -3° aproximadamente lo que indica que la amplitud de giro máxima en sentido horario (signo negativo) es de 3° .

A partir de este momento, la curva vuelve a crecer indicando que el cuerpo empieza a girar en sentido contrario al que estaba girando hasta este momento hasta alcanzar un giro de 1° respecto a la posición inicial o neutra en sentido negativo en el instante en el que ocurre el golpe de talón del pie izquierdo. Entre el golpe de talón y el aplanamiento del pie izquierdo el tronco vuelve a oscilar en sentido negativo (horario) 1° aproximadamente así alcanzando los -2° .

Estas oscilaciones son coherentes con el movimiento del cuerpo ya que, durante la transferencia del peso de una pierna a otra, el cuerpo se inclina hacia la pierna que está recogiendo cada vez más peso y poco a poco el cuerpo se va estabilizando de nuevo así disminuyendo el giro.

Desde el aplanamiento del pie izquierdo hasta la preoscilación (máximo relativo de la curva de la fuerza del pie izquierdo) la curva aumenta desde -2° hasta $+2^\circ$ lo que supone un giro de 4° en sentido positivo, es decir antihorario.

Una vez llegada la curva a este punto, oscila de manera que realiza una forma de "W" cuyo el segundo mínimo, se alcanza en el momento en el que se da el golpe de talón de pie derecho.

Desde que acaban las oscilaciones en forma de "W" el giro comienza a disminuir siendo nulo entre el aplanamiento y la preoscilación del pie derecho, manteniéndose en este valor durante unas centésimas de segundo. A continuación, aumenta en sentido negativo hasta alcanzar el máximo relativo de la fuerza del pie derecho. En este instante el giro del cuerpo disminuye progresivamente hasta que se comienza a apoyar el pie izquierdo de nuevo, cuando el tronco vuelve a girar en sentido negativo hasta alcanzar el máximo ángulo girado en sentido horario en el momento en el que la suma de las fuerzas es máxima.

4.8 Estudio de los datos obtenidos por todos los Xsens

En los capítulos anteriores se ha detallado el procedimiento de obtención de las gráficas en las que se representan las aceleraciones, las velocidades angulares y el giro sobre los 3 ejes de un Xsens y se ha estudiado el comportamiento de la curva de estas magnitudes del Xsens B7 y su relación con las fuerzas grabadas por las plantillas.

	acc_x	acc_y	acc_z	gyr_x	gyr_y	gyr_z	eu_x	eu_y	eu_z
B1									
B2									
B3									
B4									
B5									
B6									
B7									
B8									

Tabla 2. Gráficas estudiadas de las posibles con los datos grabados.

Hasta ahora, en el trabajo se ha analizado el comportamiento de 3 magnitudes comentadas del Xsens B7 respecto a los 3 ejes lo que corresponde a 9 gráficas (las 9 celdas de la Tabla 2 señaladas en color verde). Pero esto corresponde solo a una novena parte de la información susceptible a estudiar. Como se puede ver en la tabla se pueden estudiar estas 3 magnitudes en los 3 ejes de los otros 7 Xsens colocados por el cuerpo que al igual que el B7, han recogido información durante el paseo. Toda esta información que no ha sido analizada correspondería a 63 gráficas ($7 \times 9 = 63$, número de celdas en blanco de la tabla 2).

El conjunto de información obtenida con el paseo realizado se puede simplificar reduciendo de 72 gráficas a 18 con las cuales se puede sacar la información buscada. Teniendo en cuenta lo siguiente, se puede apreciar que los movimientos obtenidos con unos sensores son más representativos que otros o que dan la misma información entre ellos.

La información grabada por los sensores B7 y B8 colocados centrados en la parte anterior del cuerpo a la altura de la cintura y de la frente respectivamente, es muy similar a modo cualitativo ya que ambos Xsens se encuentran ubicados en el plano simétrico del cuerpo así teniendo patrones similares las curvas de las representaciones de las diferentes magnitudes. En el caso de querer simplificar estudiando solo el comportamiento de las magnitudes medidas de uno de estos dos Xsens es preferible optar por el análisis del B7 el cuál es más representativo debido a que durante el paseo, los movimientos que realiza una persona con la cabeza son más “aleatorios” no siempre estando directamente relacionados con la marcha humana y sus patrones de movimiento. Al analizar los datos obtenidos con el B8, la curva puede no seguir un patrón ya que hay movimientos a la hora de realizar el paseo como puede ser mirar al suelo para evitar tropezos, mirar al frente para asegurarse de seguir la trayectoria buscada o mirar al dispositivo móvil o metrónomo que hace que la información obtenida no sea del todo representativa.

Los sensores B1, B3 y B5 colocados en el tobillo derecho, encima de la rodilla derecha y en el lateral de la cadera derecha graban información cualitativamente similar a los Xsens B2, B4 y B6 que están situados en las mismas zonas, pero de la parte izquierda del cuerpo de forma simétrica. El

movimiento que realizan los sensores B1, B3 y B5 es simétrico al que realizan los Xsens B2, B4 y B5 lo que permite simplificar el estudio, analizando únicamente la información obtenida por uno de estos 3 conjunto de sensores.

Por último, dentro de los dos conjuntos anteriores serviría con analizar uno de los 3 sensores ya que a pesar de que los resultados a nivel cuantitativo serán muy diferentes, los resultados serán cualitativamente similares.

En resumen, con estudiar las 9 magnitudes posibles de 2 Xsens sería suficiente para interpretar y comprender el movimiento del usuario estudiado durante la marcha humana en el paseo realizado.

Se pueden estudiar varias combinaciones de dos Xsens siendo uno de ellos siempre el B7 o B8 (preferiblemente el B7 por su mayor representatividad) y el otro a elegir entre el B1, B2, B3, B4, B5 y B6 debido a las simplificaciones anteriores.

Por ejemplo, una combinación representativa serían los Xsens B6 y B7 constituyendo las 18 gráficas de estudio de la tabla 3 (color verde).

	acc_x	acc_y	acc_z	gyr_x	gyr_y	gyr_z	eu_x	eu_y	eu_z
B1									
B2									
B3									
B4									
B5									
B6									
B7									
B8									

Tabla 3. Gráficas a estudiar necesarias para un estudio representativo simplificado.

4.8.1. Gráficas Xsens B6

Una vez sabemos cómo obtener las gráficas del Xsens B7, cómo se analizan estas y que información nos aportan, podemos trabajar con los demás Xsens. A continuación, se exponen los resultados de las magnitudes medidas por el Xsens B6 que es aquel, junto al B7 (argumentado más atrás), que da la mayor información para interpretar correctamente gran parte del movimiento del sujeto durante la marcha humana.

Aceleraciones Xsens B6

La Figura 80 corresponde a la gráfica de la representación de la información obtenida en apartados anteriores de las aceleraciones grabadas por el Xsens B7 durante un periodo de tiempo acotado del paseo de Antolin a 100 ppm. A diferencia de esta, en la Figura 79 se aprecia durante un periodo de tiempo reducido las aceleraciones grabadas por el acelerómetro B6 durante el mismo periodo de tiempo del mismo paseo.

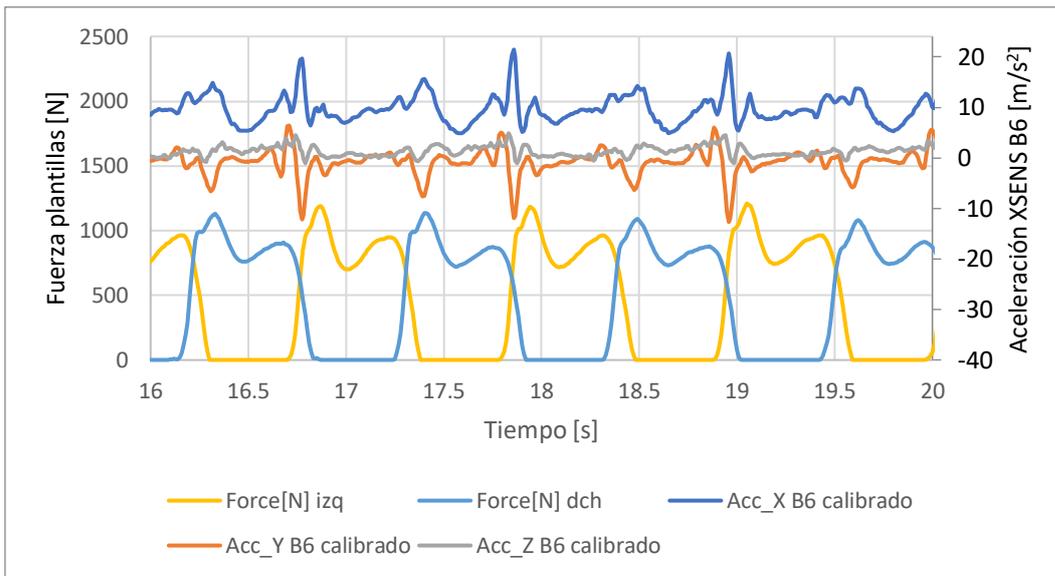


Figura 79. Aceleraciones Xsens B6

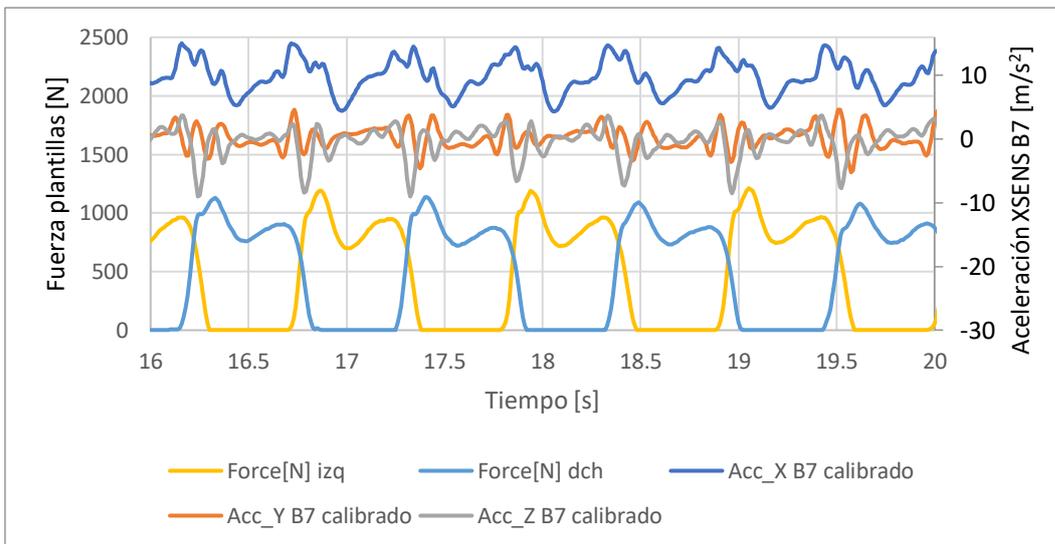


Figura 80. Aceleraciones Xsens B7

Gracias a estas dos gráficas, se pueden observar las diferencias en los patrones de estas magnitudes.

En primer lugar, en el caso de la aceleración en el eje x, la aceleración de ambos acelerómetros oscila respecto al mismo valor de 10 m/s² tomando valores entre 5 y 15 m/s² a excepción de los máximos alcanzados por la aceleración del Xsens B6 durante el cambio de apoyo del pie izquierdo al derecho. Cabe destacar que el patrón seguido por la aceleración del B6 abarca dos periodos de observación siendo notablemente diferente la curva entre los cambios de apoyo del pie derecho al izquierdo y viceversa y esto se debe a que el Xsens no está ubicado en el eje de simetría del cuerpo a diferencia del Xsens B7 que sí lo está y por ello el patrón se podría decir que se repite cada periodo de observación o paso completo. A pesar de que los valores de la aceleración para cada acelerómetro no coinciden en cada instante de tiempo, la forma de la

curva se asemeja alcanzándose los máximos y los mínimos en el mismo instante de tiempo.

Las diferencias entre las aceleraciones de los ejes y de cada acelerómetro son mínimas. La principal es la mayor oscilación de la aceleración del Xsens B6 que la del B7 alcanzando valores máximos de $+5 \text{ m/s}^2$ y mínimos de hasta -10 m/s^2 . A pesar de esa mínima diferencia, las curvas tienen forma análoga tomando valores proporcionalmente similares.

Por último, se puede apreciar claramente en las figuras anteriores las diferentes oscilaciones de la aceleración en el eje z las cuales a pesar de oscilar en torno al mismo valor medio de 0 m/s^2 , la del B6 oscila en menor cantidad que la del B7 que alcanza aceleraciones mucho mayores en valor absoluto.

Gyr Xsens B6

Trabajando bajo el mismo procedimiento que con el Xsens B7 se puede obtener la información de la velocidad angular grabada por el Xsens B6 colocado en un lado de la cadera. El resultado de la representación gráfica de las velocidades angulares de este nuevo sensor del conjunto a analizar es la correspondiente con la Figura 81.

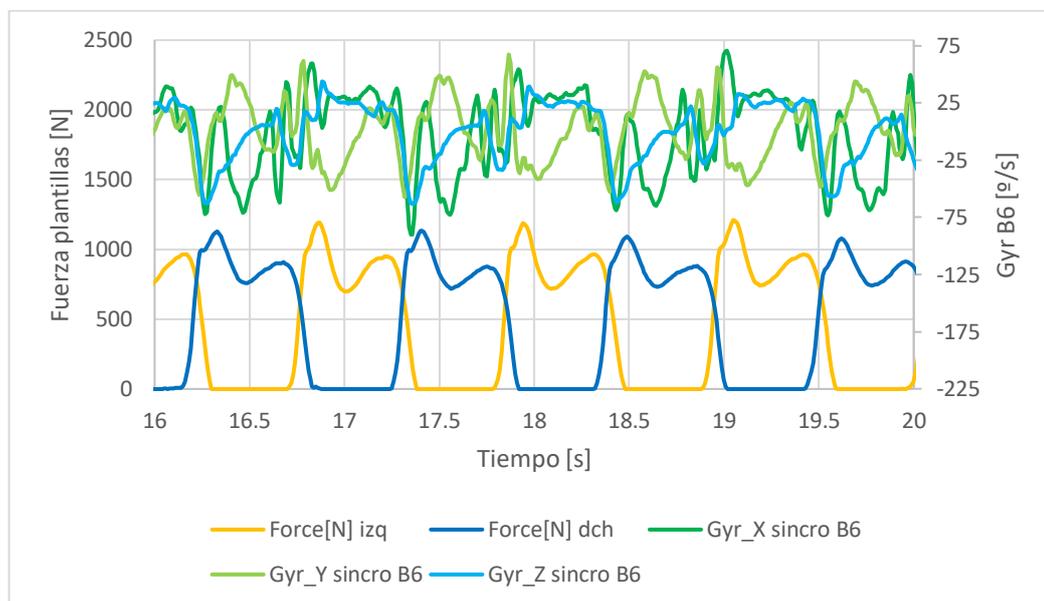


Figura 81. Velocidad angular Xsens B6

Para ver más claramente la forma que toma la curva de las velocidades angulares para este sensor en cada uno de los ejes de este, se opta por dividir la gráfica anterior separando la velocidad de cada eje. Además, se añadirá la velocidad angular de cada eje del Xsens B7 obtenidas anteriormente para comparar con más facilidad.

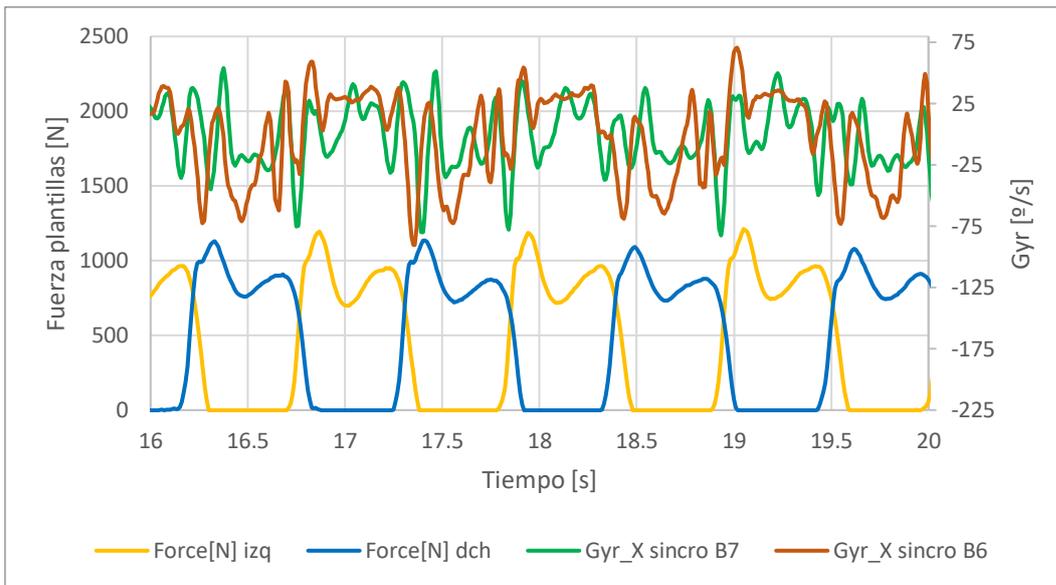


Figura 82. Comparación velocidades angulares respecto al eje x de los Xsens B6 y B7

En la Figura 82 se observan superpuestas ambas velocidades angulares. Como similitudes entre las dos curvas cabe destacar que la velocidad angular oscila en ambos casos en torno a 0 °/s y alcanza máximos y mínimos similares. Por lo demás, se ve claramente que el patrón seguido no es el mismo y, estudiando grosso modo, el patrón de la velocidad angular se ve que se repite en el caso del B7 cada periodo de observación mientras que en el caso del B6 cada dos, y esto se debe a la ubicación del Xsens en el cuerpo del sujeto.

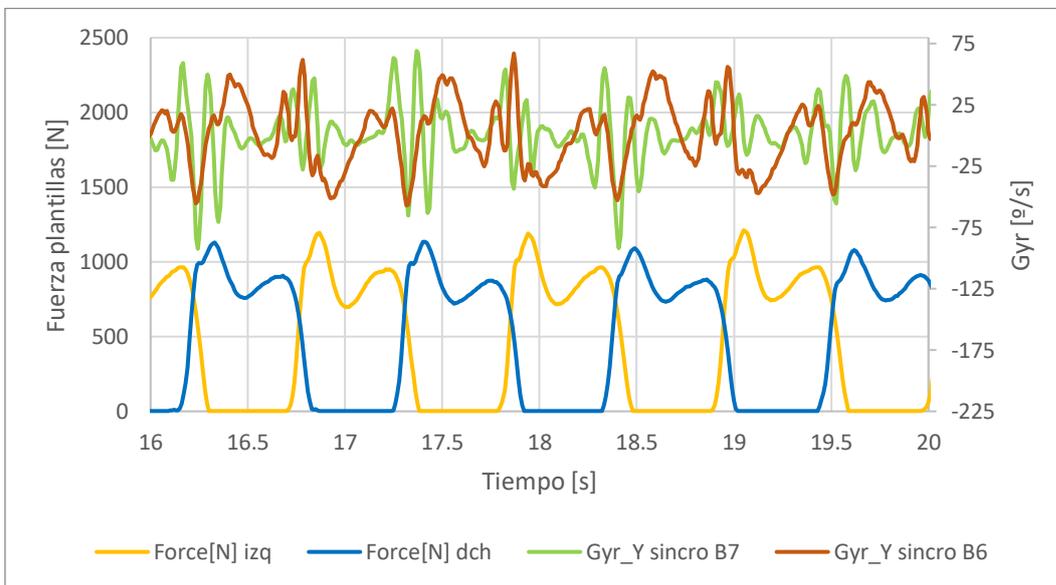


Figura 83. Comparación velocidades angulares respecto al eje y de los Xsens B6 y B7.

En la Figura 83 se superponen las curvas de ambos Gyr que oscilan en torno a una velocidad angular nula. Los valores que toma la velocidad angular en cada instante de tiempo son completamente diferentes. En el instante de tiempo en

el que la suma de la fuerza de las plantillas es máxima (la fuerza aplicada sobre ambas plantillas es la misma) durante el cambio de apoyo del pie izquierdo al derecho, ambas curvas alcanzan su mínimo absoluto. Por el contrario, cuando la suma de las fuerzas es máxima durante el cambio de apoyo es del pie derecho al izquierdo, la curva de la velocidad angular del Xsens B6 alcanza su máximo absoluto mientras que la del B7 toma uno de sus valores mínimos. Diferencias como estas, que se pueden analizar con la ayuda de la gráfica anterior, se deben al posicionamiento de ambos sensores ya que, como se ha comentado anteriormente, el B6 se ubica en un lateral de la cadera mientras que el B7 en el eje de simetría del cuerpo siendo así el patrón repetido cada paso y el del B6 cada dos.

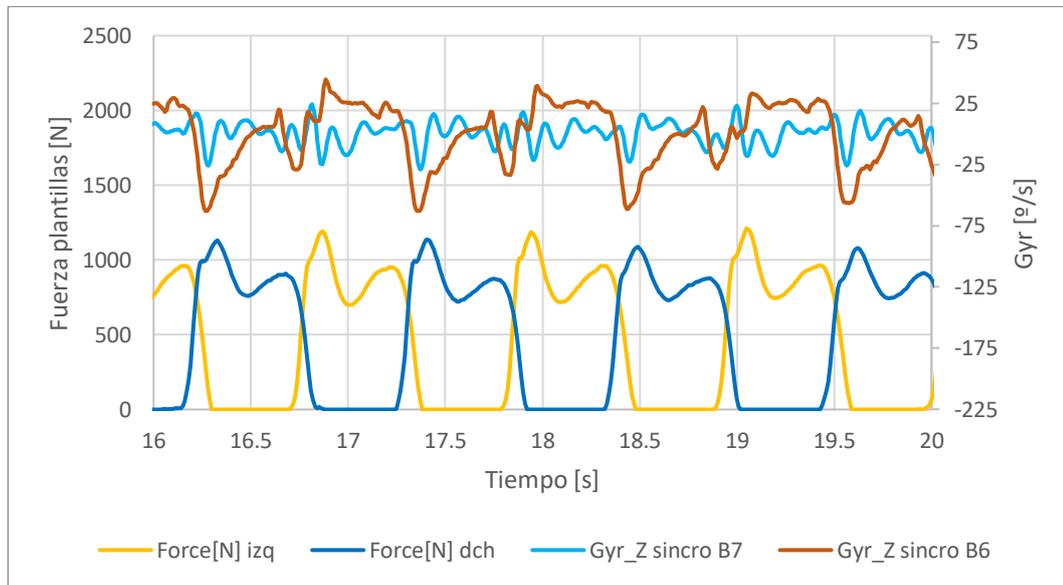


Figura 84. Comparación velocidades angulares respecto al eje z de los Xsens B6 y B7

Por último, si se analizan las diferencias entre la velocidad angular del eje z de ambos giroscopios con ayuda de la Figura 84, se ven claras diferencias como que la curva del B6 oscila con mayor amplitud en torno a la velocidad nula que la del B7 y que el patrón de la curva marrón está compuesto por dos periodos de observación y el de la azul por uno. Sucede lo mismo que en el caso de la velocidad angular en el eje y, en el cambio de apoyo del pie izquierdo al derecho, en el instante de fuerza máxima, ambas velocidades angulares alcanzan el valor más negativo mientras que en el instante en el que la suma de las fuerzas de la plantilla es máxima durante el cambio de apoyo es del pie derecho al pie izquierdo, la velocidad angular del Xsens B6 toma de nuevo un valor negativo mientras que la del B7 toma un valor positivo. Otra diferencia notable es que durante el apoyo único de un pie mientras la velocidad angular del Xsens B7 oscila constantemente en el caso del Xsens B6 cuando el apoyo es sobre el pie derecho, la velocidad crece constantemente aproximadamente hasta que se empieza a despegar el pie del suelo y cuando el pie apoyado es el izquierdo, la velocidad se mantiene bastante constante en un valor positivo de 25 °/s aproximadamente.

Ángulos de Euler Xsens B6

La última magnitud por analizar del sensor ubicado en el lateral izquierdo de la cadera es la posición medida con los ángulos de Euler. Con los ángulos proporcionados, uno respecto al giro de cada eje del Xsens, se podría saber exactamente cómo evoluciona el movimiento de este dispositivo en cada instante de tiempo. Esto es un proceso complejo de análisis cuyo estudio se propone como línea futura.

Con la información que proporciona la representación de los tres ángulos junto a las fuerzas detectadas por las plantillas se puede estudiar el giro en cada instante de tiempo del Xsens a estudiar. A continuación, con la ayuda de la Figura 85 y Figura 86 se pueden ver las diferencias entre los movimientos de los Xsens B6 y B7.

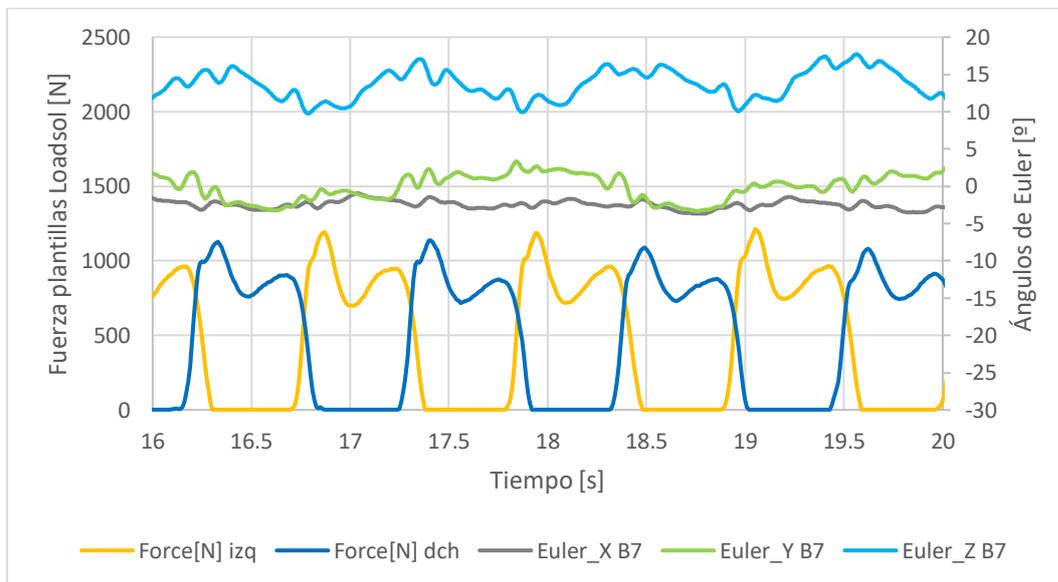


Figura 85. Ángulos de Euler Xsens B7

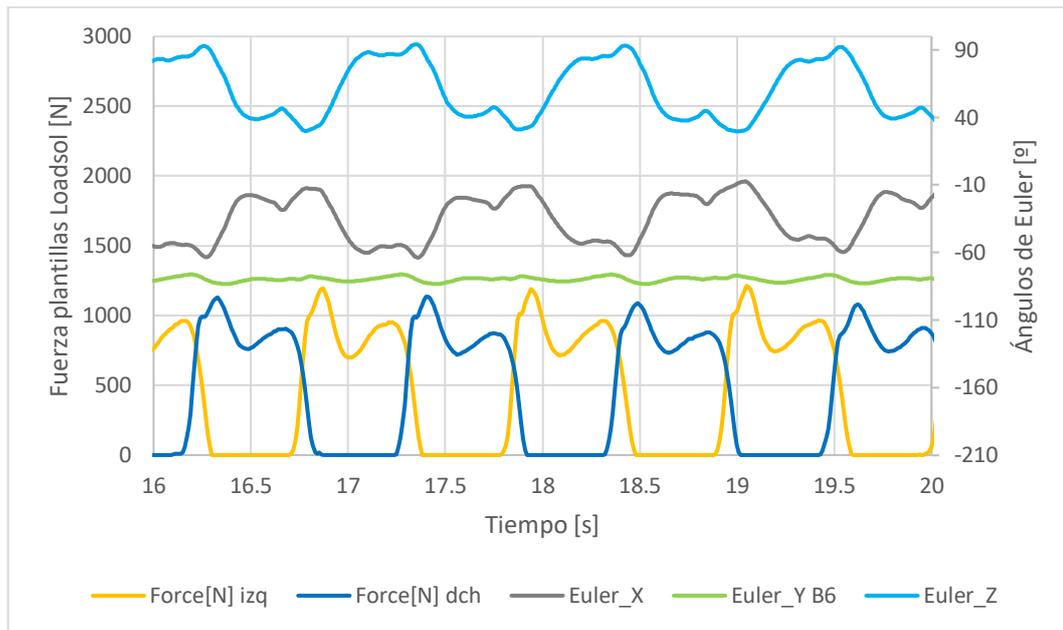


Figura 86. Ángulos de Euler Xsens B6

El giro respecto al eje x, representado en las gráficas anteriores de color gris, es muy diferente entre ambos sensores. El giro del sensor colocado en la cadera es mucho mayor que el de la cintura girando el de la cadera 50° durante un ciclo de marcha, oscilando en la gráfica entre -60 y -10° , mientras que el giro de la cintura es mucho menor siendo aproximadamente de 2° .

En cambio, en el caso del giro respecto al eje y nos encontramos con una situación diferente en la que ambos Xsens giran aproximadamente los mismos grados durante la marcha. Esto no se aprecia con claridad en las figuras anteriores ya que los límites superior e inferior de los ejes verticales secundarios no son iguales, para comprobarlo, representamos los giros respecto a este eje acotando estos límites obteniendo las gráficas de la Figura 87 en la que se ve que la amplitud de oscilación es muy parecida, de 8° aproximadamente.

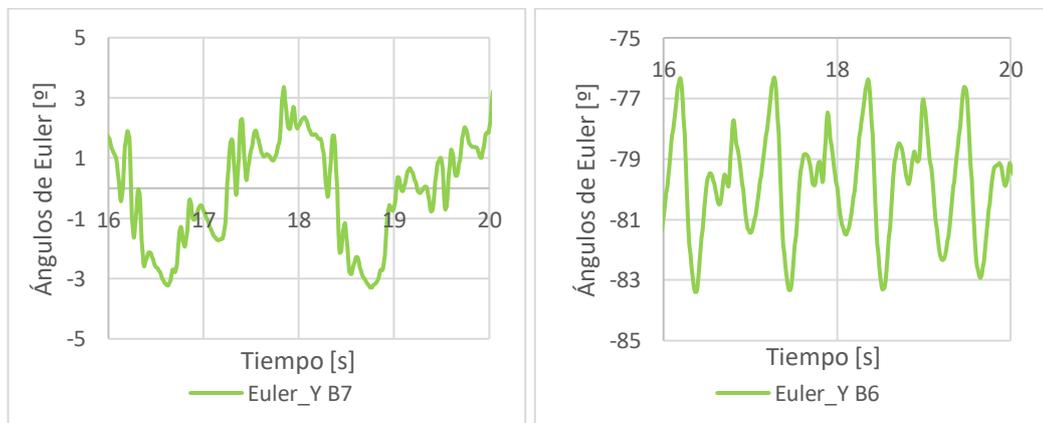


Figura 87. Representación del giro respecto al eje y de los sensores B6 y B7

Por último, sucede lo mismo con el giro respecto al eje z, es mucho mayor para el Xsens ubicado en la cadera siendo la amplitud de oscilación de 50° que en el de la cintura cuya amplitud de giro es de 18° aproximadamente.

Como conclusión, el giro realizado por el punto de la cadera sobre el que se coloca el Xsens B6 es mucho mayor que el giro realizado por el punto de la cintura del usuario durante el paseo, especialmente en el eje x y z.



CAPITULO 5. CONCLUSIONES.

5.1 Interpretación de resultados

Llegando al final de este TFG, se puede concluir diciendo que el objetivo del estudio se ha cumplido satisfactoriamente. Se ha establecido y explicado una metodología de toma de datos con los Xsens y las plantillas Loadsol durante un paseo, a la vez que se ha realizado una base de datos de varios paseos a diferentes velocidades de diferentes usuarios, con el objetivo de facilitar a futuros usuarios la obtención de registros. También se ha detallado el procedimiento de representación de la información obtenida con estos sensores *wearables* para facilitar en análisis de las magnitudes obtenidas que son la velocidad angular, giro y aceleración de aquellas partes del cuerpo sobre las que están apoyadas los Xsens y las fuerzas que ejerce el sujeto con las plantas de los pies sobre el suelo.

Por otro lado, se han estudiado con éxito estas representaciones gráficas del Xsens B7, acelerómetro más representativo, junto con las fuerzas obteniendo diferentes resultados coherentes con el movimiento del cuerpo humano durante la marcha.

Finalmente, se plantea como deducir el movimiento de las extremidades inferiores, tronco y cabeza con únicamente 2 Xsens de los 8 utilizados durante el proceso de obtención de datos.

5.2 Desarrollo futuro

Durante la realización de este Trabajo de Fin de Grado se ha obtenido una completa base de datos comprendida por paseos realizados por diferentes sujetos a todas las frecuencias posibles que permiten que los movimientos del usuario sean naturales tanto andando como corriendo.

Al realizar una toma de datos de diferentes sujetos, se ha obtenido un conjunto de información más variado y por tanto más representativo del completo de la población ya que cada uno de los sujetos tiene unas características propias que pueden variar respecto a los demás en la altura, peso y distribución del mismo, tipo de calzado, patologías...

Toda esta información puede utilizarse para estudios futuros como:

- Estudio de los paseos de un mismo sujeto a diferentes frecuencias interpretando la variación del movimiento de aquellas partes del cuerpo en las que están colocadas los Xsens y la evolución de la forma de la pisada.
- Análisis de la estabilidad de la frecuencia de paso.
- Análisis de los paseos en función de la velocidad en la que cada sujeto realiza el paseo en lugar de en función de la frecuencia de paso.

- Diferencias entre un mismo paseo a una misma frecuencia realizados por sujetos diferentes y análisis de en qué medida las características de estos sujetos afectan a estas diferencias.
- Explorar fenómenos de sincronización en grupos de peatones.
- Análisis de los patrones ya analizados en este trabajo con más profundidad, superponiéndolos y calculando dispersiones, errores...
- Comprobación de la similitud cualitativa de los valores grabados por los Xsens B7 y B8; B1, B3 y B5 y; B2, B4 y B6 comentada anteriormente. También se puede estudiar las diferencias cuantitativamente entre los valores tomados por estos sensores en un mismo paseo y si cumplen alguna proporcionalidad.
- En este trabajo se ha estudiado cada ángulo de Euler por separado (respecto a cada eje) siendo un posible estudio futuro el del conjunto de ángulos de Euler en cada instante de tiempo así determinando la posición real del Xsens y por tanto de aquella parte del cuerpo sobre el que está posicionado este.

Además, se plantea la toma de datos de paseos realizados en diferentes condiciones como pueden ser en una colina hacia arriba o hacia abajo así tendiéndose a decelerar o acelerar el sujeto o la adición de peso sobre el usuario que realiza el paseo. Puede ser de gran interés hacer un estudio como el realizado o como los propuestos con esta nueva base de datos proporcionando información muy valiosa la cual puede ser aplicada en diversas áreas.

5.3 Consideraciones adicionales

La ejecución de este Proyecto de Fin de Grado ha demandado a lo sumo 390 horas aproximadamente. Estas horas dedicadas se pueden dividir en varias partes. Antes de empezar a trabajar con los sensores *wearables*, se requirieron 50 horas de aprendizaje al manejo de estos por medio de manuales, artículos, investigación propia y con ayuda de personas que ya han trabajado con estos dispositivos. La preparación de los instrumentos y la recolección de datos con todo lo que conlleva con 3 usuarios diferentes abarcó un total de 100 horas. Parte de estas 150 horas estimadas de trabajo, las cuales componen la parte experimental, se realizaron durante las prácticas de empresa. Una vez concluida esta fase, se dedicaron alrededor de unas 70 horas en la estructuración del trabajo, extracción de datos y representación de estos con la ayuda de Excel. Para concluir, fueron necesarias 170 horas más en la investigación y adquisición de conocimiento sobre el movimiento del cuerpo humano durante la marcha, redacción del informe final relacionando los datos obtenidos en la parte experimental con lo aprendido durante la investigación y con los resultados de las representaciones gráficas de Excel.

Al igual que se ha realizado una estimación de las horas necesitadas para este estudio, se puede realizar un estudio de los costes. Teniendo en cuenta que la parte experimental se ha hecho durante 150 horas del periodo de prácticas, es decir, 6 créditos ya que 1 crédito equivale a entre 25 y 30 horas de trabajo y



siendo unas prácticas del Grado de Ingeniería Mecánica en las cuales el alumno paga por crédito 20,45 euros el gasto total sería de $20,45 \times 6 = 122,7$ €. El trabajo realizado después que implicaba 240 h, es decir, 9,6 créditos, equivale a nivel económico a 197,18 €. La suma del cálculo económico realizado con la ayuda del precio por crédito en total es de 319,88 €. Este valor aumentaría con gastos indirectos difíciles de calcular como son la electricidad del lugar en el que se trabaja o el uso de los dispositivos (no obtenidos explícitamente para este trabajo) el cual genera desgaste.

El Proyecto realizado no tiene ningún impacto a nivel ambiental a excepción del consumo energético correspondiente y el posible impacto futuro a la hora de desechar los materiales o dispositivos/componentes eléctricos en el fin de su vida tras ser el uso de ellos para este trabajo uno de los muchos.

Por último, la realización de este trabajo no ha supuesto ningún riesgo ni impacto en la seguridad. No se ha utilizado ningún material peligroso, durante los paseos realizados no se han forzado las capacidades de los sujetos y la superficie sobre la que se realizaba el paseo era plana así evitando imprevistos por diferentes irregularidades.



BIBLIOGRAFIA

- [1] MARTIN NOGUERAS, A.; CALVO ARENILLAS, J L.; OREJUELA RODRÍGUEZ, J.; BARBERO IGLESIAS, F J. y SÁNCHEZ SÁNCHEZ, C. (1999, 1 enero). Fases de la marcha humana. Revista Iberoamericana de Fisioterapia y Kinesiología. Vol.2. Núm. 1. Páginas 44-49. <https://www.elsevier.es/es-revista-revista-iberoamericana-fisioterapia-kinesiologia-176-articulo-fases-marcha-humana-13012714> [Consulta: 13 de marzo de 2024]
- [2] MOVELLA. Xsens DOT User Manual. <<https://www.xsens.com/hubfs/Xsens%20DOT%20User%20Manual.pdf?hsCtaTracking=ba3917b0-c02b-4b83-9dd0-fcc0d06d0d13%7Ca200d741-4f23-4e67-9041-048d7a27de39>> Revisión I 16 de marzo de 2023. [Consulta: 12 de septiembre de 2023]
- [3] Depositphotos, Inc. (s. f.). Banco de imágenes, música y vídeos de stock libres de derechos. <https://depositphotos.com/es/> [Consulta: 05 de octubre de 2023]
- [4] novelUSA support. (s. f.). Novel USA. <https://www.novelusa.com/support> [Consulta: 03 de noviembre de 2022]
- [5] <https://support.microsoft.com/es-es/office/tareas-b%C3%A1sicas-en-excel-dc775dd1-fa52-430f-9c3c-d998d1735fca#:~:text=Excel%20es%20una%20herramienta%20muy,la%20cuadr%C3%ADcula%20de%20las%20celdas> [Consulta: 13 de marzo de 2024]
- [6] NAVARRO, B. Ciclo y fases del ciclo de la marcha humana. (2023, 14 diciembre). Kenhub. <https://www.kenhub.com/es/library/anatomia-es/ciclo-y-fases-del-ciclo-de-la-marcha-humana> [Consulta: 13 de marzo de 2024]
- [7] Edajube. (2021, 6 enero). 05. Postura y marcha | Enfermería. Enfermería. <https://enfermeria.top/apuntes/anatomia/miembro-inferior/postura-marcha/> [Consulta: 15 de marzo 2024]
- [8] Vue de dessus des personnes définies isolé sur fond blanc. hommes et femmes. vue d'en-haut. personnages masculins et féminins. conception de dessin animé plat simple. illustration réaliste. | Vecteur premium. (2020, 24 marzo). Freepik. https://fr.freepik.com/vecteurs-premium/vue-dessus-personnes-definies-isole-fond-blanc-hommes-femmes-vue-haut-personnages-masculins-feminins-conception-dessin-anime-plat-simple-illustration-realiste_7362375.htm [Consulta: 13 de mayo 2024]
- [9] Ingenierizando. (2022, 21 diciembre). Giroscopio. Ingenierizando. <https://www.ingenierizando.com/laboratorio/giroscopio/> [Consulta: 06 de abril 2024]
- [10] Santos, M. D. (2024, 13 enero). Resuelve tus dudas sobre los ángulos de

Euler con estos ejercicios prácticos - Polaridad.es. Polaridad.es.
<https://polaridad.es/angulos-de-euler-ejercicios-resueltos/> [Consulta: 01
de marzo 2024]