



Universidad de Valladolid



**ESCUELA DE INGENIERÍAS
INDUSTRIALES**

UNIVERSIDAD DE VALLADOLID

ESCUELA DE INGENIERIAS INDUSTRIALES

Grado en Ingeniería mecánica

**Metodología para la toma de registros
biomecánicos combinando sensores
inerciales y de presiones plantares.**

Autor:

San José López, Pablo

Tutores:

**Lorenzana Ibán, Antolín
Magdaleno González, Álvaro
Departamento C.A., I.T., M.M.C.
y Teoría de Estructuras**

Valladolid, enero 2024.



AGRADECIMIENTOS

Agradezco a mis tutores, Álvaro Magdaleno y Antolín Lorenzana, por su orientación experta y apoyo constante. Sus conocimientos y dedicación fueron fundamentales para el éxito de este proyecto y para mi crecimiento como estudiante de ingeniería mecánica.

A mi familia, les debo un agradecimiento profundo. Su apoyo incondicional y su confianza en mí me dieron la fuerza necesaria para superar los desafíos y alcanzar mis metas académicas.

No puedo pasar por alto el invaluable aporte de mis compañeros y amigos, fueron un pilar fundamental en mi formación como ingeniero.

A todos ustedes, mi más profundo agradecimiento. Este logro no habría sido posible sin su apoyo y confianza en mí.



RESUMEN

El presente Trabajo de Fin de Grado se centra en la experimentación con unidades inerciales *XSENS* y plantillas *Loadsol* para el registro de parámetros biomecánicos durante la marcha. La metodología comprende la calibración interna y externa de las plantillas y unidades inerciales, junto con la corrección y sincronización de datos. Los resultados destacan la necesidad de definir un proceso calibración y de sincronización que sienten las bases para futuras exploraciones biomecánicas. Consideraciones adicionales en anexos detallan el uso correcto de dispositivos y software, contribuyendo a la replicabilidad. El estudio subraya la importancia de la calibración precisa y sugiere posibilidades de expansión futura en entornos específicos. En conjunto, ofrece una visión integral de la experimentación biomecánica, desde la calibración hasta la aplicación práctica de los datos.

PALABRAS CLAVE

Calibración, sincronización de datos, experimentación biomecánica.

ABSTRACT

This bachelor's Thesis focuses on experimenting with *XSENS* accelerometers and *Loadsol* Novel in recording biomechanical parameters during walking. The methodology involves both internal and external calibration of templates and accelerometers, along with data correction and synchronization. The results emphasize the necessity of defining a calibration and synchronization process that lays the groundwork for future biomechanical explorations. Additional considerations in annexes detail the proper use of devices and software, contributing to replicability. The study underscores the importance of precise calibration and suggests possibilities for future expansion in specific environments. Overall, it provides a comprehensive overview of biomechanical experimentation, from calibration to the practical application of data.

KEYWORDS

Calibration, data synchronization, biomechanical experimentation.



ÍNDICE DE CONTENIDOS

CAPÍTULO 1. Introducción y objetivos.....	1
1.1. Introducción	1
1.2. Antecedentes y motivación.....	1
1.3. Objetivos	1
CAPÍTULO 2. Instrumentación y calibración.....	3
2.1. Unidades inerciales XSENS	3
2.2. Plantillas <i>Loadsol</i>	5
2.3. Otros instrumentos utilizados.....	6
2.4. Calibración de las unidades inerciales <i>XSENS</i>	8
2.5. Calibración de las plantillas <i>Loadsol</i>	19
CAPÍTULO 3. Metodología	33
CAPÍTULO 4. Procesado de datos.....	39
4.1. Registros, andando.....	39
4.2. Registros, corriendo.	51
CAPÍTULO 5. Resultados.....	63
5.1. Interpretación de Resultados.....	63
5.2. Limitaciones del Estudio y Posibles Fuentes de Error	64
CAPÍTULO 6. Conclusiones, recomendaciones y líneas futuras.	65
6.1. Conclusiones.....	65
6.2. Recomendaciones y trabajo futuro.....	65
6.3. Consideraciones adicionales	66
Bibliografía	68

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Sensores XSENS [6].....	5
Figura 2. Plantillas Loadsol by Novel [7].....	6
Figura 3. TFP- Front face	6
Figura 4. TFP- Back face.....	6
Figura 5. Metrónomo	7
Figura 6. Zapatillas Salomon XA PRO 3D [8].....	8
Figura 7. Tarjetas de adquisición de datos. Modelo SIRIUS by DEWSoft [9]	9
Figura 8. Shaker y XSENS.....	9
Figura 9. Shaker con XSENS y acelerómetro piezoeléctrico.....	9
Figura 10. XSENS [6]	10
Figura 11. Comparación XSENS y piezoeléctrico vista general previa calibración externa.....	11
Figura 12. Comparación XSENS y piezoeléctrico eliminada acción de la gravedad	12
Figura 13. Comparación XSENS y piezoeléctrico previa calibración externa.	13
Figura 14. Comparación XSENS y piezoeléctrico post calibración.	14
Figura 15. Montaje XSENS para calibración interna.	15
Figura 16. Montaje XSENS para calibración interna.	15
Figura 17. Montaje XSENS para calibración interna endurecido con cinta adhesiva.	16
Figura 18. Calibración interna XSENS.....	17
Figura 19. Discrepancias previa calibración interna XSENS	17
Figura 20. Calibración interna XSENS previa sincronización.....	18
Figura 21. Calibración interna XSENS post-sincronización.....	19
Figura 22. Gráfico TFP-Plantillas.....	22
Figura 23. Gráfico TFP- Plantillas- Suma	23
Figura 24. Gráfico TFP- plantillas zona inicial.....	24
Figura 25. Gráfico TFP- Plantillas zona central.....	24
Figura 26. Gráfico TFP- Plantillas Post calibración	25
Figura 27. Gráfico TFP- Plantillas Post calibración zona inicial	26
Figura 28. Gráfico TFP- Plantillas Post calibración zona central	26
Figura 29. TFP- Suma Plantillas Post calibración	27
Figura 30. Calibración Interna Plantillas Loadsol	29
Figura 31. Calibración Interna Plantillas Loadsol	29
Figura 32. Calibración Interna Plantillas Loadsol Post Calibración	30
Figura 33. Calibración Interna Plantillas Loadsol-Suma Post Calibración	31
Figura 34. Disposición XSENS en el cuerpo del investigador	35
Figura 35. Representación Plantillas en paseo a baja frecuencia	40



Figura 36. Gráfico XSENS B7.....	41
Figura 37. Representación Plantillas- XSENS B7.....	41
Figura 38. Representación Plantillas- XSENS B7.....	42
Figura 39. Representación Plantillas- XSENS B7 Post Sincronización	43
Figura 40. Representación Plantillas- XSENS B7 Post Sincronización zona inicial.....	43
Figura 41. Representación Plantillas- XSENS B7 Post Sincronización zona final.....	44
Figura 42. Patrones de pisadas y aceleraciones- XSENS B7	44
Figura 43. Representación Plantillas- XSENS B1 Post Sincronización	45
Figura 44. Patrones de pisadas y aceleraciones- XSENS B1	46
Figura 45. Representación Plantillas- XSENS B2 Post Sincronización	46
Figura 46. Patrones de pisadas y aceleraciones- XSENS B2	46
Figura 47. Representación Plantillas- XSENS B3 Post Sincronización	47
Figura 48. Patrones de pisadas y aceleraciones- XSENS B3	47
Figura 49. Representación Plantillas- XSENS B4 Post Sincronización	48
Figura 50. Patrones de pisadas y aceleraciones- XSENS B4	48
Figura 51. Representación Plantillas- XSENS B5 Post Sincronización	49
Figura 52. Patrones de pisadas y aceleraciones- XSENS B5	49
Figura 53. Representación Plantillas- XSENS B6 Post Sincronización	50
Figura 54. Patrones de pisadas y aceleraciones- XSENS B6	50
Figura 55. Representación Plantillas- XSENS B8 Post Sincronización	51
Figura 56. Patrones de pisadas y aceleraciones- XSENS B8	51
Figura 57. Representación Plantillas- XSENS B7.....	53
Figura 58. Representación Plantillas- XSENS B7 Post Sincronización	54
Figura 59. Patrones de pisadas y aceleraciones- XSENS B7	54
Figura 60. Representación Plantillas- XSENS B1 Post Sincronización	55
Figura 61. Patrones de pisadas y aceleraciones- XSENS B1	55
Figura 62. Representación Plantillas- XSENS B2 Post Sincronización	56
Figura 63. Patrones de pisadas y aceleraciones- XSENS B2	56
Figura 64. Representación Plantillas- XSENS B3 Post Sincronización	57
Figura 65. Patrones de pisadas y aceleraciones- XSENS B3	57
Figura 66. Representación Plantillas- XSENS B4 Post Sincronización	58
Figura 67. Patrones de pisadas y aceleraciones- XSENS B4	58
Figura 68. Representación Plantillas- XSENS B5 Post Sincronización	59
Figura 69. Patrones de pisadas y aceleraciones- XSENS B5	59
Figura 70. Representación Plantillas- XSENS B6 Post Sincronización	60
Figura 71. Patrones de pisadas y aceleraciones- XSENS B6	60

Figura 72. Plantillas- XSENS B8 Post sincronización	61
Figura 73. Patrones de pisadas y aceleraciones- XSENS B8	61
Figura 74. Aplicación Movella DOT	71
Figura 75. Acelerómetro XSENS [10]	71
Figura 76. Menú Dashboard.....	72
Figura 77. Activación de XSENS.....	73
Figura 78. Sincronización de XSENS	74
Figura 79. Sincronización completada	74
Figura 80. Menú Recording Clear All.....	75
Figura 81. Menú Recording, Start Recording	76
Figura 82. Menú Recording Start Recording	77
Figura 83. Menú Inicio Plantillas Loadsol by Novel.....	79
Figura 84. Conexión plantillas Loadsol by Novel.....	79
Figura 85. Plantillas conectadas	80
Figura 86. Calibración plantilla derecha.....	80
Figura 87. Calibración plantilla izquierda	81
Figura 88. Grabación plantillas caminando.....	81
Figura 89. Guardado de datos.....	82
Figura 90. Grabación de pasos extraída a Excel	82
Figura 91. Menú inicio DEWESoft	85
Figura 92. Menú Channel DEWESoft.....	86
Figura 93. Gráfico TFP DEWESoft	87
Figura 94. Gráfico TFP Excel	88
Figura 95. Representación linealidad TFP	89



ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Ensayos plantillas Loadsol	20
Tabla 2. Repetición ensayos plantillas Loadsol con nueva configuración.....	21
Tabla 3. Promedio plantillas Loadsol individualmente y suma	28
Tabla 4. Corrección plantillas Loadsol individualmente y suma	28
Tabla 5. Disposición de XSENS por cuerpo.....	34
Tabla 6. Promedios y errores TFP DEWSoft	88

CAPÍTULO 1. Introducción y objetivos

1.1. Introducción

En el ámbito de la biomecánica y la investigación del movimiento humano, este estudio se sumerge en un análisis minucioso de las frecuencias de paso y los movimientos corporales durante las actividades de andar y correr. La elección de emplear los sofisticados sensores *XSENS* y las plantillas *Loadsol* aporta una dimensión adicional a nuestra capacidad de capturar datos precisos y tridimensionales, permitiendo una exploración más profunda de la complejidad de estas actividades físicas [1].

1.2. Antecedentes y motivación

Este proyecto se inscribe en una línea de investigación continua, donde trabajos previos [2] examinaron los patrones de presiones plantares durante la marcha sobre una cinta de correr usando plantillas instrumentales. A diferencia de estas investigaciones pasadas, la presente se distingue por la incorporación de los sensores *XSENS*, capaces de registrar cinemáticas como aceleraciones, velocidades angulares y ángulos de Euler. Destacando la constante búsqueda de enriquecer la comprensión de los movimientos corporales. La motivación subyacente radica en aprovechar las capacidades únicas de estos dispositivos para obtener una visión más completa y precisa de las actividades físicas.

1.3. Objetivos

Los objetivos fundamentales de este estudio abarcan diversas dimensiones cruciales en el ámbito de la biomecánica y la investigación del movimiento humano. En primer lugar, se propone llevar a cabo una calibración meticulosa de las unidades inerciales *XSENS* y las plantillas *Loadsol*. Esta fase esencial del estudio no solo garantiza la precisión de los datos recopilados, sino que también establece estándares rigurosos para la fiabilidad de los resultados, contribuyendo a la robustez y validez de la investigación [3].

En segundo lugar, se llevará a cabo la recolección y un análisis detallado de datos con el objetivo de identificar patrones específicos asociados a diferentes frecuencias de paso durante las actividades de andar y correr. Para a continuación en tercer y último lugar, examinar y comparar las diferencias individuales en la ejecución de las actividades de andar y correr, con lo que podremos obtener información valiosa para investigaciones

futuras en los campos de biomecánica y salud, destacando la importancia de considerar la variabilidad individual en el análisis de datos biomecánicos [4].

Como conclusión de los estudios realizados, se ha establecido 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.

CAPÍTULO 2. Instrumentación y calibración

En este capítulo, se examinará en detalle la instrumentación utilizada. Se describirán los instrumentos clave, como las unidades inerciales *XSENS*, las Plantillas *Loadsol*, junto con otros dispositivos relevantes. Se abordará específicamente la calibración de las unidades inerciales *XSENS* y la calibración de las plantillas *Loadsol*. Este análisis es crucial para comprender la metodología precisa y los estándares de calibración que respaldan la confiabilidad de los datos recopilados en la investigación.

2.1. Unidades inerciales XSENS

Las unidades inerciales *XSENS* son sensores de alta precisión diseñados para medir la aceleración lineal del cuerpo humano en tres dimensiones entre otras variables cinemáticas. Estos sensores inerciales, parte integral del sistema de captura de movimiento, proporcionan una representación cuantitativa y detallada de cómo cambia la velocidad de movimiento en diferentes direcciones.

Cada unidad inercial está equipada con un conjunto de acelerómetros triaxiales que permiten una medición precisa de la aceleración en los ejes x, y y z. Esta información es esencial para comprender cómo el cuerpo se acelera y desacelera durante el movimiento.

Estos dispositivos están diseñados ergonómicamente para ser colocados en puntos anatómicos clave del cuerpo, permitiendo una monitorización no intrusiva y natural de la marcha a diferentes frecuencias de paso. Al ser inalámbricos y permitir su conexión vía bluetooth a un dispositivo, nos permiten gran libertad de movimiento y eliminan la interferencia de cables, lo que facilita la obtención de datos en condiciones cercanas a la realidad.

La elevada frecuencia de muestreo de 120 Hz y la precisa sincronización temporal aseguran la obtención de datos confiables y de alta fidelidad. La integración de estos sensores con el software de análisis de *XSENS* posibilita una visualización detallada y un análisis exhaustivo de los patrones de movimiento, ofreciendo información significativa sobre las variaciones en la dinámica corporal en respuesta a diversas frecuencias de paso.

Estas unidades inerciales son una herramienta fundamental para el estudio de la biomecánica de la marcha, permitiendo una comprensión más profunda de cómo el cuerpo humano se adapta y responde a diferentes condiciones de movimiento. Su uso en este estudio proporciona una base sólida para el análisis y la interpretación de los

datos recopilados, contribuyendo significativamente a la comprensión de los patrones de movimiento humano.

Cuando adquieres un sistema de sensores de *XSENS* para la captura de movimiento, se recibe un conjunto completo de componentes diseñados para facilitar la configuración y el uso efectivo de los dispositivos. Se indica una descripción de lo que suele incluir un paquete típico al comprar sensores *XSENS* [5]:

- Sensores de *XSENS* (figura 1): Este es el componente central del sistema. Los sensores están diseñados para ser llevados por el usuario y contienen una combinación de acelerómetros, giroscopios y magnetómetros para medir la aceleración lineal, velocidad angular y orientación magnética.
- Base de Carga (*Docking Station*) (figura 1): La base de carga es un dispositivo que sirve para cargar y sincronizar los sensores. Permite la transferencia de datos desde los sensores al sistema de análisis y también recarga la batería de los sensores para su uso posterior.
- Correas y Sujeciones: Se incluyen correas y sujeciones diseñadas para asegurar los sensores en posiciones específicas del cuerpo, como las piernas, la cintura, el torso, etc. Esto es esencial para una colocación precisa y confiable de los sensores.
- Software de Captura y Análisis: Por lo general, se incluye el software necesario para configurar y operar los sensores, así como para visualizar y analizar los datos de movimiento capturados. Puede incluir software para la adquisición en tiempo real y software para análisis detallado.
- Documentación y Manuales: Se proporciona documentación detallada que incluye manuales de usuario, guías de instalación y cualquier otra información relevante para la configuración y operación de los sensores.
- Cables y Adaptadores: Es posible que se incluyan cables y adaptadores para conectar la base de carga a la computadora u otros dispositivos necesarios para la configuración y la transferencia de datos.



Figura 1. Sensores XSENS [6]

2.2. Plantillas *Loadsol*

Las plantillas *Loadsol* son dispositivos desarrollados por *Novel* para medir la carga y la distribución de la presión debajo de los pies durante la marcha y otras actividades. Estas plantillas vienen con sensores de presión incorporados que registran datos en tiempo real para proporcionar información detallada sobre la distribución del peso entre los pies.

Algunas de sus características son:

- **Sensores de Presión Integrados:** Las plantillas *Loadsol* están equipadas con una matriz de sensores de presión distribuidos estratégicamente a lo largo de la superficie de la plantilla. Estos sensores registran la presión ejercida en diferentes áreas del pie.
- **Medición en Tiempo Real:** Los sensores de las plantillas *Loadsol* proporcionan datos de presión en tiempo real, lo que permite el monitoreo continuo de la distribución de carga durante una actividad.
- **Inalámbricas:** Las plantillas *Loadsol* son inalámbricas, lo que significa que no hay cables que interfieran con la movilidad del usuario. Los datos pueden ser transmitidos de manera inalámbrica a un dispositivo de visualización o registro.
- **Recopilación de Datos de Alta Resolución:** Los sensores de presión en las plantillas *Loadsol* son capaces de capturar datos de alta resolución, lo que proporciona una representación detallada de cómo el peso se distribuye en cada pie.
- **Software de Análisis:** Novel ofrece *software* específico para el análisis de los datos recopilados con las plantillas *Loadsol*. Este software permite visualizar y

analizar la distribución de la presión en diferentes fases de la marcha y en diferentes condiciones.



Figura 2. Plantillas Loadsol by Novel [7]

En nuestro caso en el laboratorio se tienen plantillas de diferentes colores en función de la talla, en mi caso con una talla 43 las plantillas son color negro como las que se muestran en la figura 2 [7].

2.3. Otros instrumentos utilizados

-*Triangular force plate* TFP, esta báscula o *triangular force plate* TFP (figura 3 y 4) como se ha denominado en el laboratorio, es una base triangular de madera la cual tiene en su parte inferior acelerómetros.



Figura 3. TFP- Front face

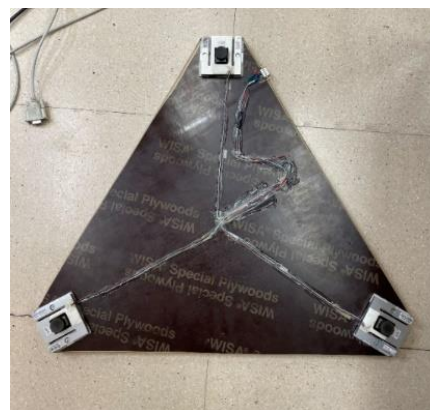


Figura 4. TFP- Back face

Conectaremos la TFP al ordenador y a través del programa *Dewesoft* se registrarán datos.

Como se verá más adelante será utilizada para calibrar las plantillas *Loadsol*.

- Acelerómetro piezoeléctrico, dispositivo sensor especializado en la medición precisa de la aceleración experimentada por un objeto, se empleará como un instrumento comparativo para la calibración de nuestras unidades inerciales *XSENS*. Esta herramienta nos permitirá evaluar con precisión las lecturas de aceleración y garantizar la fiabilidad y exactitud de los datos recopilados por las unidades inerciales durante el proceso de calibración.

- Metrónomo (figura 5), en este aparato se marca la frecuencia de paso y emite sonido a ese ritmo el cual seguimos con los pasos y así se puede seleccionar la frecuencia de paso.

Además, el metrónomo presenta una pinza a través de la cual te lo puedes enganchar en la ropa para no tener las manos ocupadas.



Figura 5. *Metrónomo*

-Zapatillas *Salomon XA PRO 3D* (figura 6), Este modelo de zapatillas el cual he utilizado están diseñadas para la marcha y el trail running. Ofrecen un buen agarre y estabilidad gracias a su suela. El ajuste es cómodo y seguro. Además, tienen una buena amortiguación y retorno de energía gracias a su tecnología. Por lo que era un calzado idóneo para nuestra toma de datos.



Figura 6. Zapatillas *Salomon XA PRO 3D* [8]

-Ordenador portátil, utilizado para extraer todos los datos de los diferentes dispositivos empleados y poder ejecutarlos a través de Excel. También utilizado para usar el programa Dewesoft con la TFP o para calibrar los sensores *Xsens*.

-Tablet del laboratorio, para usar el software de las plantillas *Loadsol*.

-Iphone 13, para usar el software de los sensores *XSENS*.

2.4. Calibración de las unidades inerciales *XSENS*

Para llevar a cabo la calibración de las unidades inerciales *XSENS* lo primero de todo será aprender el uso de estos explicado en el Anexo 1.

Una vez se hagan las mediciones es importante destacar que al descargar los datos en los excel a estos datos se les debe restar la acción de la gravedad para poder comparar estas aceleraciones con las que mide el acelerómetro piezo eléctrico que se usará más adelante, incapaz de medir aceleraciones constantes.

Para la **calibración de los sensores inerciales *XSENS*** se emplearán dos métodos diferentes:

Tipo 1 calibración. Calibración externa, comparación con acelerómetro piezoeléctrico.

La adquisición de datos del acelerómetro piezoeléctrico se realiza utilizando el programa *Sirius-DewesoftX*, como se ilustra en la figura 7. Estos datos son luego contrastados y comparados con los proporcionados por las unidades inerciales *XSENS*, estableciendo

así una metodología de evaluación que implica la verificación y correlación entre las mediciones de ambos dispositivos para garantizar la coherencia y la fiabilidad de los resultados obtenidos.



Figura 7. Tarjetas de adquisición de datos. Modelo SIRIUS by DEWESoft [9]

Se ha llevado a cabo la disposición de acelerómetros piezoeléctricos y sensores XSENS sobre el dispositivo denominado "Shaker" en el laboratorio, como se muestra en la figura 8 y en la figura 9. Este aparato, conocido como "Shaker", permite la generación controlada de vibraciones.



Figura 8. Shaker y XSENS



Figura 9. Shaker con XSENS y acelerómetro piezoeléctrico

En esta configuración experimental, cada sensor XSENS fue alineado unidireccionalmente para permitir la captura de datos a lo largo de un eje específico. Se seleccionó un eje de cada sensor para su posterior comparación con los registros del

acelerómetro piezoeléctrico. El movimiento inducido por el "Shaker" se caracterizó por una vibración vertical, lo que implicó que cada XSENS registrara datos únicamente en el eje al que fue orientado.

En la figura 10, se detallan las orientaciones de los ejes en los XSENS, indicando cómo se dispusieron para la medición. A pesar de que se esperaba que cada sensor midiera únicamente en un eje, los otros dos ejes también registraron datos mínimos debido a las vibraciones generadas durante el movimiento vibratorio vertical. Como resultado, fue necesario realizar un filtrado posterior de los datos para seleccionar únicamente aquellos de relevancia para la comparación, asegurando así la precisión en la evaluación de los XSENS.



Figura 10. XSENS [6]

La grabación de datos mediante los sensores XSENS se realiza meticulosamente, conforme a las directrices establecidas en el anexo 1 adjunto. Este procedimiento se lleva a cabo de manera simultánea con la grabación de datos de los acelerómetros piezoeléctricos, siguiendo los protocolos previamente indicados. Este enfoque paralelo requiere un postproceso para sincronizar y poder realizar la comparación a partir de la cual se establecerá el procedimiento de calibración.

Los datos obtenidos de los acelerómetros piezoeléctricos y de los sensores XSENS constituyen información la cual requiere una manipulación detallada para llevar a cabo la calibración y comparación necesaria. Este proceso se realiza mediante el empleo de herramientas como es Microsoft Excel, que permiten realizar ajustes y transformaciones en los datos brutos para lograr la coherencia y homogeneidad requeridas en la fase de análisis.

La calibración específica entre un acelerómetro piezoeléctrico y un acelerómetro XSENS implica la corrección de posibles desviaciones y la alineación de las lecturas de ambos dispositivos. La aplicación de técnicas de manipulación de datos en *Excel* facilita este proceso, permitiendo la creación de un marco de referencia común para las mediciones realizadas con ambos tipos de sensores.

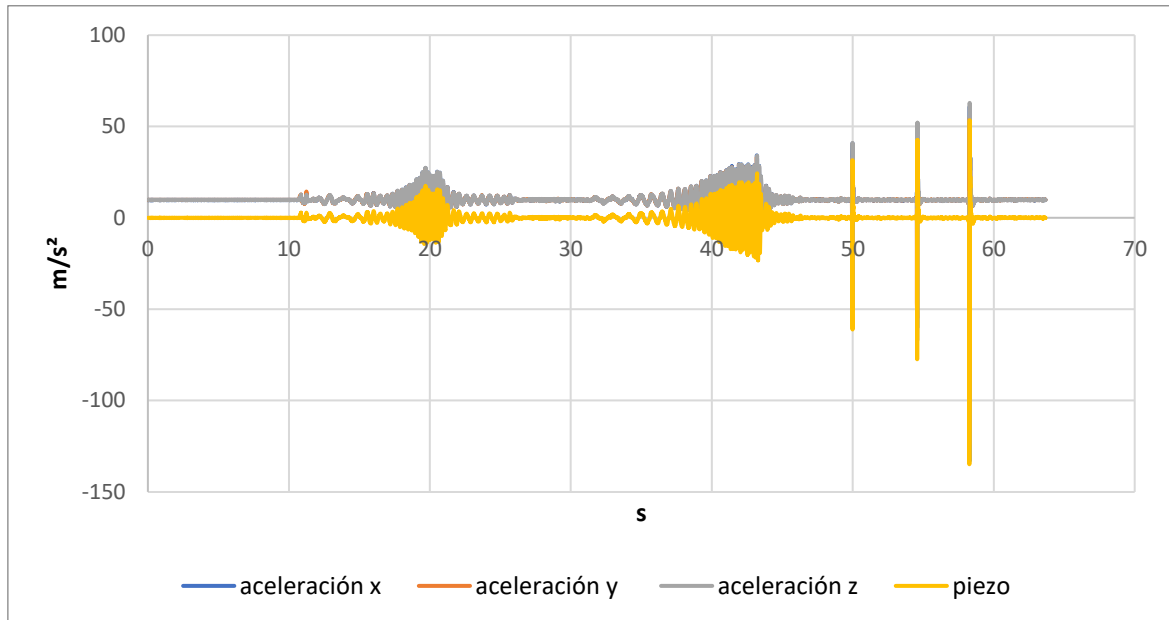


Figura 11. Comparación XSENS y piezoeléctrico vista general previa calibración externa.

En la representación gráfica en Microsoft Excel (figura 11) se puede observar como el acelerómetro piezoeléctrico muestra los datos excluyendo la acción de la gravedad $9,81 \text{ m/s}^2$ por el contrario los sensores XSENS, sí la tienen en cuenta por lo que se tiene que eliminar. Para llevar a cabo esta filtración se eliminó de los datos de los sensores XSENS la media de la gravedad, obteniendo así lo que se puede observar en la figura 12:

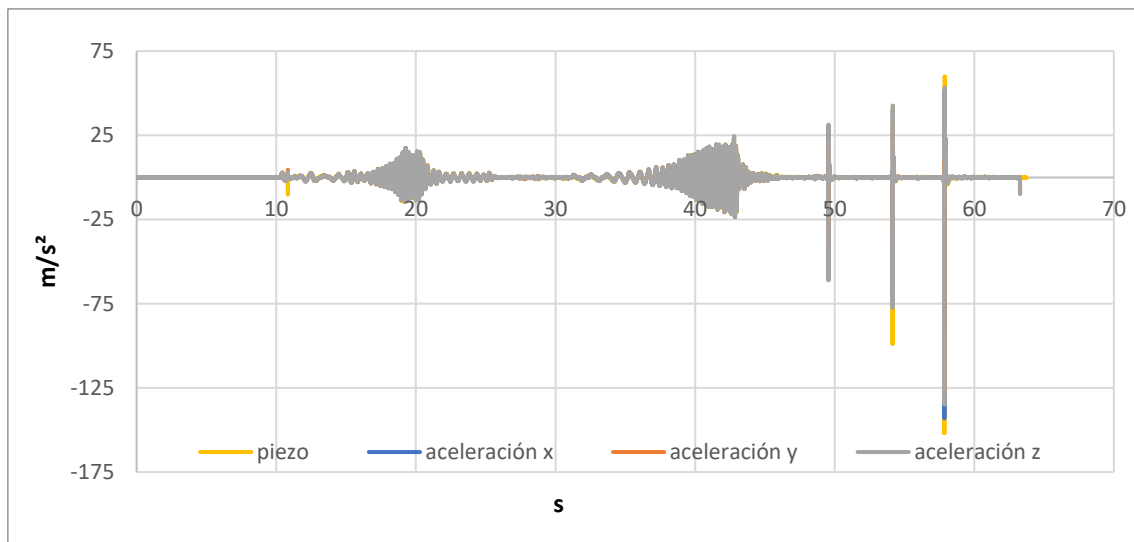


Figura 12. Comparación XSENS y piezoeléctrico eliminada acción de la gravedad

Una observación más detallada de las zonas específicas donde se generan vibraciones permite identificar fenómenos de interés. En este contexto, la ampliación de las secciones pertinentes del gráfico proporciona una visión más minuciosa y reveladora. La precisión y sensibilidad de los sensores XSENS se manifiestan claramente, destacando su capacidad para registrar con agudeza las variaciones en la intensidad de las vibraciones inducidas por el "shaker".

Este análisis específico de las zonas de vibración contribuye a la comprensión más profunda de las capacidades de los sensores, evidenciando su respuesta diferencial a distintos niveles de excitación mecánica. Los resultados obtenidos de esta evaluación destacan la importancia de buscar similitudes entre las curvas de los tres sensores XSENS y la del acelerómetro piezoeléctrico, utilizado como referencia. La congruencia en las respuestas de los sensores XSENS con la del acelerómetro piezoeléctrico consolida la confiabilidad de los datos capturados en este estudio y respalda la eficacia de los sensores XSENS al proporcionar mediciones precisas en comparación con la referencia establecida por el acelerómetro piezoeléctrico.

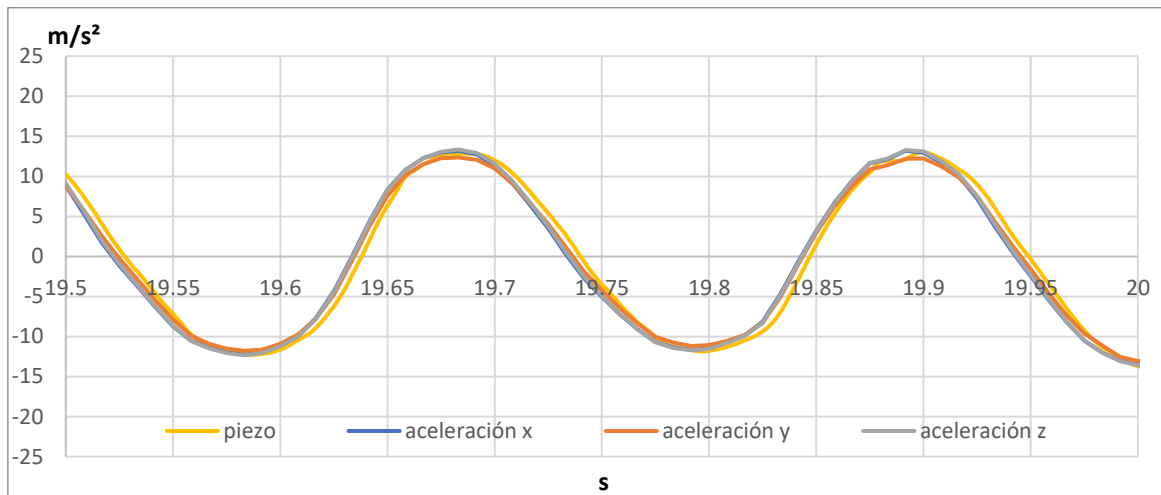


Figura 13. Comparación XSENS y piezoeléctrico previa sincronización.

En la figura 13, se destaca que los tres sensores XSENS, específicamente asignados a los ejes X, Y y Z respectivamente, no exhiben una coincidencia precisa en sus respuestas. Esta discrepancia señala la necesidad de llevar a cabo un proceso de sincronización a fin de optimizar la concordancia entre dichos sensores. En virtud de este requerimiento, se llevará a cabo una sincronización manual que implica la eliminación selectiva de datos del eje X.

Este procedimiento tiene como objetivo principal lograr una alineación más ajustada y uniforme de las distintas curvas generadas por los sensores XSENS. En consecuencia, se espera que, tras la implementación de esta sincronización, se alcance una mayor coherencia y correspondencia entre las respuestas de los sensores, proporcionando así una base de datos más precisa y fiable.

Para ilustrar visualmente los efectos de esta sincronización, se presenta la figura 14, que exhibe las curvas ajustadas después de esta. Este enfoque es una medida crucial para mejorar la calidad y confiabilidad de los datos recopilados durante el estudio, garantizando la coherencia y precisión de las mediciones realizadas por los sensores XSENS en este entorno experimental específico.

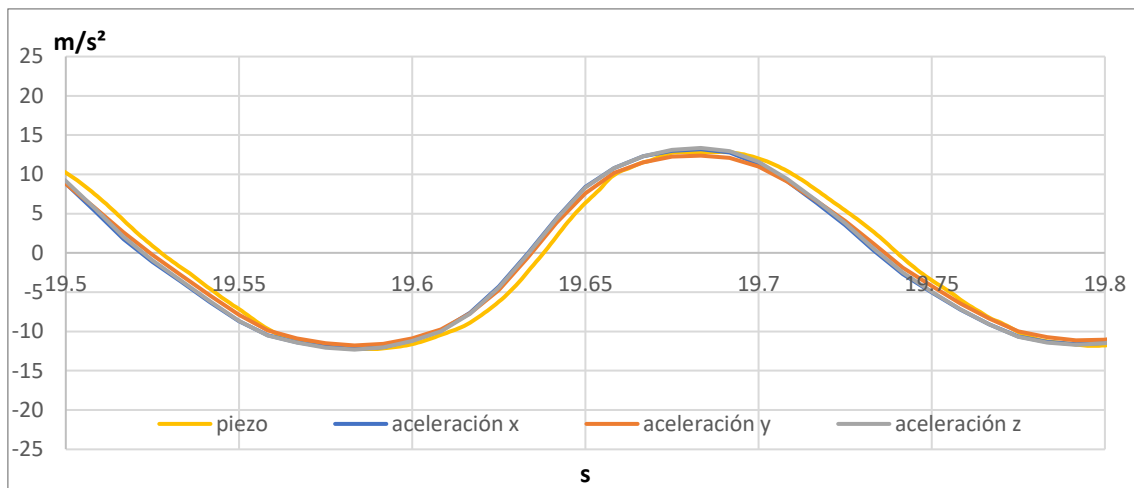


Figura 14. Comparación XSENS y piezoeléctrico post sincronización.

En la figura 14, se aprecian las distintas curvas generadas por los cuatro acelerómetros, siendo uno de ellos el piezoeléctrico y los otros tres correspondientes a los sensores XSENS dispuestos en los ejes X, Y y Z. Se destaca que, si bien estas curvas no coinciden de manera exacta, se evidencia un margen de error bastante reducido.

Es fundamental señalar que, se busca lograr una concordancia precisa con el acelerómetro piezoeléctrico, que se sabe con certeza que mide de manera sumamente exacta, se podría llevar a cabo un procedimiento de calibración mediante resampleo. No obstante, en el contexto de este trabajo de fin de grado, dicho procedimiento no ha sido implementado.

Esta elección metodológica se sustenta en la naturaleza del estudio y los objetivos establecidos, priorizando la evaluación de las capacidades intrínsecas de los sensores XSENS en condiciones reales sin realizar ajustes que podrían introducir errores o alterar la fidelidad de los datos recopilados.

En conclusión, al examinar el procedimiento implementado y los resultados obtenidos, se evidencia que no ha sido necesaria la ejecución de un proceso de calibración. La obtención de resultados altamente precisos se ha logrado mediante la exclusión del promedio de la gravedad y una subsiguiente sincronización. Estos resultados exhiben una notable precisión en comparación con el acelerómetro piezoeléctrico empleado como punto de referencia.

Tipo 2 calibración. Calibración interna.

La realización de esta calibración interna prescindió de la utilización de acelerómetros adicionales, empleando exclusivamente los sensores XSENS disponibles. Se dispusieron

tres de estas unidades inerciales sobre dos piezas elaboradas mediante impresión 3D, fabricadas in situ en el laboratorio utilizando la impresora disponible en dicho entorno (figura 15). Cada acelerómetro fue posicionado en una dirección específica, permitiendo así la comparación de los distintos ejes en función de su orientación (figura 16). Este enfoque autocalibrado proporciona una evaluación interna de la precisión y consistencia de los sensores XSENS sin depender de elementos externos.



Figura 15. Montaje XSENS para calibración interna.



Figura 16. Montaje XSENS para calibración interna.

Con el objetivo de garantizar una unión segura entre estas piezas, se rodearon con cinta adhesiva para asegurar la integridad estructural durante los movimientos realizados (figura 17). Este paso adicional se llevó a cabo con el propósito de prevenir cualquier desmontaje no deseado durante las maniobras de calibración, asegurando la estabilidad y consistencia de la configuración experimental.



Figura 17. Montaje XSENS para calibración interna endurecido con cinta adhesiva.

Prosiguiendo con la experimentación, cada movimiento realizado durante la calibración interna se ejecutó con minuciosidad, permitiendo a los sensores XSENS responder a las variaciones en la dirección vertical. La elección de realizar movimientos manuales añade complejidad al proceso, ya que la ejecución humana introduce matices que no están presentes en la calibración externa con el "shaker".

Dada la ausencia de un sistema electrónico externo para controlar y guiar los movimientos, la variabilidad inherente a la naturaleza humana implica un mayor número de datos con posibles imprecisiones. Este desafío se aborda mediante un riguroso proceso de filtrado de datos, donde se aplican criterios específicos para asegurar la validez y precisión de la información recopilada.

Una vez obtenidos los datos de los sensores XSENS durante la experimentación manual, se procede a una fase crítica de filtrado. Este paso implica la ponderación de los valores obtenidos y la eliminación del promedio de la gravedad, que se estableció en 9.81 m/s^2 . La meticulosa atención a estos detalles asegura que los datos subsiguientes reflejen con precisión las aceleraciones específicas en los ejes X, Y y Z.

Con los datos ya procesados, se procede a la integración de las aceleraciones correspondientes a cada eje de los XSENS según su disposición. Este proceso permite crear representaciones gráficas que ofrecen una visión detallada de la respuesta de los sensores en diferentes direcciones. Estas representaciones no solo proporcionan información valiosa sobre la capacidad de los XSENS para capturar movimientos en condiciones más variables, sino que también contribuyen a la robustez y confiabilidad de los datos utilizados en este estudio.

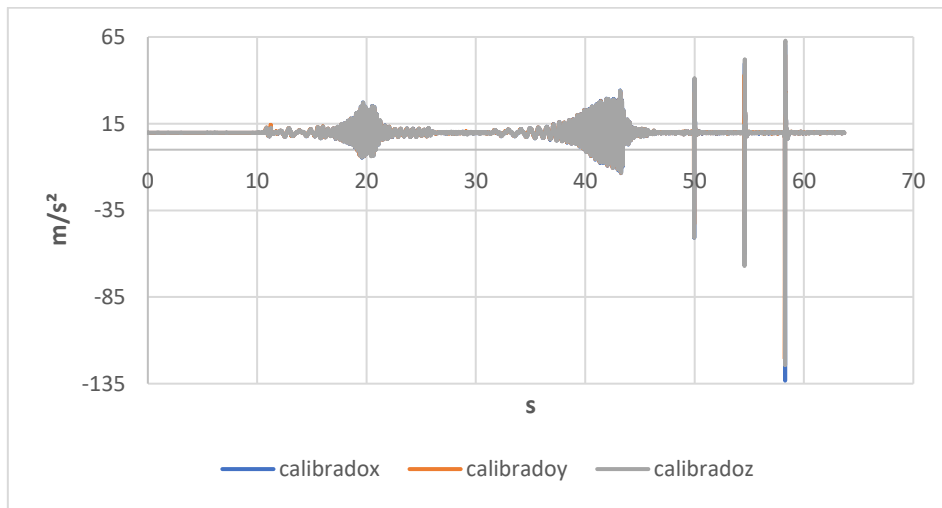


Figura 18. Calibración interna XSENS

Al examinar detenidamente el inicio de la figura 18, cuando los XSENS permanecían estáticos, obtenemos información crucial sobre su estabilidad en condiciones de reposo. Esta fase inicial nos permite evaluar la capacidad de los sensores para mantener lecturas precisas sin aceleraciones externas. Analizar esta parte de la gráfica proporciona información sobre la sensibilidad de los XSENS incluso en momentos estáticos, esencial para entender su respuesta en diversas condiciones.

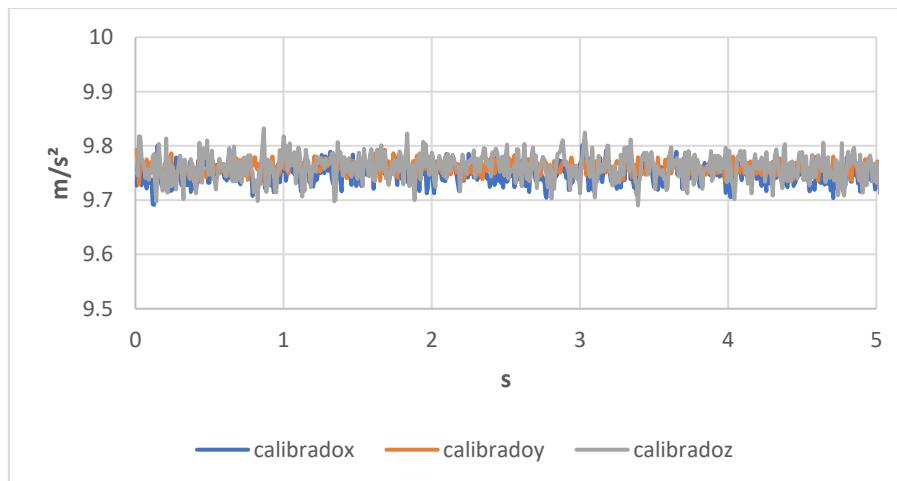


Figura 19. Discrepancias previa calibración interna XSENS

La discrepancia entre las aceleraciones registradas (figura 19) por los XSENS en los ejes X, Y y Z revela la necesidad de una calibración precisa. En este contexto, el ajuste se

realiza moviendo la gráfica en el eje X, para lo cual se lleva a cabo una sincronización a través de la eliminación selectiva de datos. Una estrategia clave en este proceso consiste en identificar los máximos en la gráfica y garantizar su coincidencia para los tres XSENS en las direcciones X, Y y Z. Este enfoque asegura una alineación adecuada y corrige las variaciones observadas en las mediciones, optimizando así la confiabilidad de los datos.

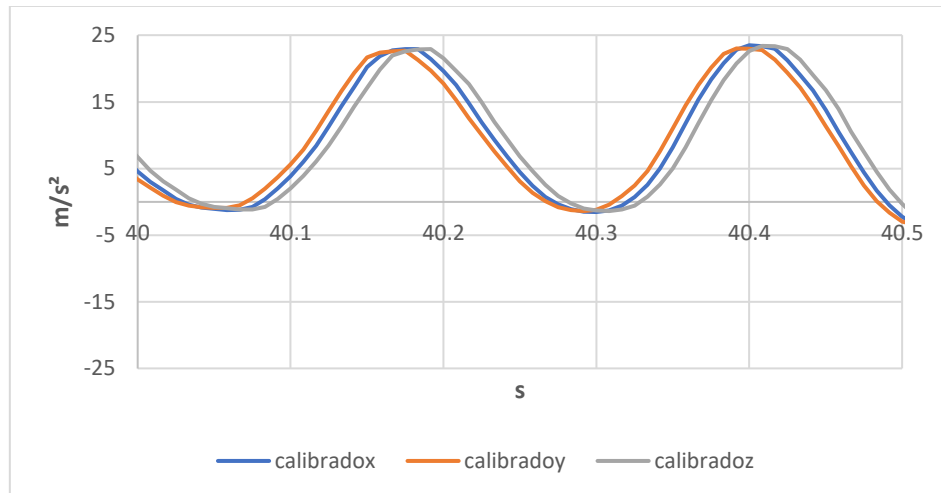


Figura 20. Calibración interna XSENS previa sincronización.

En la figura 20, se evidencia claramente el desfase que se busca corregir mediante el proceso de sincronización. Para llevar a cabo esta corrección, se tomará como referencia la curva más adelantada, identificada en este caso por el tono naranja, correspondiente al XSENS cuyo eje Y apunta hacia arriba. En el proceso, se elimina un dato del XSENS cuyo eje X se orienta verticalmente hacia arriba, y dos datos para el XSENS relacionado con el eje Z. Este procedimiento meticuloso resulta en la obtención de una nueva gráfica, donde los tres XSENS se encuentran perfectamente calibrados y sincronizados, logrando así una superposición precisa de las tres curvas. Este procedimiento contribuye significativamente a la coherencia y exactitud de las mediciones realizadas por los sensores.

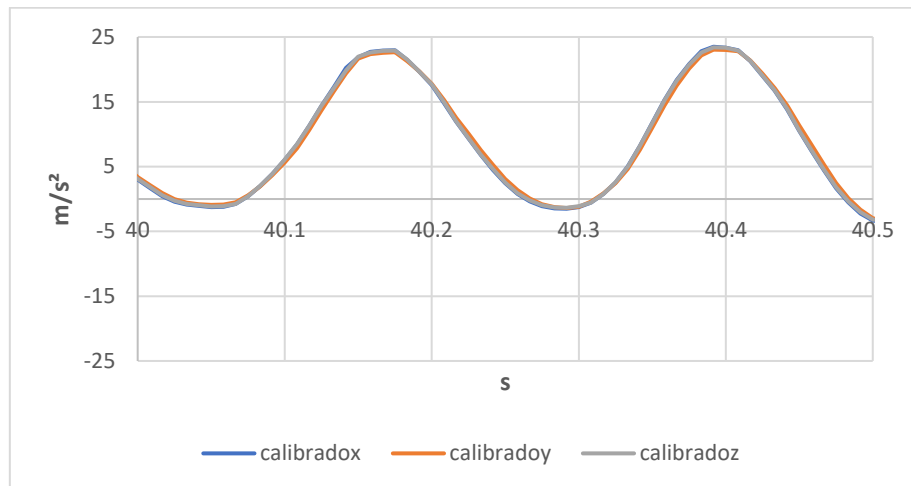


Figura 21. Calibración interna XSENS post-sincronización.

En la observación detallada de esta figura 21, queda patente que las aceleraciones registradas en cada uno de los ejes, al ejecutar un mismo movimiento vertical, son prácticamente idénticas. Este fenómeno indica que todas las unidades inerciales XSENS miden de manera uniforme y consistente cuando se sincronizan entre sí.

Para concluir, al igual que en el proceso de calibración externa, los sensores XSENS no requieren un procedimiento de calibración, sino más bien una sincronización entre ellos para realizar mediciones simultáneas. Esta sincronización, como se explicó anteriormente, se lleva a cabo de forma manual mediante la eliminación selectiva de datos.

2.5. Calibración de las plantillas Loadsol

Tenemos dos tipos de calibración, la que se denomina calibración externa y la interna.

Tipo 1 calibración, calibración externa.

En el marco de la calibración externa, se procede a ajustar las plantillas Loadsol utilizando la TFP (*Triangular Force Plate*) como referencia, descrito en el anexo 3 de este documento.

Durante cinco ensayos a una frecuencia de muestreo de 100 Hz, las plantillas y la TFP registraron datos simultáneos. Para asegurar la coherencia en la grabación, se colocaron las plantillas en los zapatos utilizados para el ensayo y se encendieron, estableciendo la conexión Bluetooth con la tablet.

Configurados ambos dispositivos, se llevó a cabo la calibración de las plantillas mediante el botón 'Zero'. La secuencia de movimientos para cada ensayo consistió en subir a la

TFP con el pie derecho apoyado y el izquierdo en el aire, luego apoyar el pie izquierdo para tener ambos pies apoyados, y finalmente levantar el pie derecho para cargar todo el peso en el izquierdo.

Esta secuencia se repitió en cinco ensayos distintos. Posteriormente, a través de Excel, se compararon las fuerzas registradas por las plantillas en cada pie con las registradas por la TFP, la cual se considera precisa y sirve como punto de referencia. Calculando el error cometido por cada pie en cada ensayo, se evaluó la exactitud de las plantillas y se procedió a corregir cualquier desviación identificada.

Los resultados hallados en estos 5 ensayos fueron los que se observan en la tabla 1:

Tabla 1. Ensayos plantillas Loadsol

Ensayos	Primero	Segundo	Tercero	Cuarto	Quinto
Pie derecho $Ed = \frac{d}{\bar{X}}$	0.52%	1.07%	0.86%	-0.52%	4.95%
Pie izquierdo $Ei = \frac{i}{\bar{X}}$	6.72%	6.98%	8.83%	6.27%	4.06%

Los resultados obtenidos siguen la lógica esperada, alineándose con las indicaciones del fabricante de las plantillas, que establece un error máximo del 10%. En todos los casos analizados, las mediciones de las plantillas muestran valores inferiores a los de la TFP, que sirve como referencia, excepto para el pie derecho en el cuarto ensayo. En este último caso, el signo negativo indica que la plantilla ha registrado una magnitud superior a la TFP, nuestra referencia.

Para corregir estos desajustes, se propone aplicar un factor correctivo en función del error porcentual. En situaciones donde la plantilla registra un valor inferior a la TFP, se sugiere multiplicar por la relación correspondiente.

Al observar las discrepancias identificadas en los errores previos, consideré que la metodología de calibración, donde se aplicó la función Zero al inicio del primer ensayo y se mantuvo sucesivamente en los ensayos posteriores, podría estar influyendo en los resultados. Con el objetivo de validar esta hipótesis, decidí realizar una nueva calibración donde la función Zero se aplicará antes de cada uno de los cinco ensayos consecutivos.

Los resultados obtenidos de esta nueva configuración fueron los siguientes (tabla 2):

Tabla 2. Repetición ensayos plantillas Loadsol con nueva configuración

Ensayos	Primero	Segundo	Tercero	Cuarto	Quinto
Pie derecho $Ed = \frac{d}{\bar{X}}$	-0.19%	2.91%	3.74%	4.96%	1.58%
Pie izquierdo $Ei = \frac{i}{\bar{X}}$	10.79%	8.60%	7.66%	9.79%	9.72%

Los resultados evidencian que la aplicación de la función Zero antes de cada ensayo no ha contribuido a una reducción significativa de los errores, e incluso, en algunos casos, ha superado el límite del 10% establecido por el fabricante.

Para profundizar aún más en nuestro objetivo de perfeccionar la coherencia entre las mediciones de las plantillas y la TFP, se avanzó hacia una estrategia adicional. En esta fase, se realizó un análisis gráfico mediante el uso de herramientas avanzadas proporcionadas por Excel. Esta aproximación gráfica se permitirá comparar las curvas de fuerza generadas por las plantillas y la TFP, proporcionando una perspectiva visual detallada de las divergencias que permitirá refinar aún más la corrección de las mediciones.

A través de este enfoque, se busca no solo optimizar la alineación de las mediciones, sino también comprender de manera más completa las variaciones y patrones específicos que puedan influir en la precisión de las plantillas.

En la primera etapa de nuestro análisis, se dedicó a comparar detalladamente los datos recopilados de cada plantilla, tanto la correspondiente al pie izquierdo como al pie derecho, con los datos precisos proporcionados por la TFP (*Triangular Force Plate*), que se estableció como nuestra referencia.

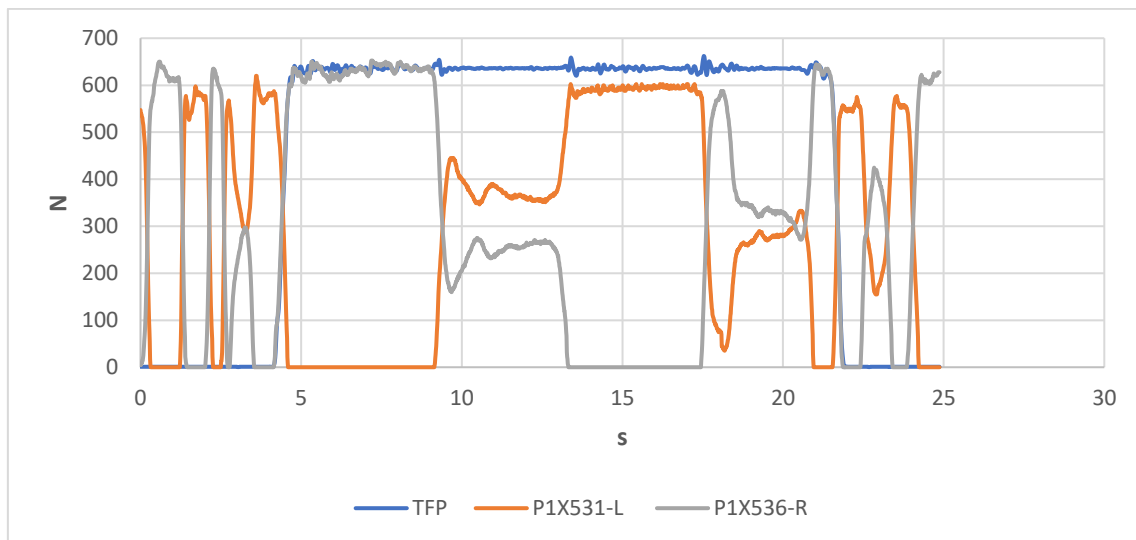


Figura 22. Gráfico TFP-Plantillas

En el análisis inicial de la figura 22 que exhibe los datos en bruto, se pueden distinguir las diversas curvas de fuerza asociadas a cada plantilla. La plantilla del pie izquierdo, identificada como P1X531-L y representada en color naranja, se contrasta con la plantilla del pie derecho, P1X536-R, destacada en azul. Aunque a simple vista estas observaciones pueden presentar limitaciones, se ha optado por incluir una cuarta curva, obtenida mediante la suma de los datos de fuerza de ambos pies. Esta adición visualiza el peso total soportado por ambas plantillas, proporcionando una perspectiva más integral al análisis.

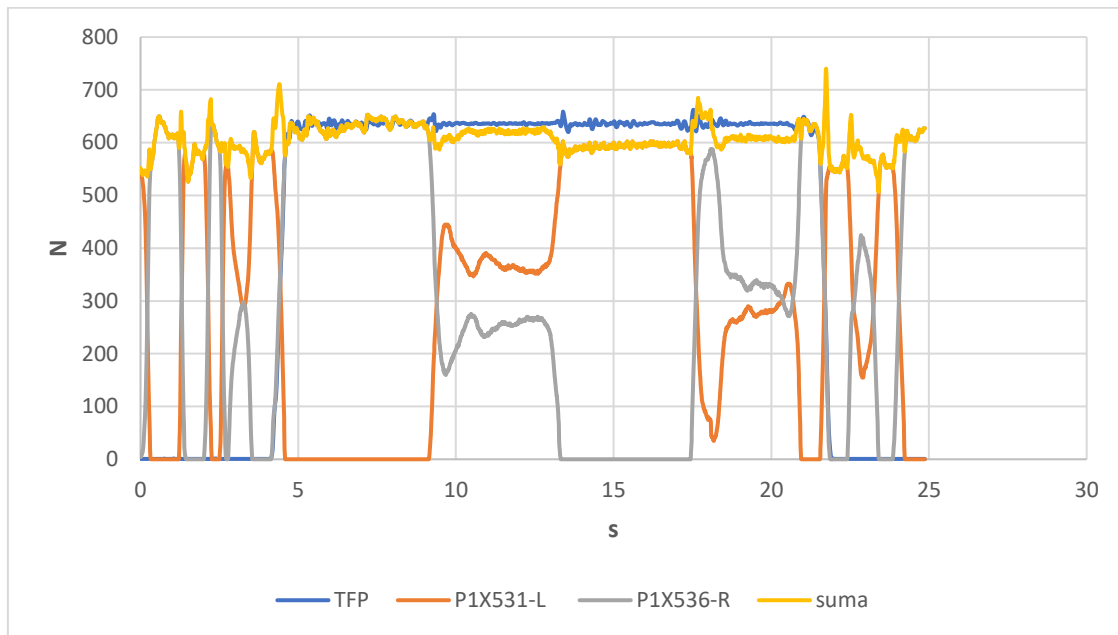


Figura 23. Gráfico TFP- Plantillas- Suma

En esta figura 23, se evidencia una notoria concordancia entre la fuerza registrada por el conjunto de las plantillas y la TFP. La alineación de estas curvas indica una consistencia en las mediciones de fuerza, respaldando la calidad y precisión de las plantillas en comparación con la referencia de la TFP.

En busca de una mayor precisión, volviendo a un análisis más detallado de cada plantilla de forma individual, se destaca un periodo específico entre los segundos 5 y 10, donde la curva correspondiente a la plantilla del pie izquierdo (representada en color naranja) muestra una ausencia de fuerza, indicando un momento en el que el pie izquierdo se mantuvo en el aire. En este intervalo, toda la carga se registra en la plantilla derecha (curva gris). De manera similar, alrededor del segundo 13, se produce un cambio de pie, reflejado por la falta de fuerza en la plantilla derecha, ya que toda la carga recae en la plantilla izquierda.

Además, al enfocarnos en los períodos en los que se registra fuerza en un solo pie, se espera que la fuerza marcada por cada plantilla individual coincida tanto con la suma de ambas plantillas como con la TFP que se está utilizando como referencia. Este alineamiento entre las curvas representativas de cada plantilla y la TFP constituye un indicador clave en la búsqueda de una calibración precisa y confiable.

Centrándonos en este tramo (figura 24) en el que la fuerza recae sobre la plantilla derecha vemos como la diferencia entre ambas curvas es mínima.

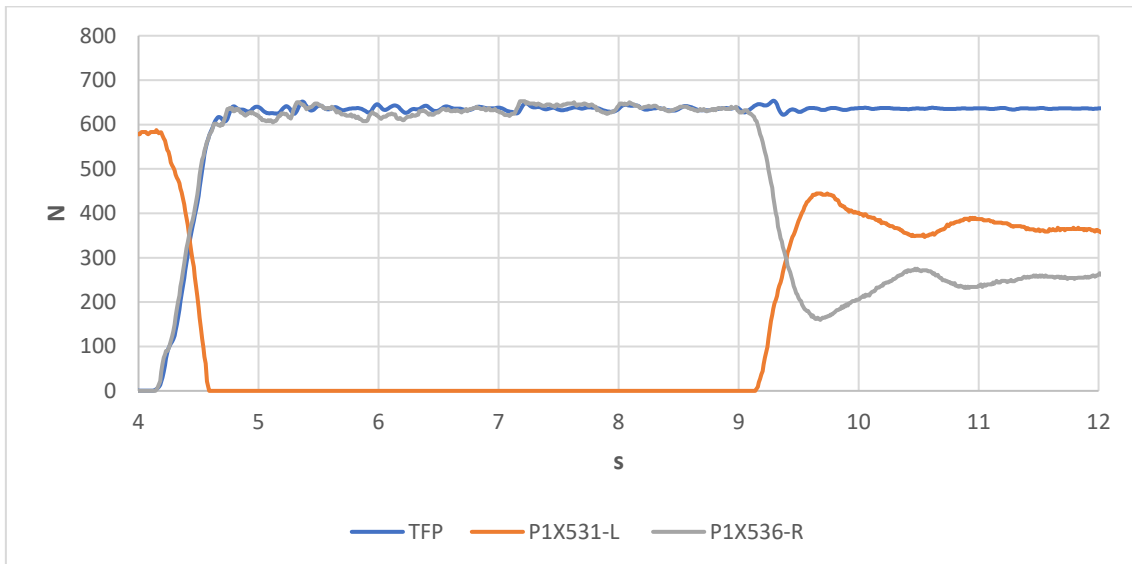


Figura 24. Gráfico TFP- plantillas zona inicial

Pero si, por el contrario, nos fijamos en la parte donde la fuerza la soporta la plantilla izquierda vemos una notable diferencia (figura 25).

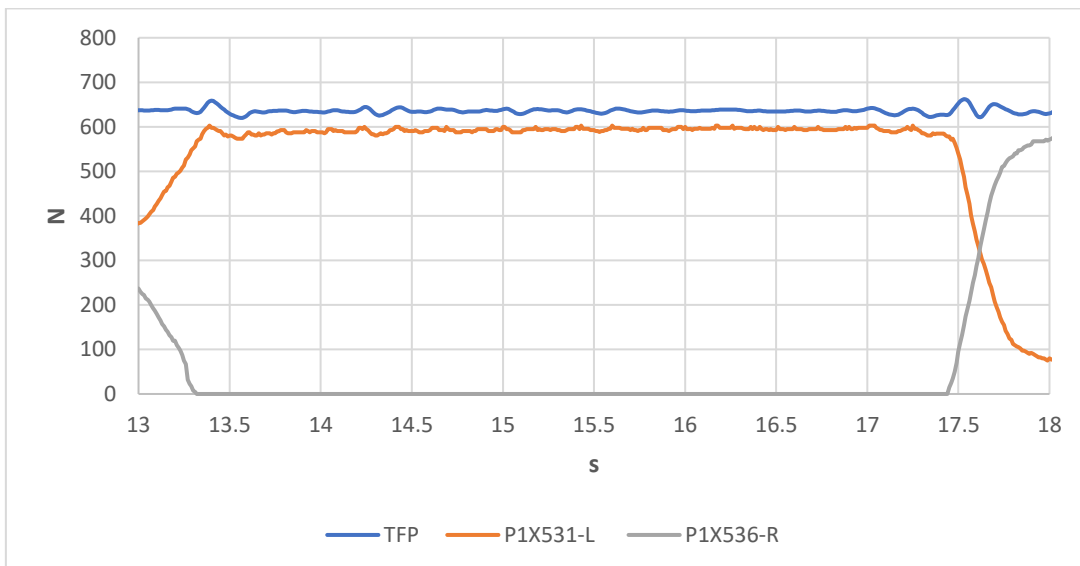


Figura 25. Gráfico TFP- Plantillas zona central

En primera instancia, se calculó el promedio de la fuerza registrada por la TFP, que se tomó como nuestra referencia principal. A continuación, se procedió a calcular el promedio de la fuerza para cada una de las plantillas de forma individual.

La fase de corrección, o calibración, implica determinar el factor por el cual se debe multiplicar las fuerzas registradas por las plantillas derecha e izquierda. Para encontrar este factor, se utilizó como referencia el promedio de la TFP y se dividió por el promedio de cada una de las plantillas en cada caso específico.

Una vez que se haya encontrado estos factores, se multiplicará cada valor registrado por las plantillas por su correspondiente factor de corrección. Este proceso proporcionará los valores de las plantillas calibradas, los cuales estarán ajustados para reflejar de manera más precisa las fuerzas reales que soportan, que deberán ser igual a la de referencia.

PLANTILLA	FACTOR DE CORRECCIÓN
DERECHA (GRIS)	$d*(1+Ed) = 1.00064214$
IZQUIERDA (NARANJA)	$i*(1+Ei) = 1.070065722$

Se observa como obviamente el factor de corrección será mayor para la plantilla izquierda que para la derecha debido a tener un mayor con respecto a la TFP tomada como referencia. En la siguiente figura 26, se muestra la coincidencia de ambos pies con la TFP de manera muy precisa post calibración lo que indica que el procedimiento seguido es correcto.

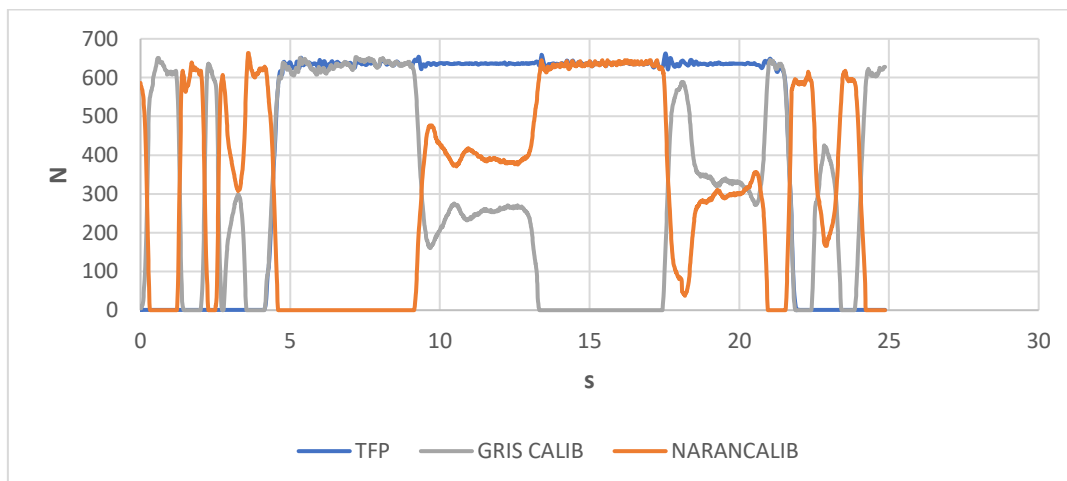


Figura 26. Gráfico TFP- Plantillas Post calibración

Al examinar en detalle las áreas específicas previamente examinadas, como se evidencia en la figura 27 a continuación, se destacan niveles de precisión notables para la plantilla derecha. Cabe destacar que, incluso antes de llevar a cabo la corrección, los resultados iniciales ya exhibían un desempeño satisfactorio en este pie, pero el procedimiento de calibración que se propone es sistemático, por lo que se emplea sea o no necesario.

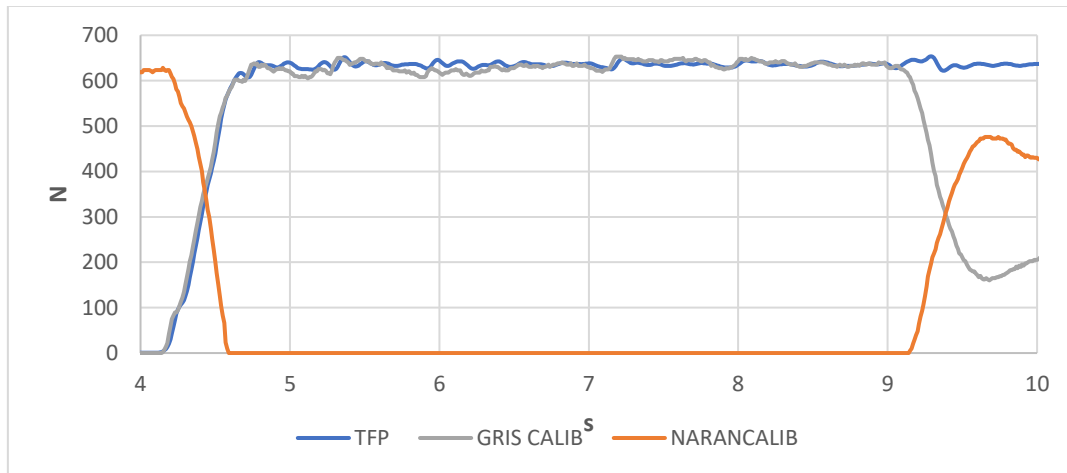


Figura 27. Gráfico TFP- Plantillas Post calibración zona inicial

En la sección relativa a la plantilla izquierda, donde inicialmente se identificó un error más pronunciado, la corrección aplicada ha resultado en una notoria mejora en la precisión. Los datos ahora exhiben una coincidencia significativa, demostrando la efectividad del proceso de calibración implementado (figura 28).

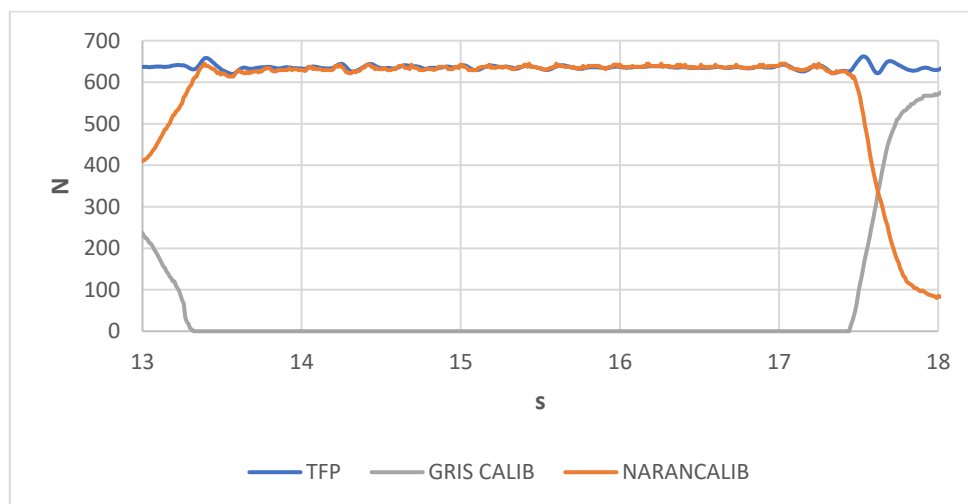


Figura 28. Gráfico TFP- Plantillas Post calibración zona central

Si además se toma como la suma de ambas plantillas los datos ya calibrados se obtendrá lo siguiente (figura 29):

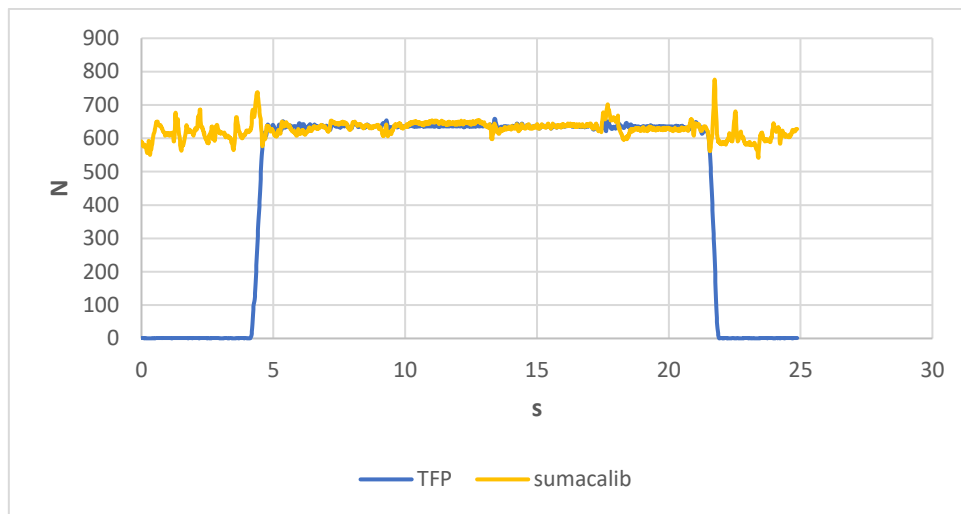


Figura 29. *TFP- Suma Plantillas Post calibración*

La conclusión de la calibración externa se fundamenta en una evaluación exhaustiva que abarcó tanto un análisis matemático inicial como una comparación gráfica detallada. Inicialmente, se realizaron ajustes matemáticos para corregir los errores observados en los datos brutos de las plantillas en relación con la TFP. Esta aproximación matemática proporcionó una base sólida para comprender las discrepancias iniciales y establecer una corrección precisa.

Posteriormente, la comparación gráfica permitió visualizar con mayor claridad la convergencia entre las curvas de fuerza de las plantillas y la TFP. Este enfoque gráfico no solo reforzó la validez de los ajustes matemáticos realizados, sino que también proporcionó una representación visual impactante de la mejora en la precisión lograda mediante el proceso de calibración. En conjunto, ambas estrategias han contribuido de manera integral a la validación y optimización de las mediciones de las plantillas.

Tipo 2 calibración, calibración interna.

La calibración interna o, como se denominó, auto calibración. Este proceso intrínseco adquiere una importancia destacada al considerar situaciones en las que no se dispone de elementos externos para realizar comparaciones directas. En esta etapa, se realizará

una evaluación de la coherencia y precisión de las mediciones entre las propias plantillas *Loadsol*.

En primer lugar, al igual que en la calibración externa se tiene una calibración aplicando expresiones matemáticas.

Para ello se coge uno de los cinco ensayos realizados con anterioridad a través de las plantillas con conexión a la tablet, la fuerza marcada por el pie derecho cuando el izquierdo está en el aire a la cual se llamó “d” y la fuerza marcada por el pie izquierdo cuando el derecho está en el aire a la que se llamará “i”. Se hallará el promedio de estos dos datos y con ello el error respecto a este promedio de cada pie E_d y E_i .

Tabla 3. Promedio plantillas *Loadsol* individualmente y suma

Pie derecho (d)	Pie izquierdo(i)	Promedio $\bar{x} = \frac{\sum x_m \cdot n_i}{n}$	Error pie derecho (Ed) $E_d = \frac{d}{\bar{X}}$	Error pie izquierdo (Ei) $E_i = \frac{i}{\bar{X}}$
630.293623N	579.53 N	604.91 N	-4.19%	4.19%

La autocorrección consistirá en lo siguiente (tabla 4):

Tabla 4. Corrección plantillas *Loadsol* individualmente y suma

Formula de corrección	$d \cdot (1 + E_d)$	$i \cdot (1 + E_i)$
Fuerza corregida	603.84 N	603.84 N

Vemos como aplicando esta autocorrección se demuestra que ambos pies ejercen la misma fuerza, donde esta fuerza debería ser el peso del sujeto de estudio, en este caso el propio autor.

La calibración interna de las plantillas *Loadsol by Novel* también se aborda de manera gráfica, empleando las representaciones visuales generadas en Excel. Este enfoque proporciona una perspectiva visual detallada de las diferencias y similitudes entre las fuerzas registradas por cada plantilla.

La representación gráfica de los datos de las plantillas en bruto es la siguiente (figura 30):

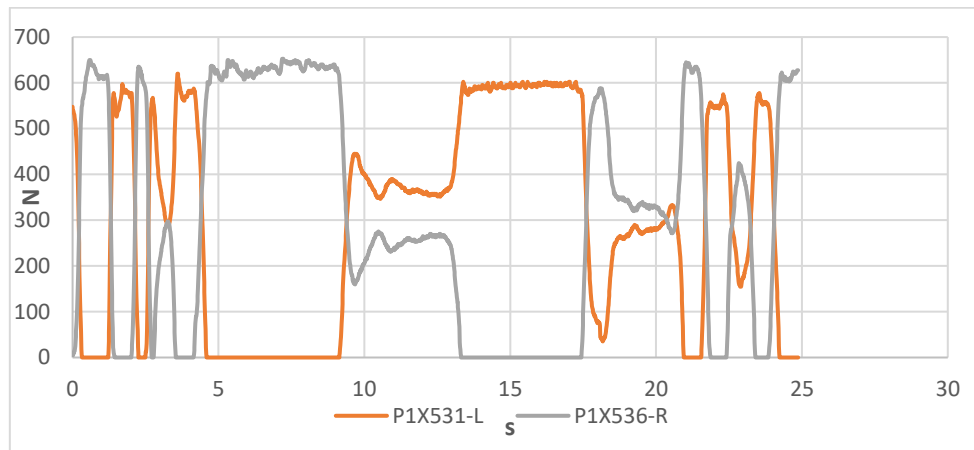


Figura 30. Calibración Interna Plantillas Loadsol

En el análisis gráfico de las plantillas *Loadsol*, las curvas P1X531-L (naranja) y P1X536-R (gris) representan respectivamente las plantillas del pie izquierdo y derecho. Se observa una discrepancia en la zona entre 5 y 10 segundos, donde la plantilla derecha (gris) muestra un máximo al soportar todo el peso, mientras que, entre 12 y 17 segundos, este máximo lo presenta la plantilla izquierda (naranja), que sostiene el peso en este período. Estos máximos no toman los mismos valores, el propósito de la calibración es corregir estas discrepancias.

La figura 31 gráfica de la suma de los registros de ambas plantillas, es decir, la fuerza total, constituye un elemento de considerable relevancia en la calibración interna. En el siguiente gráfico, se observa la forma característica de esta curva, proporcionando una visualización clara de la interacción y distribución de la fuerza entre ambas plantillas.

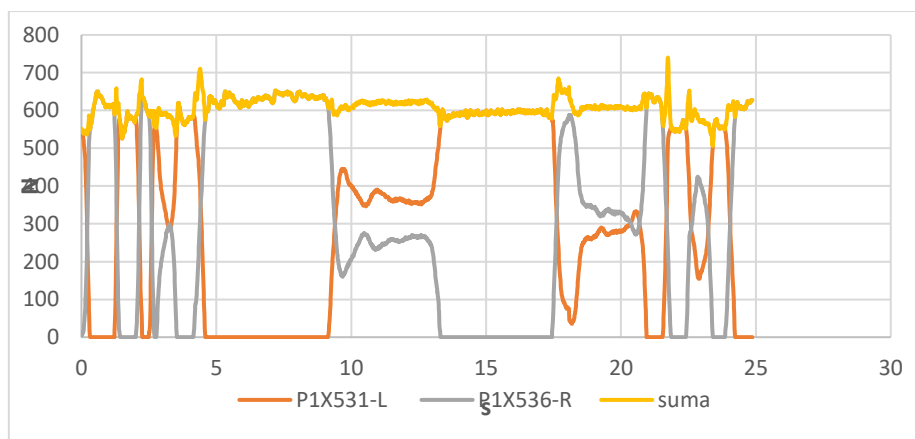


Figura 31. Calibración Interna Plantillas Loadsol

Para llevar a cabo la calibración interna que se busca, se llevará a cabo un enfoque análogo al empleado en la calibración externa, se procederá a calcular promedios tanto de las fuerzas individuales de cada plantilla como de los promedios obtenidos, es decir se sumará los promedios de las plantillas individuales y se dividirá entre dos, estableciendo así una referencia. Este promedio servirá como base para determinar un factor de corrección, mediante el cual se multiplicarán los valores de fuerza registrados por las plantillas obteniéndose así los valores de fuerza corregidos internamente.

Al representar las plantillas de manera individual, ya se puede observar un gran cambio respecto a la situación inicial previa al calibrado, como se observa en la figura 32:

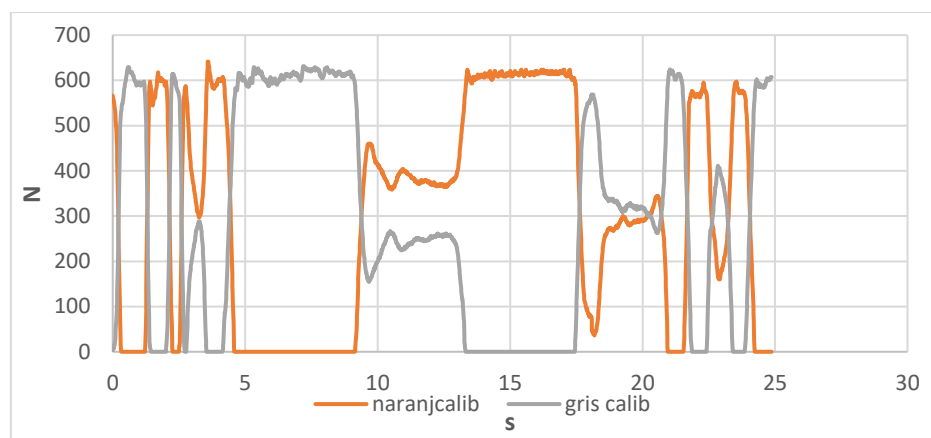


Figura 32. *Calibración Interna Plantillas Loadsol Post Calibración*

La comparativa con la suma de ambas plantillas ya calibradas revela un resultado notable en la figura 33. En momentos específicos, cuando solo una de las plantillas está activa (pata coja), se destaca la coincidencia exacta entre la fuerza registrada por la planta del pie correspondiente y la fuerza total medida por la suma de ambas plantillas calibradas.

Este nivel de precisión y alineación entre las curvas subraya la eficacia de la calibración interna, destacando su capacidad para corregir discrepancias y garantizar una respuesta coherente.

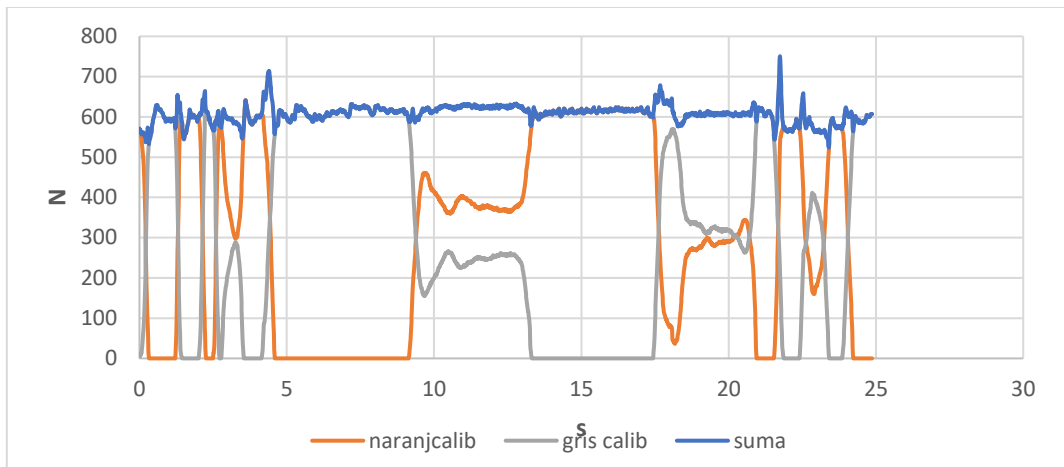


Figura 33. Calibración Interna Plantillas Loadsol-Suma Post Calibración

Este análisis de la calibración interna, sin depender de elementos externos, confirma la capacidad de obtener resultados altamente precisos. Los datos obtenidos a través de esta auto calibración demuestran la eficacia de corregir las discrepancias entre las fuerzas registradas por cada plantilla, proporcionando resultados coherentes y confiables.

Este enfoque, que se basa en la comparación y corrección de los datos de las plantillas entre sí, destaca la importancia de una calibración interna para garantizar mediciones precisas. Estos resultados positivos sientan las bases para una mayor confianza en la calidad y coherencia de los datos recopilados durante el estudio.

CAPÍTULO 3. Metodología

En el marco de este Trabajo de Fin de Grado, el autor, de estatura aproximada de 1,85 m y un peso de 63 kg, se dispuso a explorar las relaciones entre las frecuencias de paso y los movimientos corporales en función de diferentes niveles de actividad física. Para garantizar la precisión y confiabilidad de los datos recopilados, se consideró esencial **establecer una base detallada de parámetros biométricos** de interés.

Entre estos parámetros, se incluyen las mediciones de **altura y peso**, fundamentales para proporcionar un contexto físico del sujeto de estudio. Con una estatura de 1,85 m y un peso de 63 kg, el investigador se caracteriza por una constitución física que, si bien sugiere una complexión relativamente delgada, brinda una perspectiva relevante para la interpretación de los resultados.

Además de estas mediciones, se evaluaron otros factores de influencia en el desempeño físico, tales como **el número de pie, el género y el tipo de calzado** utilizado durante las mediciones. El investigador en este caso de estudio calza una talla 43 y género masculino, además se usó las zapatillas Salomon XA PRO 3D, un modelo especialmente diseñado para la práctica de marcha y trail running. Estas zapatillas, reconocidas por su destacado agarre y estabilidad proporcionados por su suela especializada, ofrecen un ajuste cómodo y seguro. Asimismo, su tecnología de amortiguación y retorno de energía aporta un elemento esencial para la precisión de las mediciones, contribuyendo significativamente a la idoneidad del calzado seleccionado para la toma de datos.

Es importante destacar que estos datos han sido seleccionados específicamente para el investigador, con el propósito de crear una base de datos que refleje sus características individuales. No obstante, se previó una ampliación de esta base de datos a través de la inclusión de otros sujetos en futuras fases de investigación. Este aspecto será abordado con mayor profundidad en el apartado de "Recomendaciones y Trabajo Futuro", donde se explorarán las implicaciones y el potencial de expansión de la base de datos.

Otro parámetro de gran importancia en este estudio es la **disposición** estratégica de los **sensores XSENS** en el cuerpo del investigador como se puede observar en la figura 38. Estos dispositivos, conocidos por su capacidad para capturar con precisión los movimientos tridimensionales del cuerpo humano, se dispusieron de manera meticulosa para garantizar una representación fiel de los patrones de movimiento durante las actividades físicas analizadas.

Cada sensor XSENS ha sido colocado con precisión en puntos anatómicos específicos del cuerpo (tabla 5), permitiendo así la captura detallada de los movimientos en los ejes X Y y Z.

Tabla 5. Disposición de XSENS por cuerpo

LOCALIZACIÓN	SENSOR XSENS
Tobillo derecho	XSENS B1
Tobillo izquierdo	XSENS B2
Rodilla derecha	XSENS B3
Rodilla izquierda	XSENS B4
Cadera, lado derecho	XSENS B5
Cadera, lado izquierdo	XSENS B6
Barriga	XSENS B7
Cabeza	XSENS B8

Se debe destacar que la orientación del eje X en dirección vertical en todos los sensores proporciona una referencia consistente para analizar los datos de movimiento. Esta uniformidad en la orientación de los sensores (figura 34) es crucial para asegurar la precisión y confiabilidad de las mediciones a lo largo del estudio.

Entre las diferentes mediciones a diversas frecuencias, los sensores XSENS no se retiraron. Esta decisión se tomó con el fin de evitar que la posición de los sensores influyera en los datos recopilados, asegurando así la consistencia y fiabilidad de las mediciones a lo largo del estudio.



Figura 34. Disposición XSENS en el cuerpo del investigador

Con el objetivo de asegurar un ritmo constante y, por ende, una precisión óptima durante la toma de datos, se empleó un metrónomo digital como herramienta fundamental (figura 5). Este dispositivo emite señales auditivas en intervalos regulares, brindando así una guía precisa para el ritmo de cada tipo de zancada.

Esta meticulosa planificación del ritmo de zancada a través del uso del metrónomo digital se considera esencial para garantizar la uniformidad en la ejecución de cada tipo de zancada. Esta uniformidad, a su vez, contribuyó significativamente a la precisión y coherencia de los datos recopilados, sentando así las bases para un análisis exhaustivo y confiable.

Una vez marcados estos parámetros de descripción del sujeto a estudio y marcadas las condiciones y características de disposición y manipulación de los dispositivos se puede llevar a cabo una descripción minuciosa de la metodología empleada.

La metodología empleada en las mediciones se inicia con la completa disposición del equipo necesario, los sensores *XSENS* estratégicamente ubicados en distintas partes del cuerpo y las plantillas *Loadsol* instaladas en las zapatillas seleccionadas. Este proceso se llevó a cabo en un lugar espacioso y donde se pueda seguir una línea recta en nuestro caso el salón de la sede de la escuela, ubicado en Paseo del Cauce, que proporciona un tramo extenso para realizar los paseos.

El primer paso crítico es la sincronización de los sensores *XSENS* entre sí, según las pautas detalladas en el Anexo 1 adjunto. Simultáneamente, se realizó la calibración de las plantillas *Loadsol*, siguiendo las especificaciones del fabricante. Esta calibración implica levantar cada pie individualmente durante unos segundos, estableciendo una referencia precisa para las mediciones subsiguientes.

Con sensores calibrados y sincronizados, se procedió a realizar mediciones de las actividades de andar. Primero de todo se pusieron en modo grabación los dos softwares en sus correspondientes equipos, en mi caso la Tablet y el iPhone, se esperó unos 5 segundos antes de comenzar a andar y posterior a estos 5 segundos antes de iniciar el paseo, se ejecutó un golpe con los talones, marcando el inicio de la sesión, lo cual también se realizó al finalizar el paseo para marcar el fin de este. Este golpe inicial y final es fundamental para verificar la sincronización adecuada de los sensores, garantizando que el impulso inicial esté alineado con el cierre del paseo. En caso de desincronización, se implementa un proceso de resamplado para corregir cualquier disparidad temporal.

Al concluir la medición después del golpe de talón final, se detuvieron ambos programas de registro, y los datos resultantes se transfirieron para su análisis en software especializado, como en nuestro caso Excel. Este enfoque facilitó la posterior evaluación de los datos y su presentación gráfica para un análisis más detallado.

Es esencial destacar que, debido a la disposición meticulosa y ajustada de las plantillas en las zapatillas, se minimizó la posibilidad de movimientos no deseados durante la actividad física. Sin embargo, se llevaron a cabo múltiples mediciones a diferentes frecuencias, incorporando el golpe inicial con talones, para verificar la estabilidad de las plantillas y detectar posibles desplazamientos.

En el siguiente flujograma se representa la metodología seguida:



CAPÍTULO 4. Procesado de datos

4.1. Registros, andando.

La ejecución de las mediciones de paseos, esencial para la recopilación de datos, se llevó a cabo con precisión. Para explorar las variaciones en las frecuencias de paso y los movimientos corporales durante la actividad de andar, se realizaron paseos a frecuencias específicas: 90, 100, 110, 120, 130 y 140 rpm, siguiendo las indicaciones del metrónomo digital.

La robustez y precisión de las mediciones se fortalecieron mediante la repetición de cada paseo a diferentes frecuencias. Cada configuración de frecuencia, desde 90 hasta 140 rpm, se sometió a un riguroso protocolo de cuatro repeticiones. Este enfoque sistemático permitió abordar posibles variabilidades y errores, asegurando la consistencia y fiabilidad de los datos recopilados.

El escenario elegido para estas mediciones fue el salón del sótano de la escuela, proporcionando un espacio amplio y lineal. El procedimiento detallado en el Capítulo 3 se siguió meticulosamente, asegurando la correcta disposición del equipo, incluyendo sensores *XSENS* y plantillas *Loadsol*, en el cuerpo y las zapatillas.

Cada sesión comenzó con el montaje y verificación del equipo, seguido de la sincronización de los sensores *XSENS* y la calibración de las plantillas *Loadsol*. Con el equipo listo, se realizaron paseos a las frecuencias establecidas, guiados por el metrónomo. Durante cada paseo, se registraron datos biomecánicos para análisis posterior, centrándose en el golpe de talón inicial como marcador temporal.

Estas mediciones proporcionarán una comprensión profunda de los patrones de movimiento biomecánico durante la actividad de andar, contribuyendo a la investigación en curso.

Con el propósito de realizar un análisis detallado, se seleccionó uno de los paseos, específicamente el realizado a 90 rpm, el cual demostró ser consistentemente efectivo en los resultados obtenidos. Este paseo se eligió como ejemplo representativo, sobre el cual se aplicaron las sincronizaciones necesarias. Es importante destacar que, dado que la calibración ha sido previamente ejecutada, siguiendo los protocolos establecidos en las fases de calibración interna y externa de las plantillas *loadsol* y de los *XSENS*, no fue necesario llevar a cabo un proceso adicional de calibración en esta etapa.

Se enfocó en los datos de este paseo a 90 rpm, se procedió al análisis y sincronización simultánea de cada sensor del cuerpo con las plantillas.

Antes de proceder con la representación gráfica de los sensores *XSENS*, se observa en el gráfico de las plantillas *Loadsol*, como se muestra en la figura 35, el marcado golpe de talón que se realizó al inicio y al final de la experimentación para delimitar el comienzo y el final de esta.

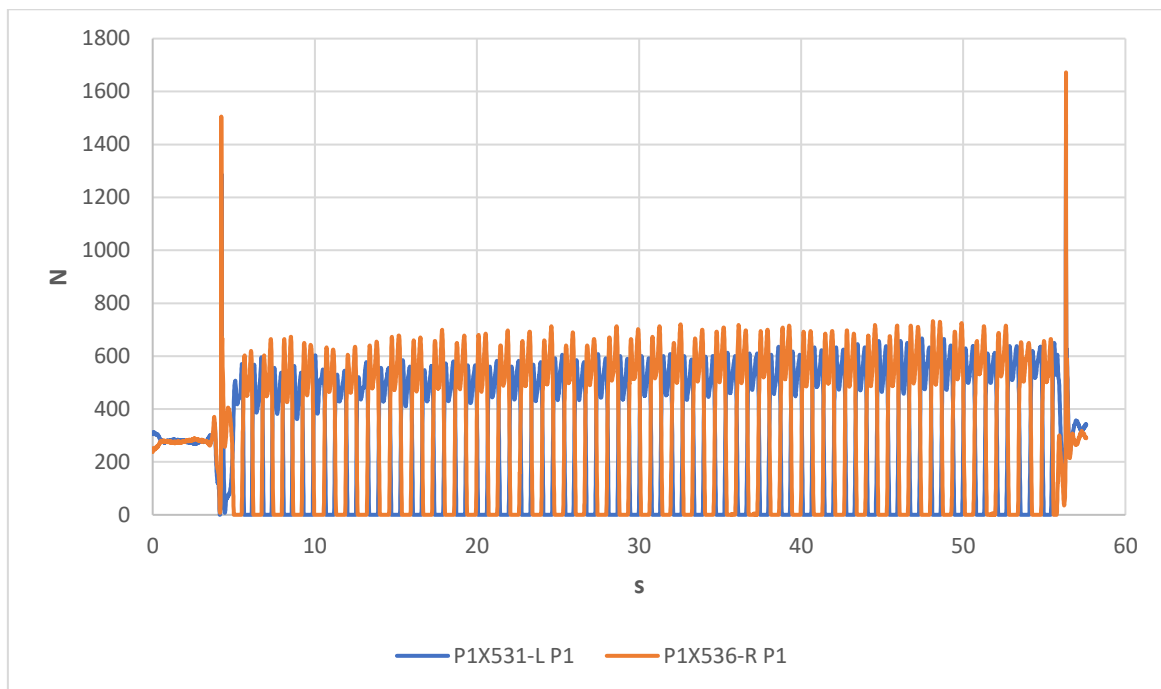


Figura 35. Representación Plantillas en paseo a baja frecuencia

Se inicia el análisis con el *XSENS* B7, ubicado en la región abdominal, dado que este sensor proporciona información crucial para nuestro estudio. En la figura 36, correspondiente a este *XSENS* de la zona abdominal, se puede observar claramente el golpe de talón inicial y final.

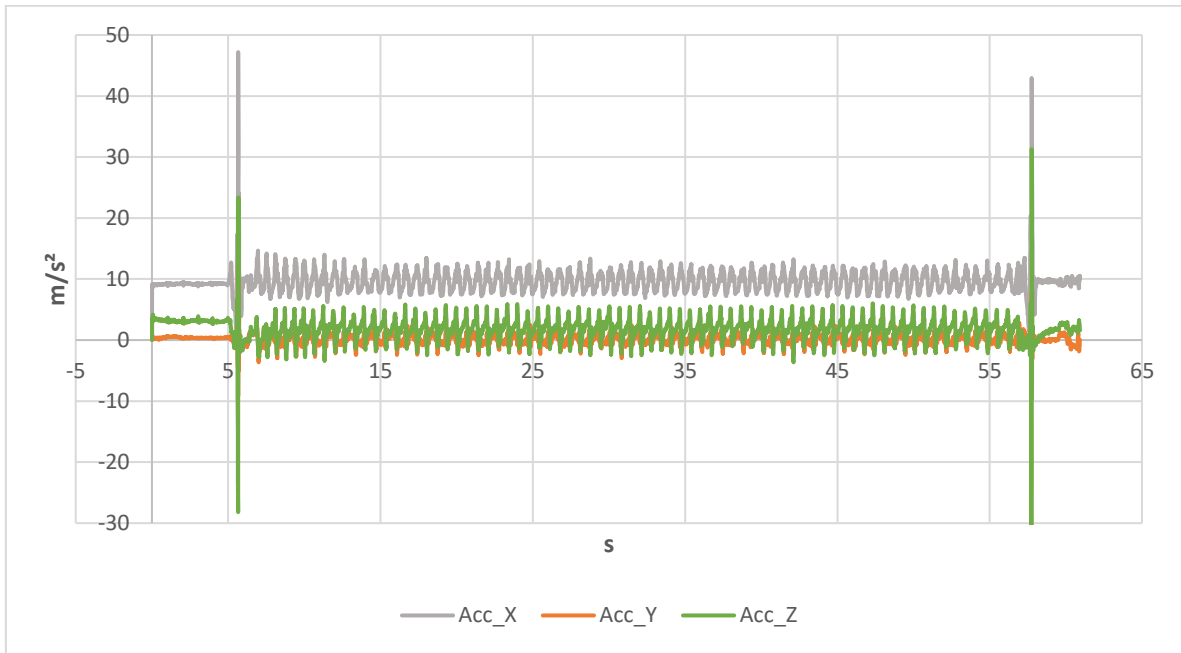


Figura 36. Gráfico XSENS B7

Después de integrar los datos de las plantillas *Loadsol* con los del sensor XSENS abdominal B7, se obtiene el siguiente resultado (figura 37):

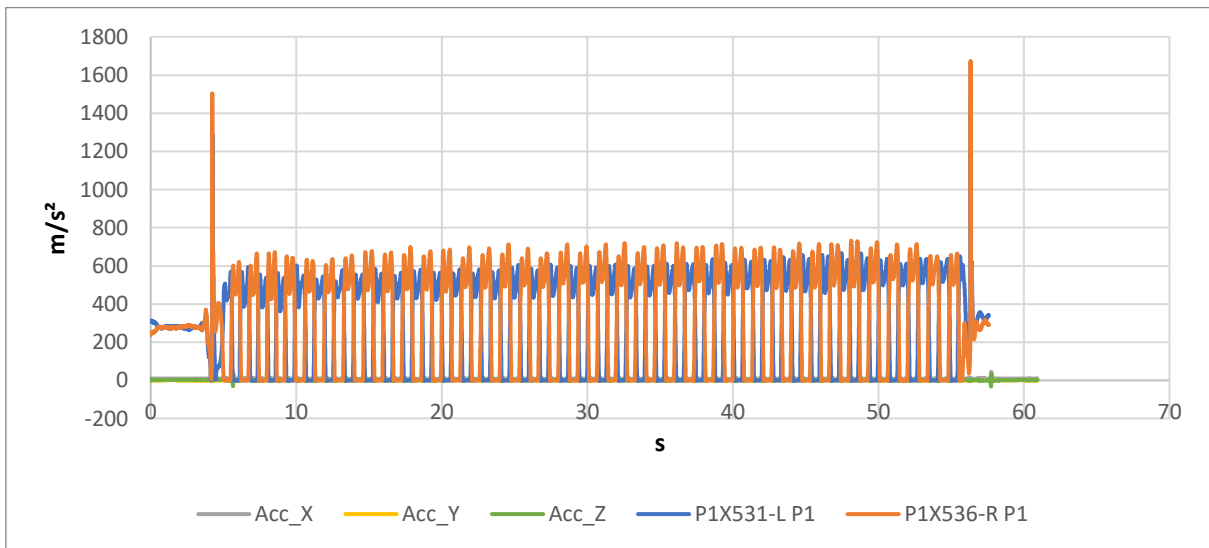


Figura 37. Representación Plantillas- XSENS B7

Como se puede observar inicialmente, la visualización de los datos es limitada. Para mejorar esto, es necesario establecer un eje secundario para las plantillas *Loadsol*. Al realizar esta configuración (figura 38), aparecerá un eje en la parte derecha que corresponderá a las plantillas y un eje en el lado izquierdo que representará al *XSENS B7*.

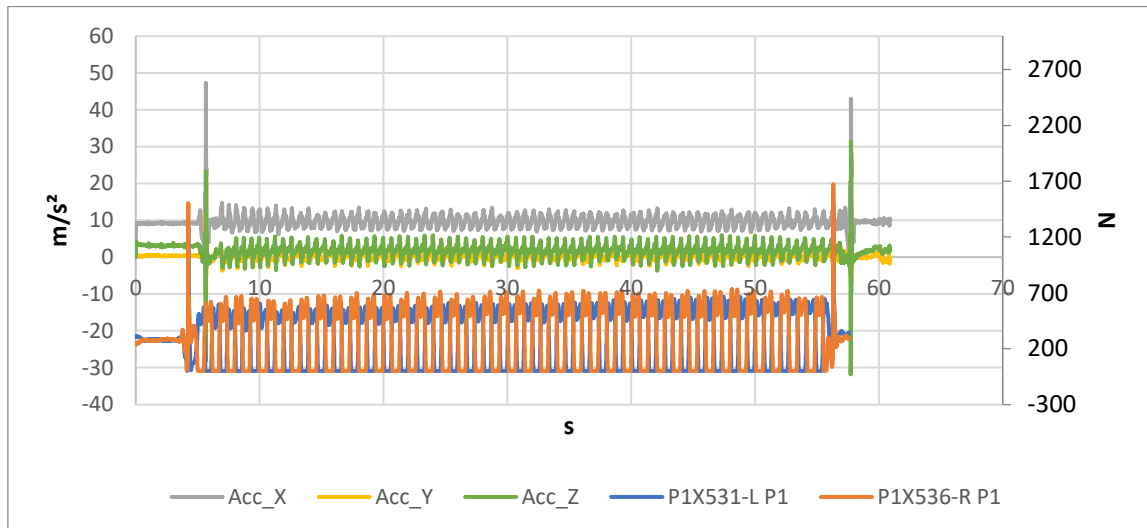


Figura 38. Representación Plantillas- XSENS B7

Después de realizar este ajuste, se obtiene una visualización más clara de los datos. Sin embargo, se observa que los picos marcados por el golpe de talón inicial y final no coinciden entre las plantillas y el *XSENS B7*. Para corregir esta discrepancia, se lleva a cabo una sincronización eliminando datos (figura 39), específicamente de los *XSENS*, con el objetivo de adelantarlos en el eje de las X (tiempo).

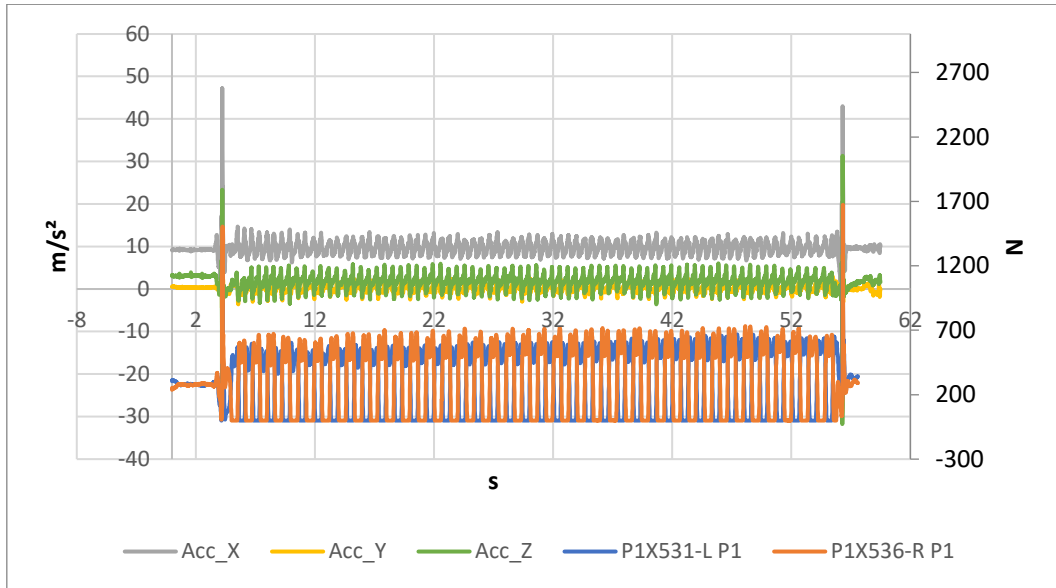


Figura 39. Representación Plantillas- XSENS B7 Post Sincronización

Posterior a esta sincronización, se puede observar un ajuste significativo en el inicio de los paseos, como se muestra en la figura 40:

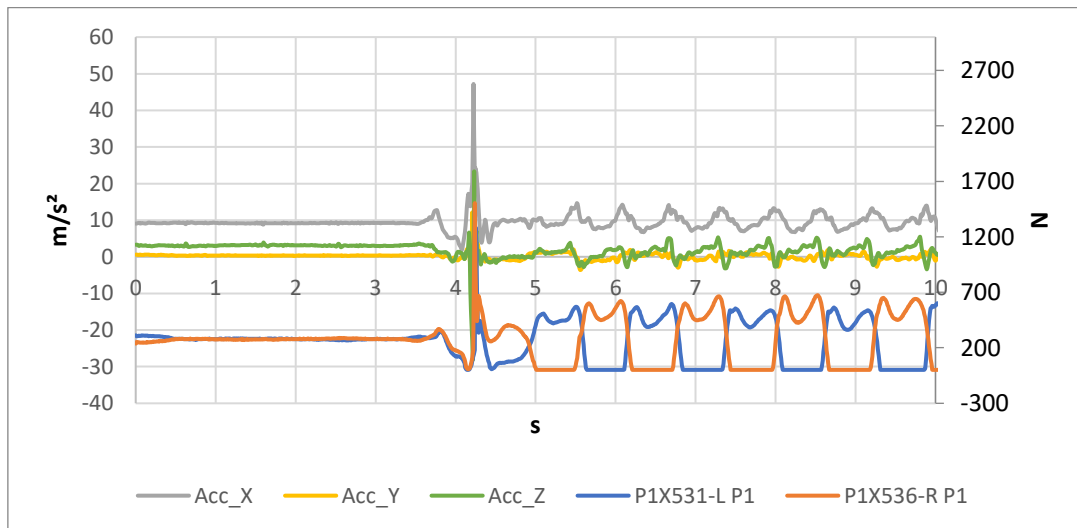


Figura 40. Representación Plantillas- XSENS B7 Post Sincronización zona inicial

De manera similar, se evidencia un ajuste notable en el final de los paseos, lo que confirma la fiabilidad de los datos obtenidos, como se aprecia en la figura 41.

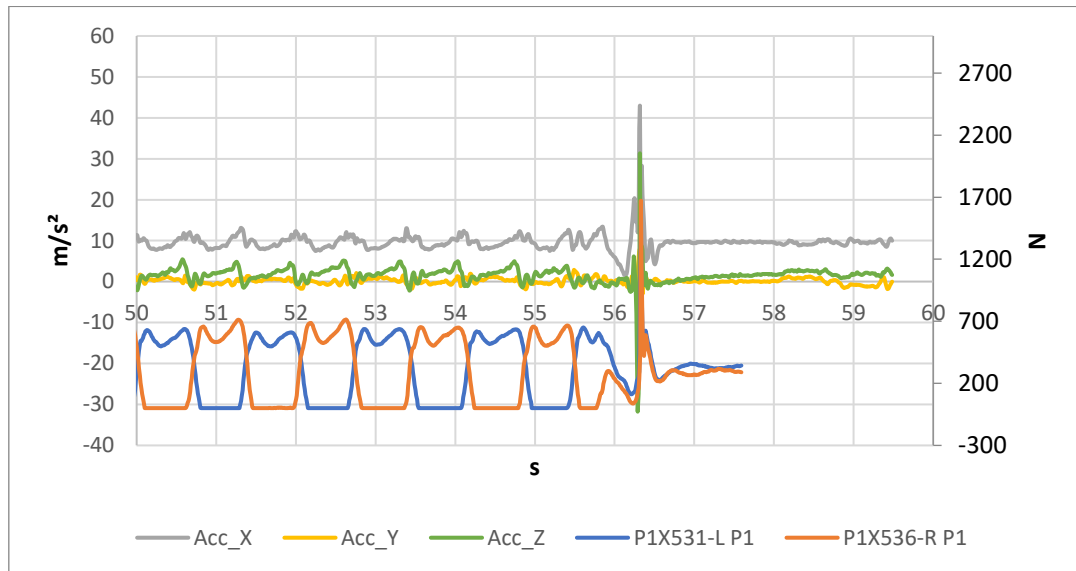


Figura 41. Representación Plantillas- XSENS B7 Post Sincronización zona final

También se ha analizado la gráfica obtenida después de llevar a cabo la sincronización y se puede apreciar en la figura 42 los patrones de pisadas específicamente de dos pasos y los registros de aceleración correspondientes.

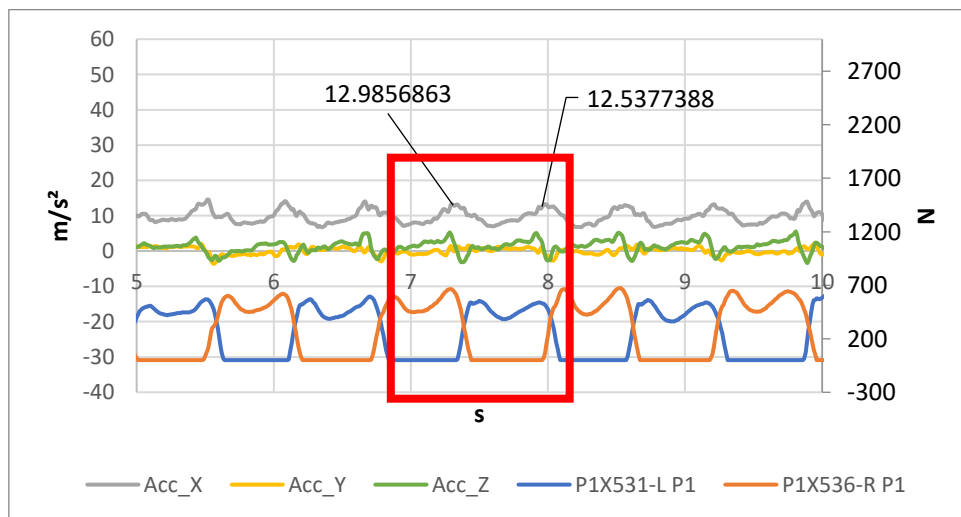


Figura 42. Patrones de pisadas y aceleraciones- XSENS B7

Con estos datos se puede concluir con el análisis de la unidad inercial XSENS B7 y llevar a cabo un análisis en menor profundidad para todos los demás XSENS que se distribuyeron por el cuerpo.

Después de realizar la sincronización de todos los XSENS con las plantillas, se obtuvieron los siguientes resultados para los XSENS B1, ubicado en el tobillo derecho, y XSENS B2, correspondiente al tobillo izquierdo. A continuación, se presentan las figuras 43 y 45 correspondientes a cada uno de estos y sus patrones de pisadas y aceleraciones figuras 44 y 46:

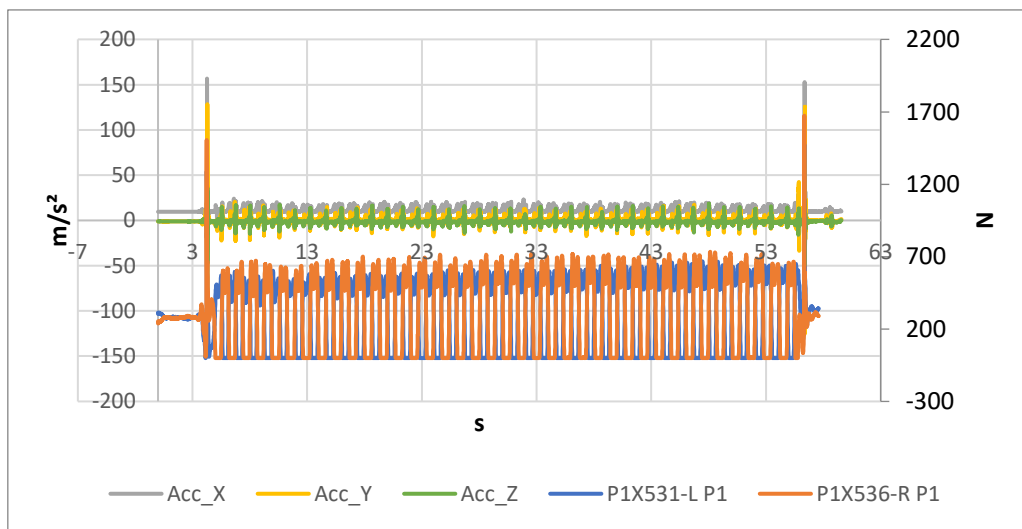


Figura 43. Representación Plantillas- XSENS B1 Post Sincronización

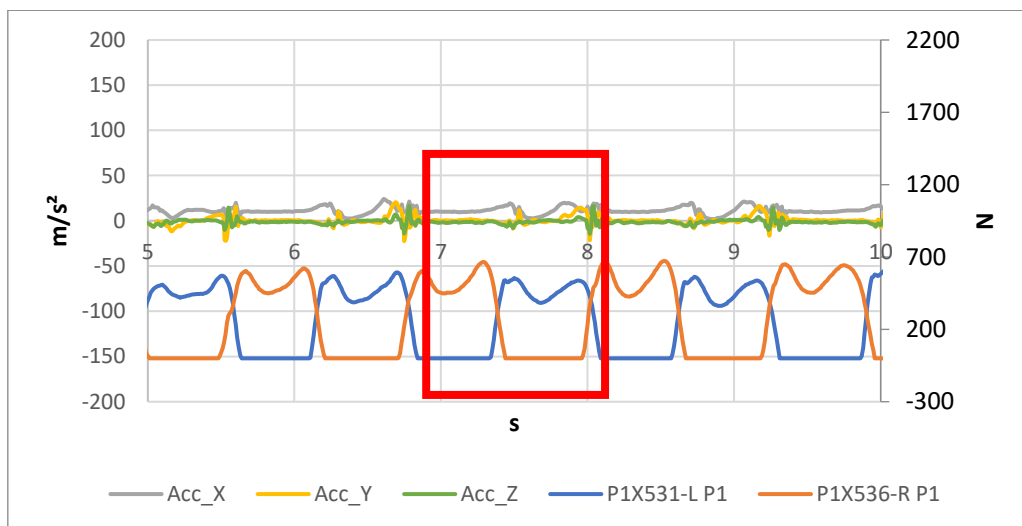


Figura 44. Patrones de pisadas y aceleraciones- XSENS B1

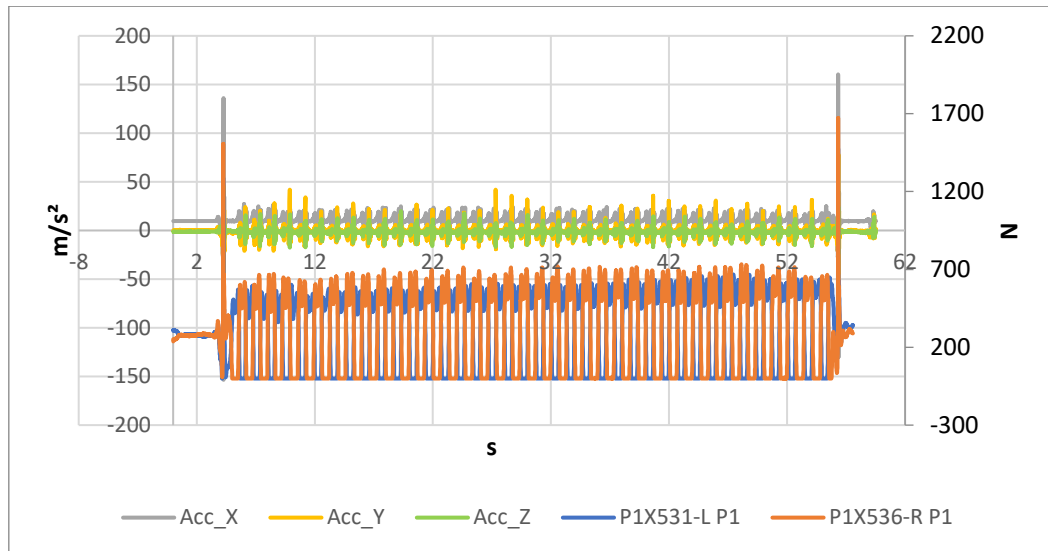


Figura 45. Representación Plantillas- XSENS B2 Post Sincronización

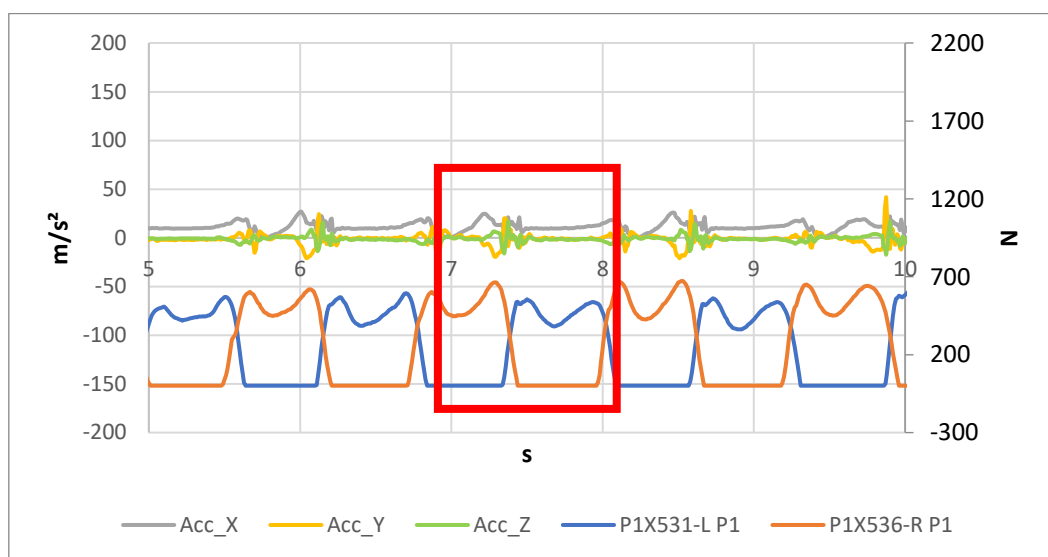


Figura 46. Patrones de pisadas y aceleraciones- XSENS B2

El XSENS B3 representa la rodilla derecha, mientras que el XSENS B4 representa la rodilla izquierda. A continuación, se presentan las figuras 47 y 49 respectivamente y las correspondientes a sus patrones de pisadas y aceleraciones figuras 48 y 50.

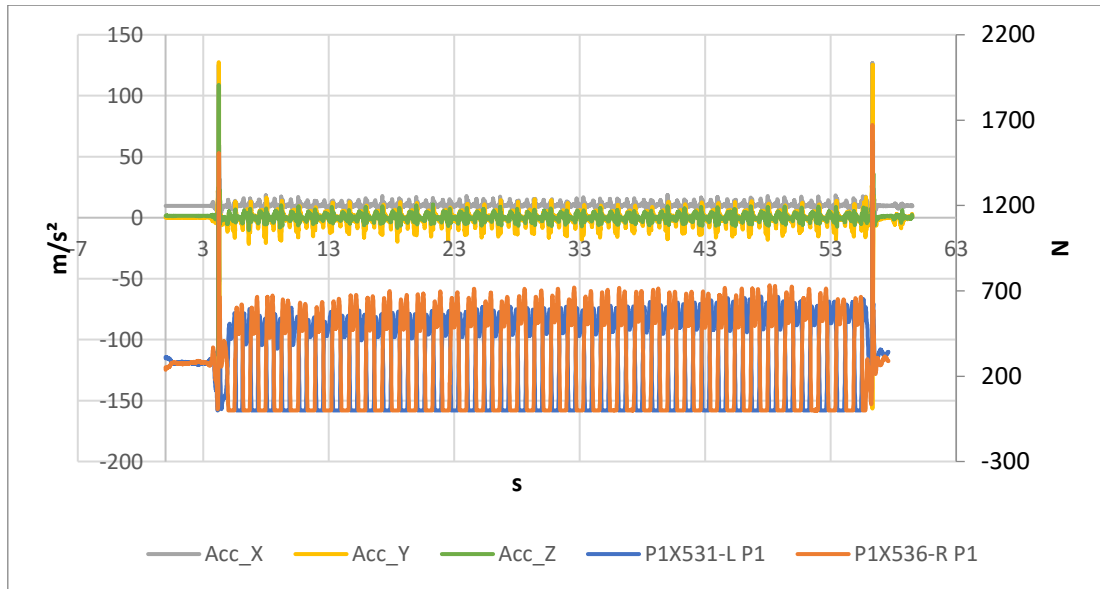


Figura 47. Representación Plantillas- XSENS B3 Post Sincronización

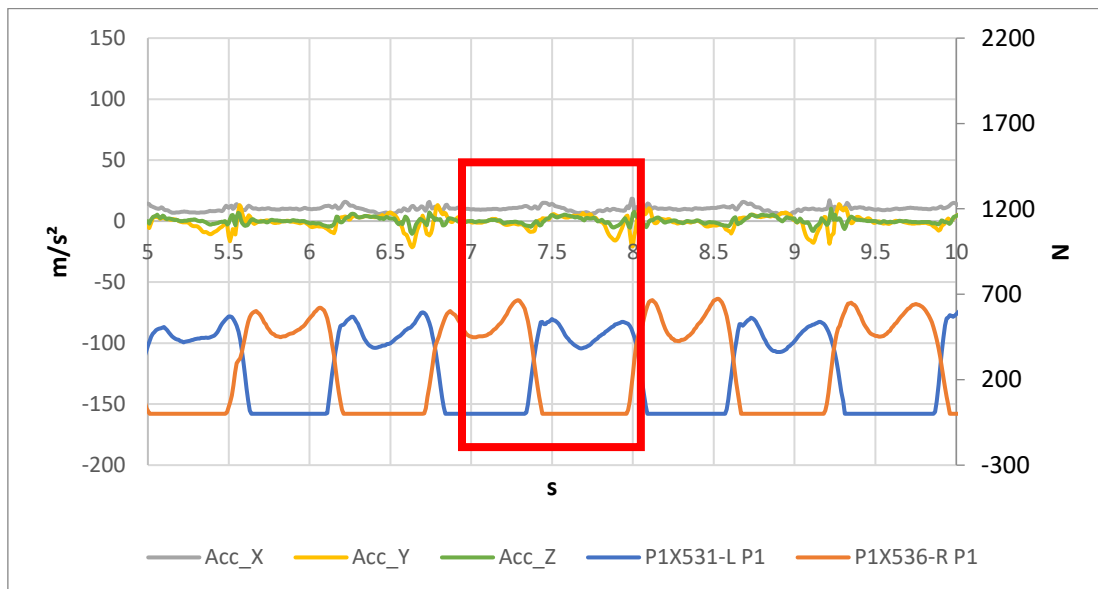


Figura 48. Patrones de pisadas y aceleraciones- XSENS B3

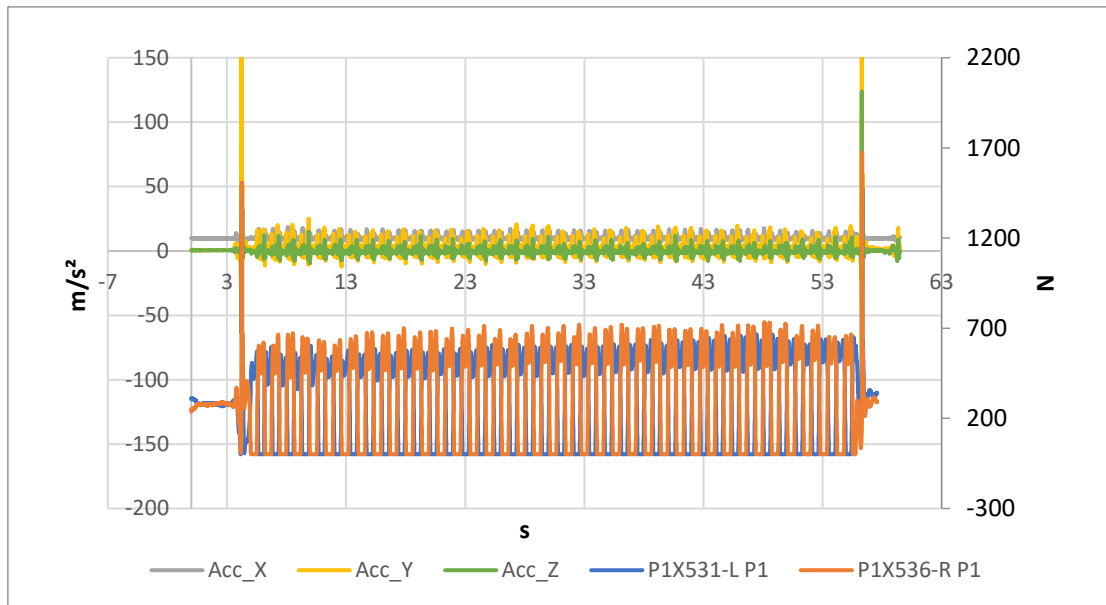


Figura 49. Representación Plantillas- XSENS B4 Post Sincronización

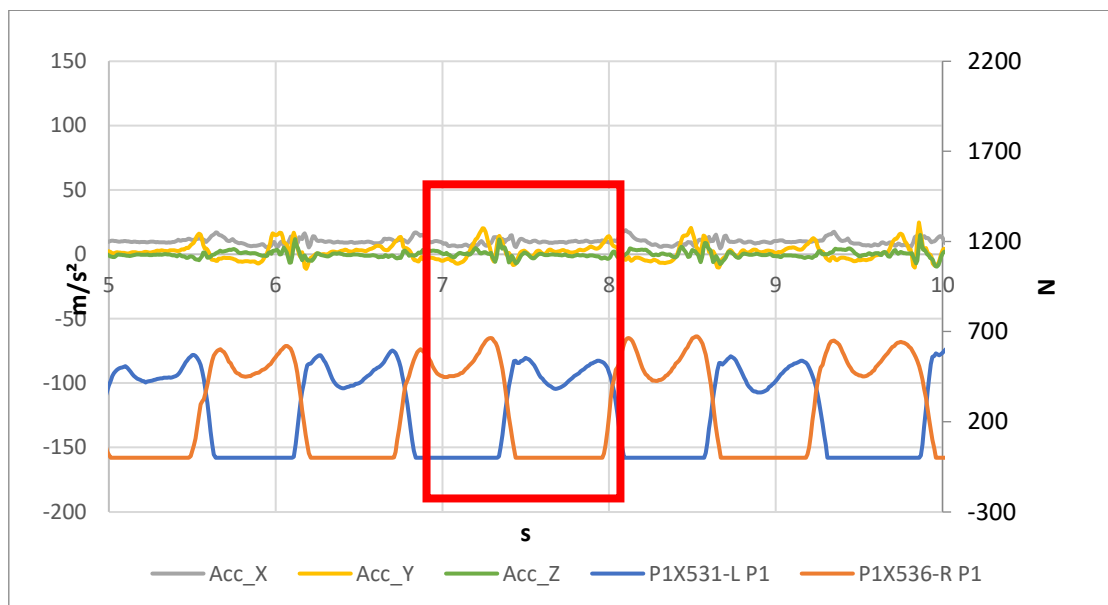


Figura 50. Patrones de pisadas y aceleraciones- XSENS B4

Por otra parte, los XSENS B5 y XSENS B6 corresponden con la cadera en el lado derecho e izquierdo respectivamente (figuras 51 y 53) además de sus patrones de pisadas y aceleraciones (figuras 52 y 54).

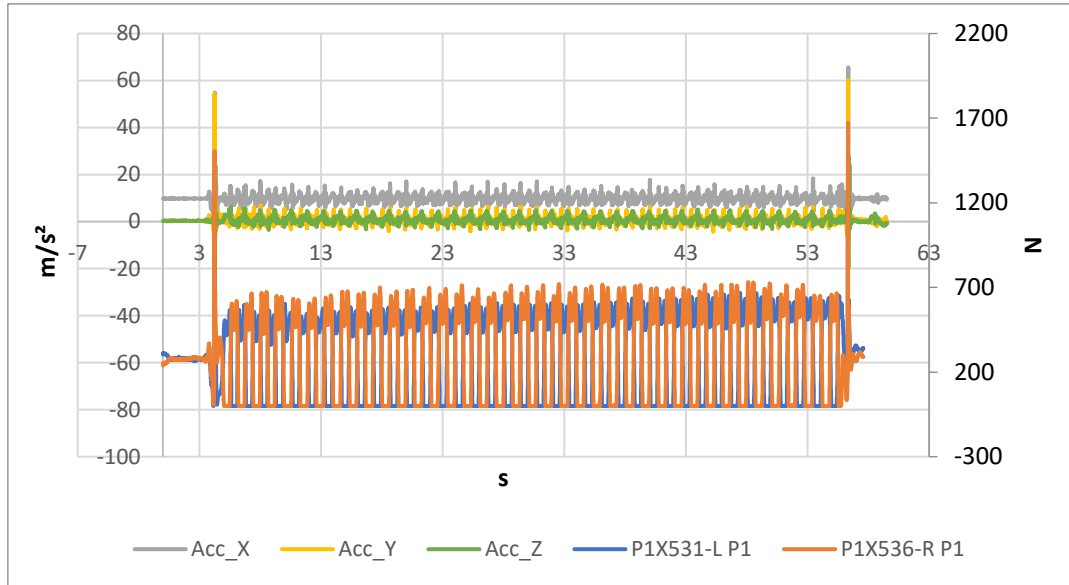


Figura 51. Representación Plantillas- XSENS B5 Post Sincronización

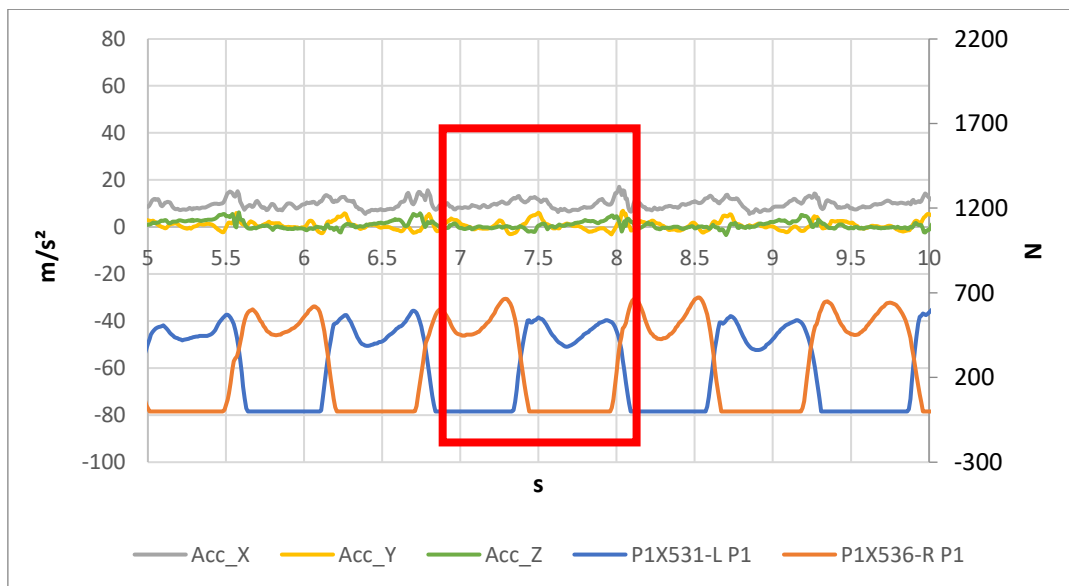


Figura 52. Patrones de pisadas y aceleraciones- XSENS B5

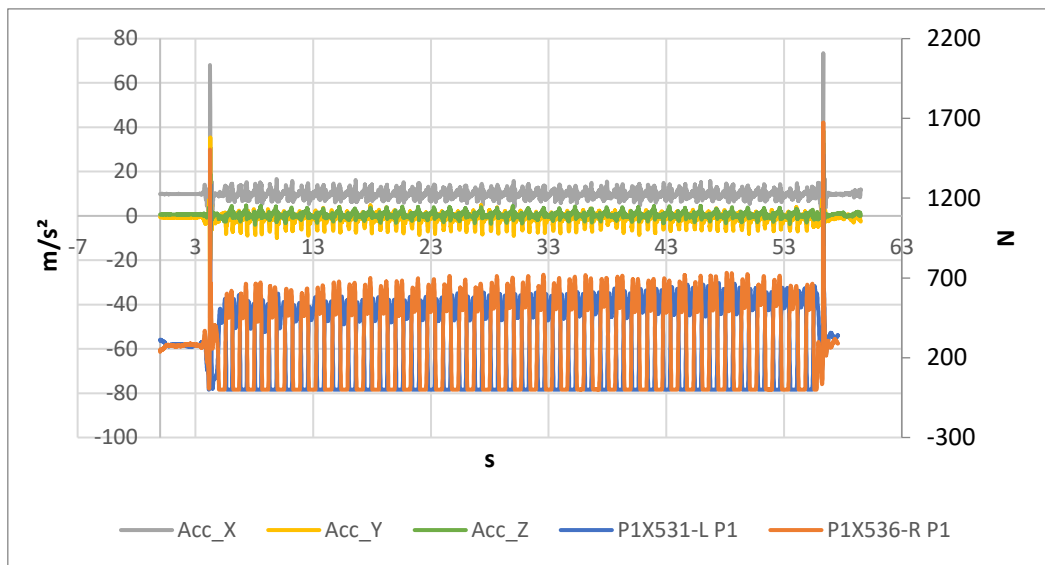


Figura 53. Representación Plantillas- XSENS B6 Post Sincronización

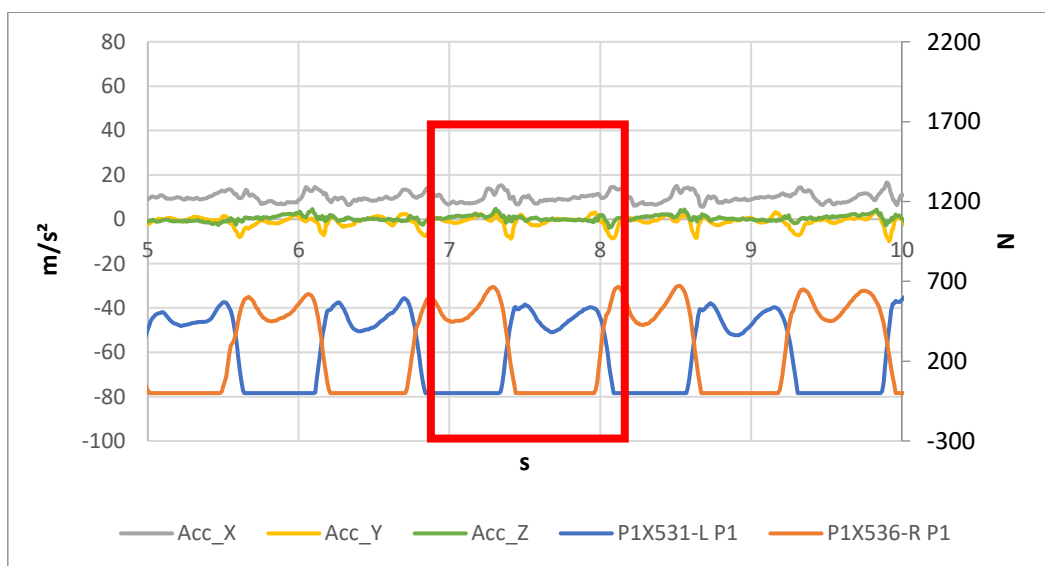


Figura 54. Patrones de pisadas y aceleraciones- XSENS B6

Por último, el XSENS B8 correspondiente a la cabeza muestra las siguientes representaciones gráficas:

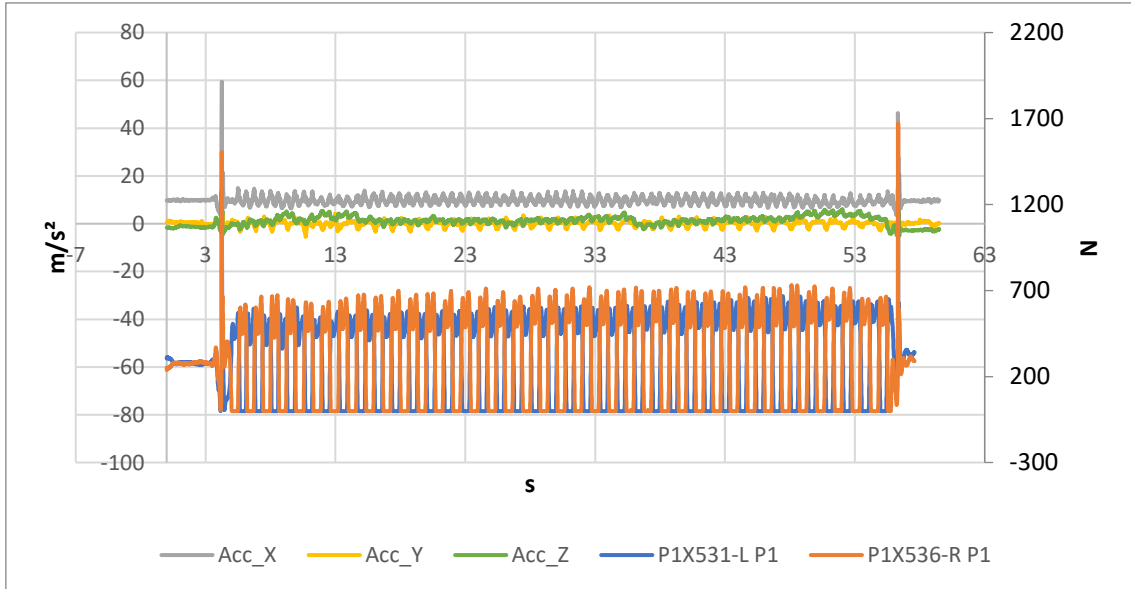


Figura 55. Representación Plantillas- XSENS B8 Post Sincronización

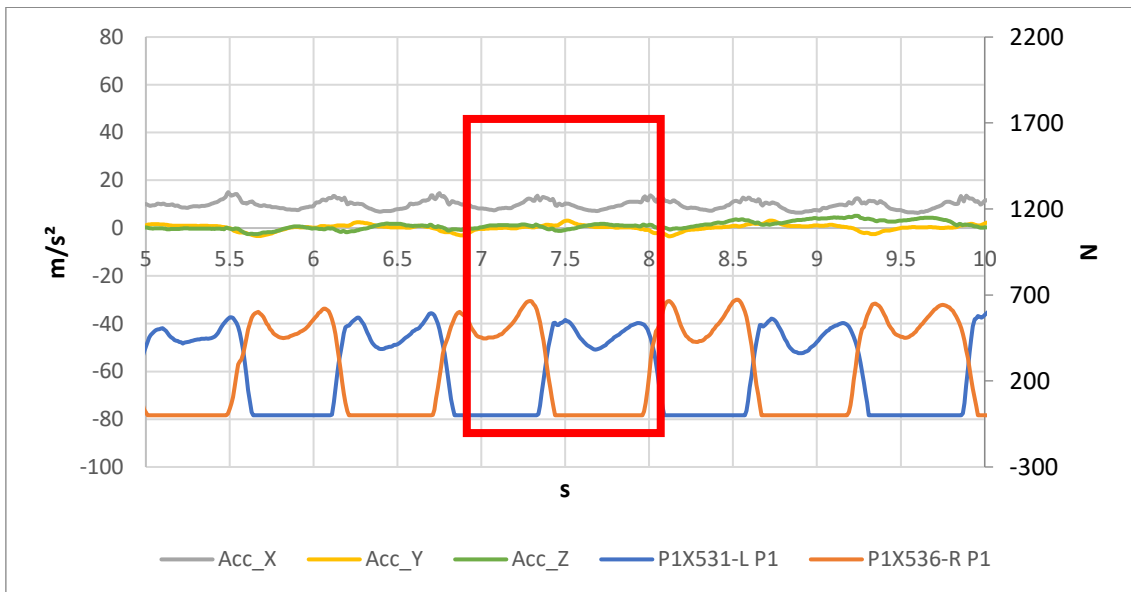


Figura 56. Patrones de pisadas y aceleraciones- XSENS B8

4.2. Registros, corriendo.

La ejecución de las mediciones de carrera, fundamental para la recopilación de datos en frecuencias de paso altas, se llevó a cabo con meticulosidad. Para explorar las variaciones en los movimientos corporales durante la actividad de correr, se realizaron experimentos a frecuencias específicas: 150, 160, 170, 180 y 190 rpm, siguiendo las indicaciones del metrónomo digital.

A diferencia de los paseos, en este caso se optó por realizar dos experimentos por cada frecuencia debido al mayor dominio experimental adquirido tras la ejecución de los paseos a frecuencias más bajas. Este enfoque permitió mantener la precisión de las mediciones, considerando la mayor demanda biomecánica asociada con las frecuencias de paso más altas.

El salón del sótano de la escuela se mantuvo como escenario para estas mediciones, brindando un espacio adecuado para la carrera en línea recta. El protocolo detallado en el Capítulo 3 se aplicó con atención a la disposición del equipo, incluyendo sensores *XSENS* y plantillas *Loadsol*, en el cuerpo y las zapatillas.

Cada sesión comenzó con la preparación y verificación del equipo, seguida de la sincronización de los sensores *XSENS* y la calibración de las plantillas *Loadsol*. Con el equipo listo, se llevaron a cabo las carreras a las frecuencias establecidas, guiadas por el metrónomo. Durante cada carrera, se registraron datos biomecánicos para análisis posterior, centrándose en el inicio con el golpe de talón como marcador temporal.

Este conjunto de mediciones proporcionará una comprensión detallada de los patrones de movimiento biomecánico durante la actividad de correr a frecuencias de paso más elevadas, contribuyendo así a la ampliación del conocimiento adquirido durante los paseos a frecuencias más bajas.

Los resultados obtenidos fueron interpretados a través de gráficas, similar a lo realizado anteriormente para frecuencias de paso bajas. Fue necesario, una vez más, llevar a cabo una sincronización entre las plantillas y los *XSENS* debido a la diferencia en la frecuencia de muestreo de cada uno de los dispositivos (plantillas - 100 Hz y *XSENS* - 120 Hz).

En este caso, se presentaron datos dentro del rango de 150-190 rpm, se centró en los datos correspondientes a 150 rpm y a la segunda toma de datos realizada a esta frecuencia.

Es crucial destacar que, en esta fase, la metodología de sincronización sigue siendo igual a la aplicada en los paseos a bajas frecuencias. No obstante, durante la representación

gráfica, se observó que la curva de las plantillas mostraba un retraso con respecto a las curvas de los XSENS, a diferencia de los paseos a baja frecuencia. Por lo tanto, para corregir esta discrepancia, se llevó a cabo la sincronización eliminando datos de las plantillas en una única ocasión, a diferencia de los ocho XSENS, como se hizo anteriormente.

En la fase inicial de análisis de las frecuencias de paso elevadas, se priorizó la evaluación del XSENS B7, ubicado en la zona abdominal, debido a la riqueza informativa que aporta (figura 57).

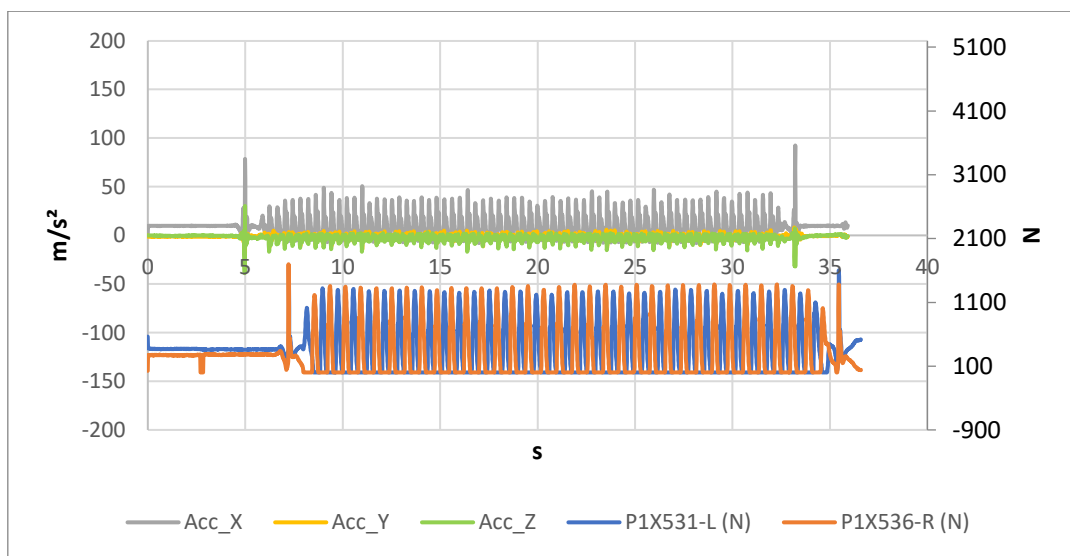


Figura 57. Representación Plantillas- XSENS B7

Tras sincronizar se obtiene la figura 58:

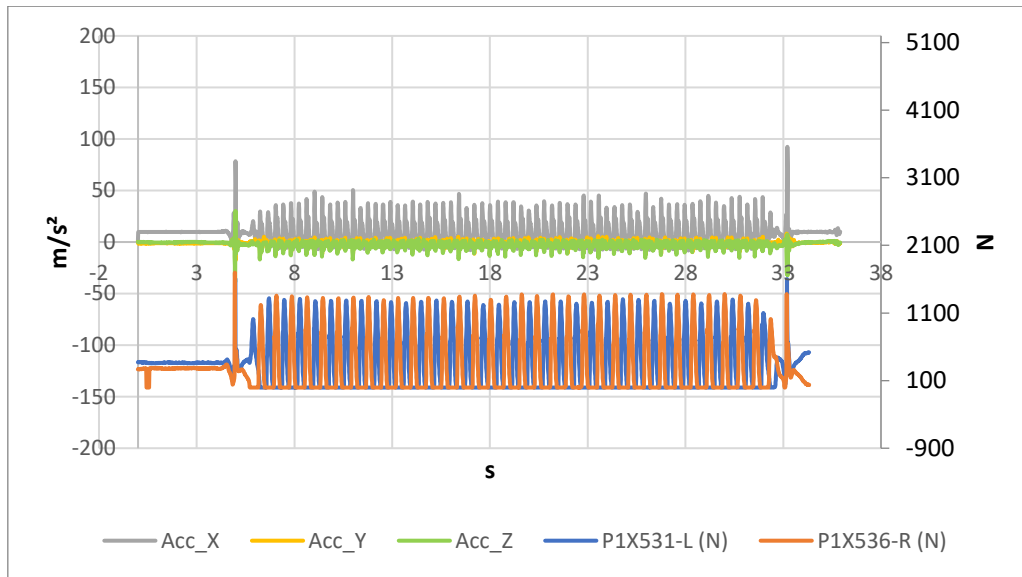


Figura 58. Representación Plantillas- XSENS B7 Post Sincronización

También se ha analizado la gráfica obtenida después de llevar a cabo la sincronización y se puede apreciar en la figura 59 los patrones de pisadas específicamente de dos pasos y los registros de aceleración correspondientes.

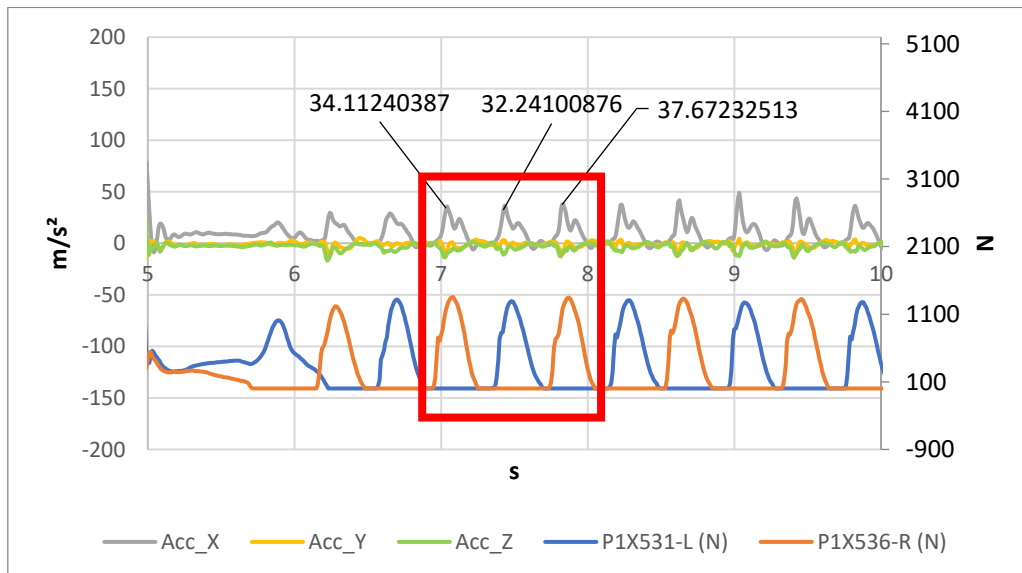


Figura 59. Patrones de pisadas y aceleraciones- XSENS B7

Se presenta a continuación la figura 60 y figura 62 correspondiente a los sensores XSENS B1 y B2, ubicados en el tobillo derecho e izquierdo respectivamente. Además de los patrones de pisadas y aceleraciones (figuras 61 y 63):

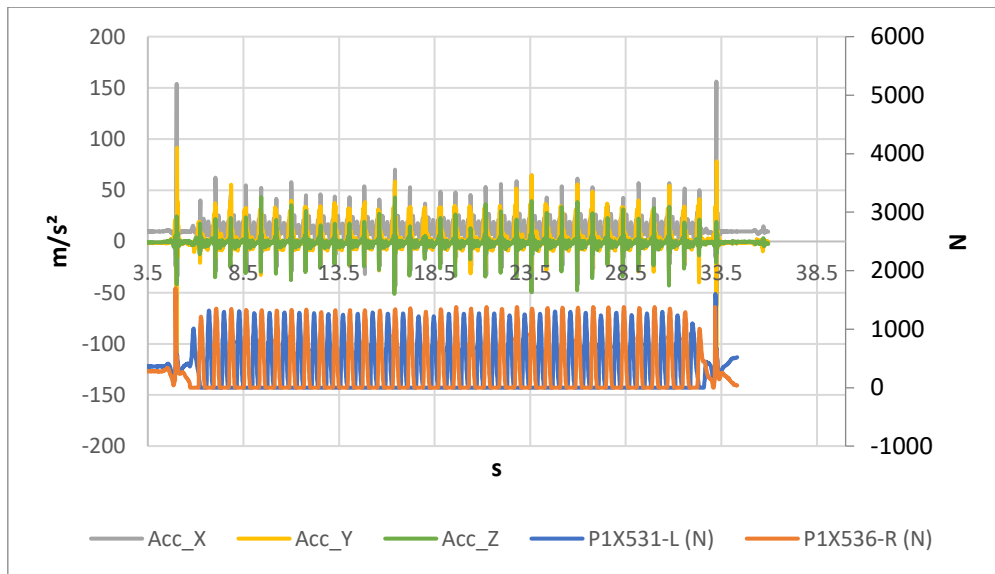


Figura 60. Representación Plantillas- XSENS B1 Post Sincronización

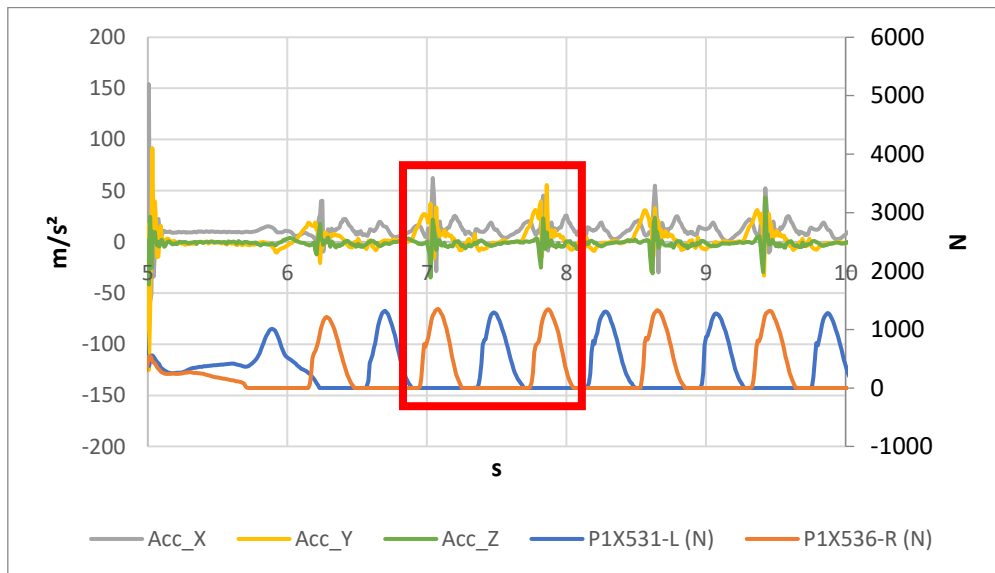


Figura 61. Patrones de pisadas y aceleraciones- XSENS B1

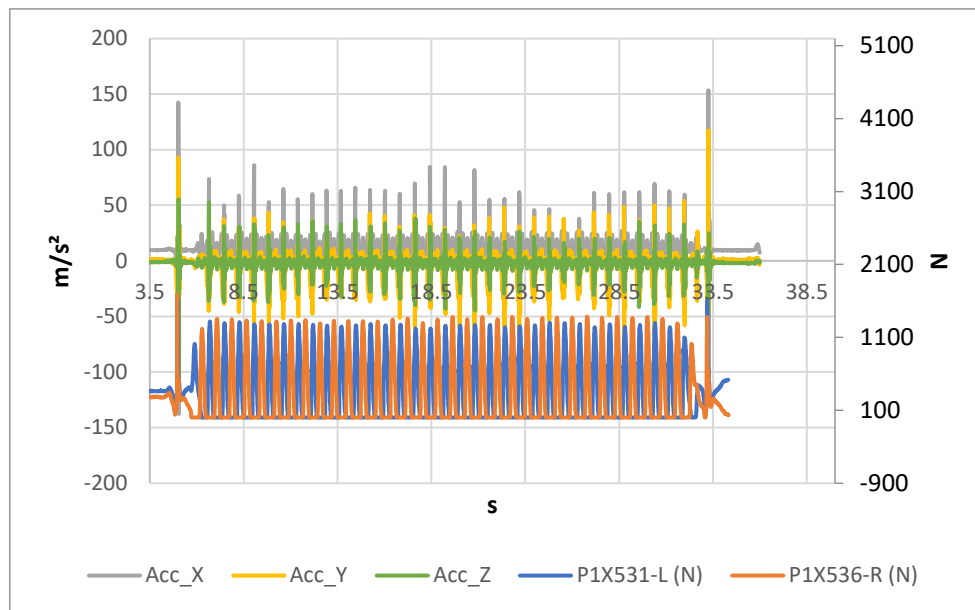


Figura 62. Representación Plantillas- XSENS B2 Post Sincronización

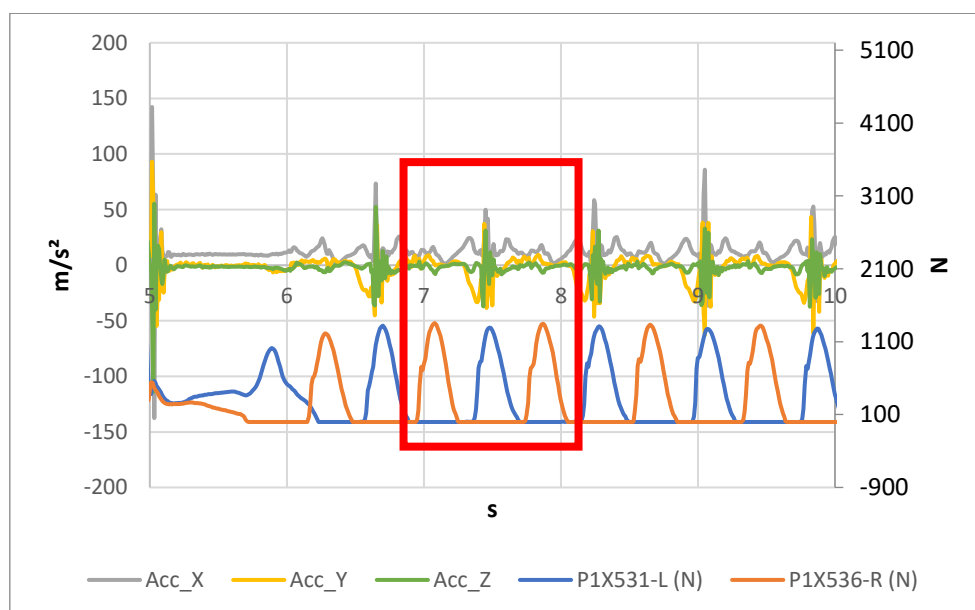


Figura 63. Patrones de pisadas y aceleraciones- XSENS B2

A continuación, se muestran las figuras 64 y 66 obtenidas para los sensores XSENS B3 (rodilla derecha) y B4 (rodilla izquierda), junto con sus patrones de pisadas y aceleraciones figuras 65 y 67:

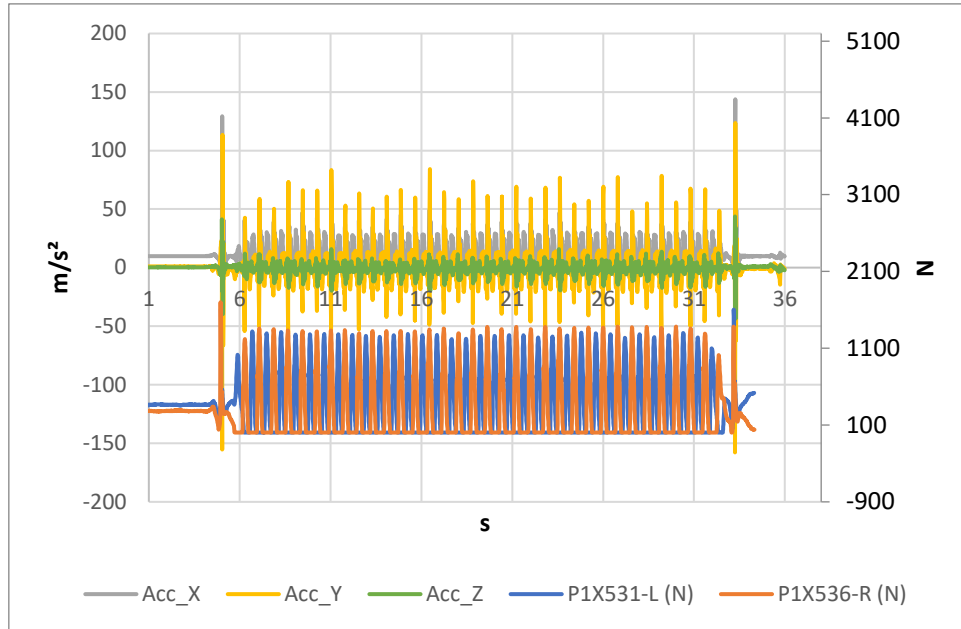


Figura 64. Representación Plantillas- XSENS B3 Post Sincronización

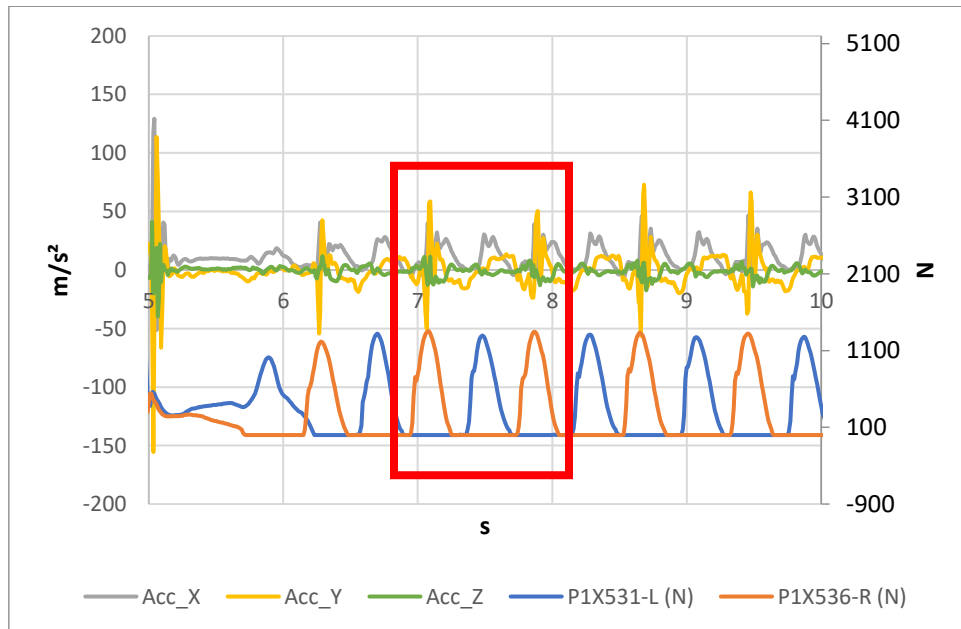


Figura 65. Patrones de pisadas y aceleraciones- XSENS B3

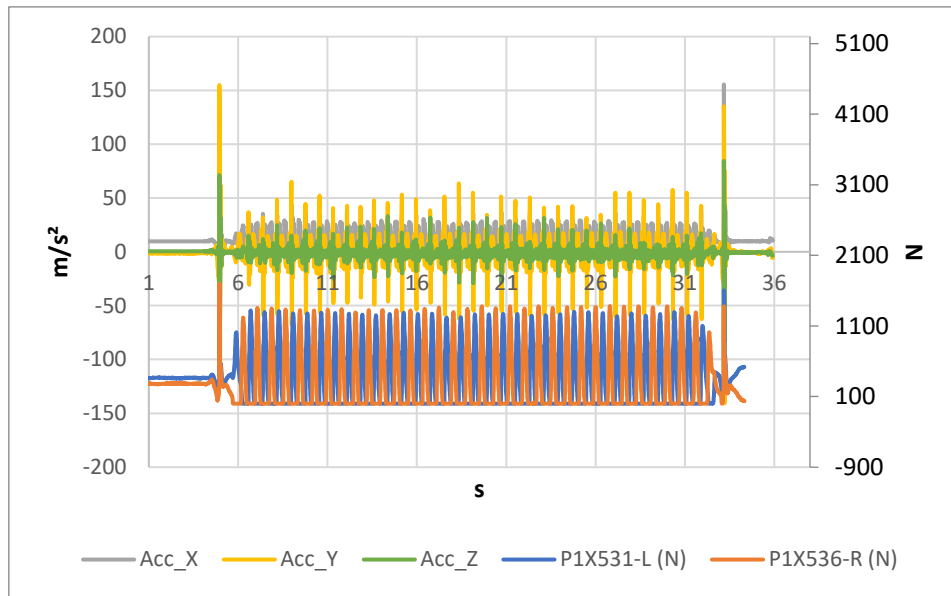


Figura 66. Representación Plantillas- XSENS B4 Post Sincronización

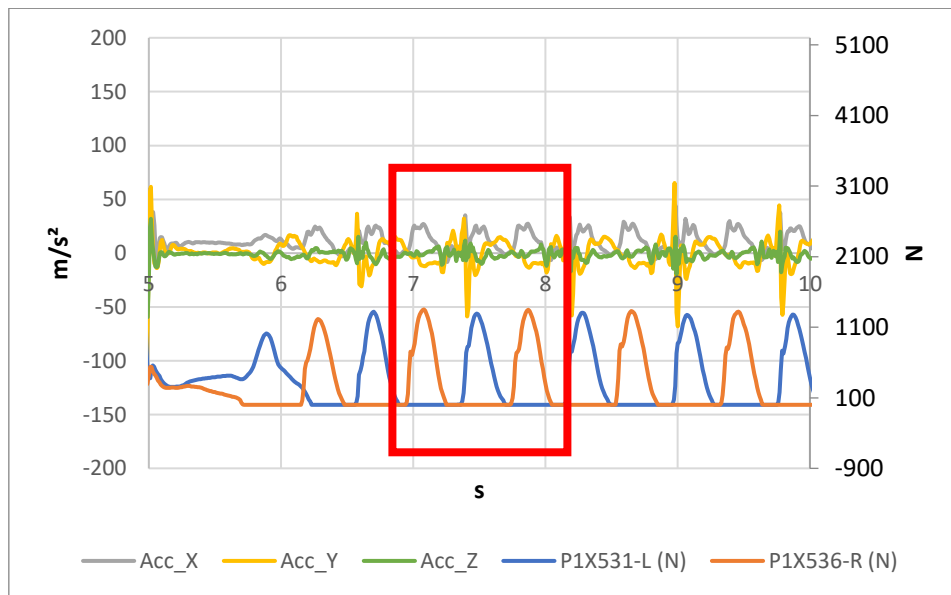


Figura 67. Patrones de pisadas y aceleraciones- XSENS B4

Por otra parte, para los XSENS B5 y XSENS B6 corresponden con la cadera en el lado derecho e izquierdo respectivamente se muestran la figura 68 y 70. Además de los patrones de pisadas figuras 69 y 71:

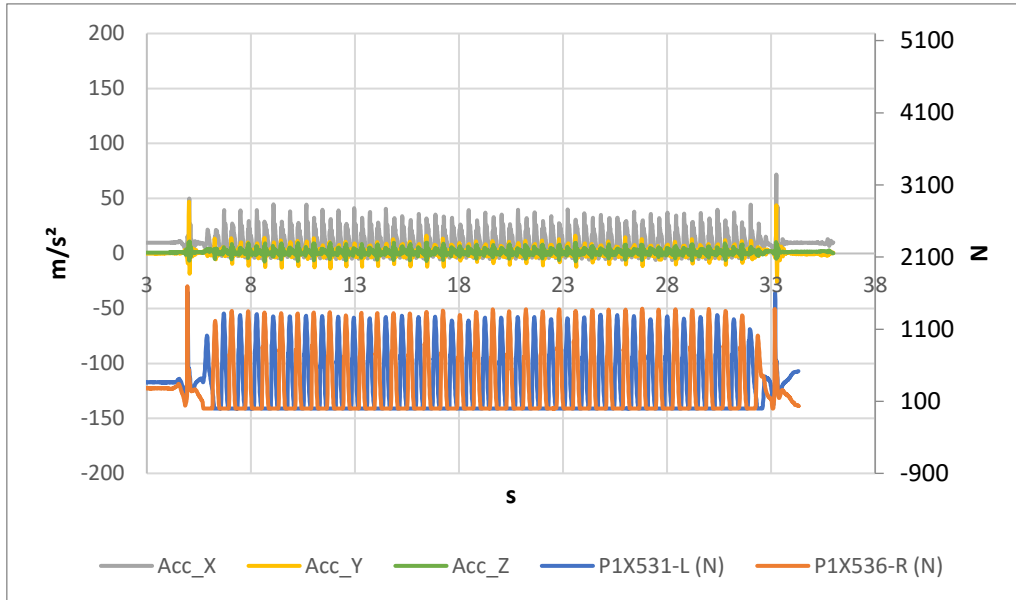


Figura 68. Representación Plantillas- XSENS B5 Post Sincronización

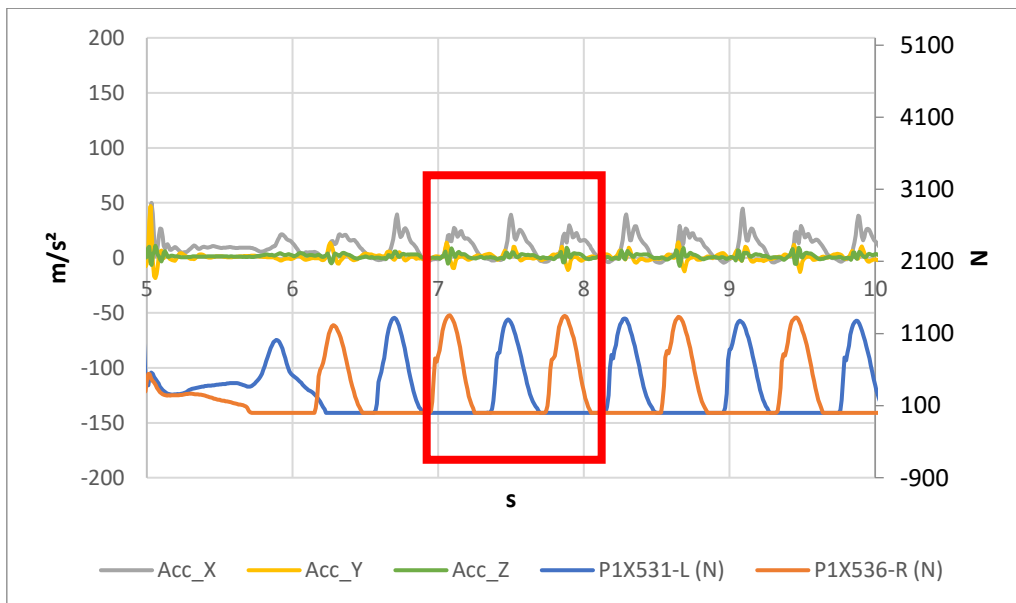


Figura 69. Patrones de pisadas y aceleraciones- XSENS B5

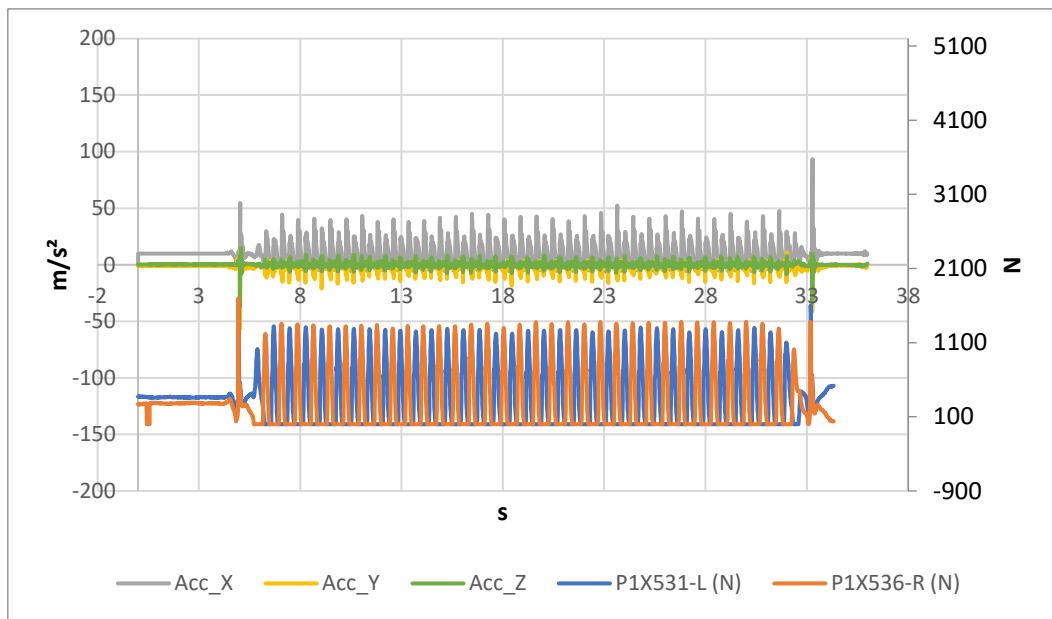


Figura 70. Representación Plantillas- XSENS B6 Post Sincronización

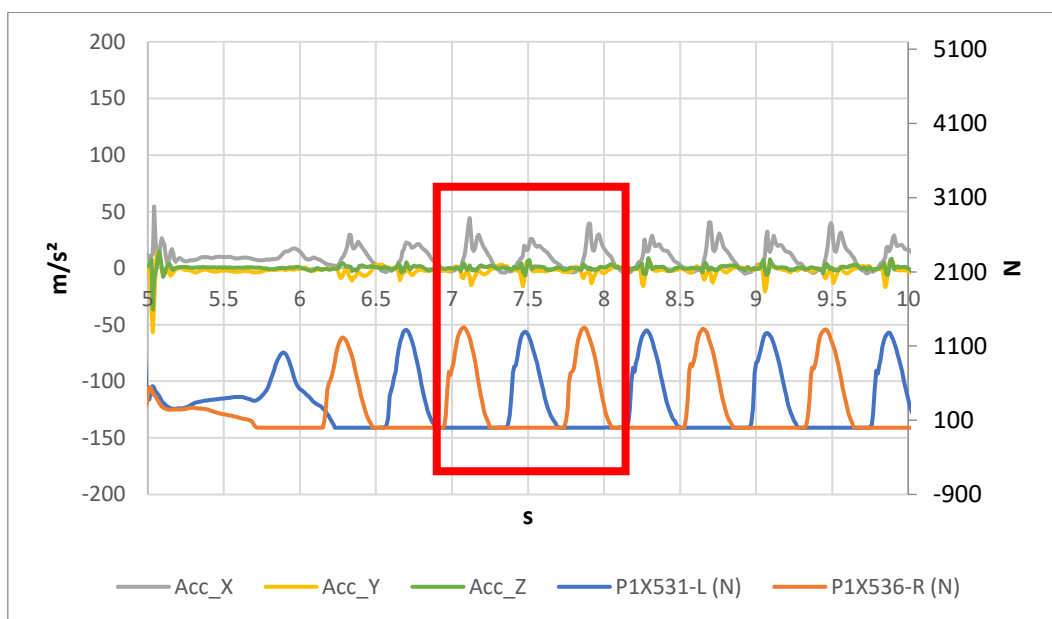


Figura 71. Patrones de pisadas y aceleraciones- XSENS B6

Finalmente, para el acelerómetro XSENS B8, ubicado en la cabeza, se muestran las figuras 72 y 73:

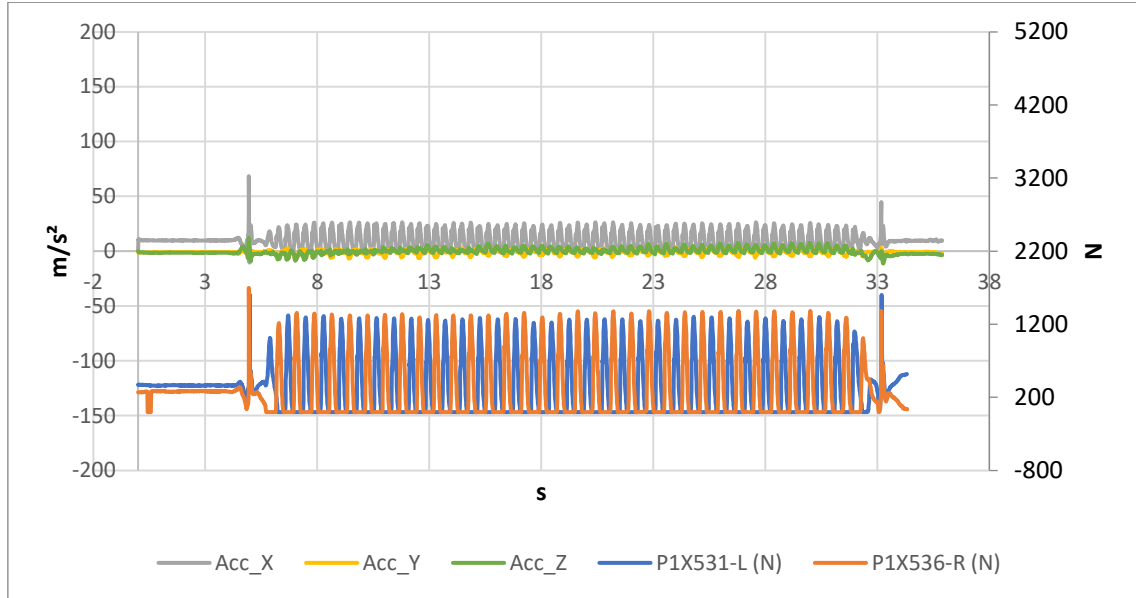


Figura 72. Plantillas- XSENS B8 Post sincronización

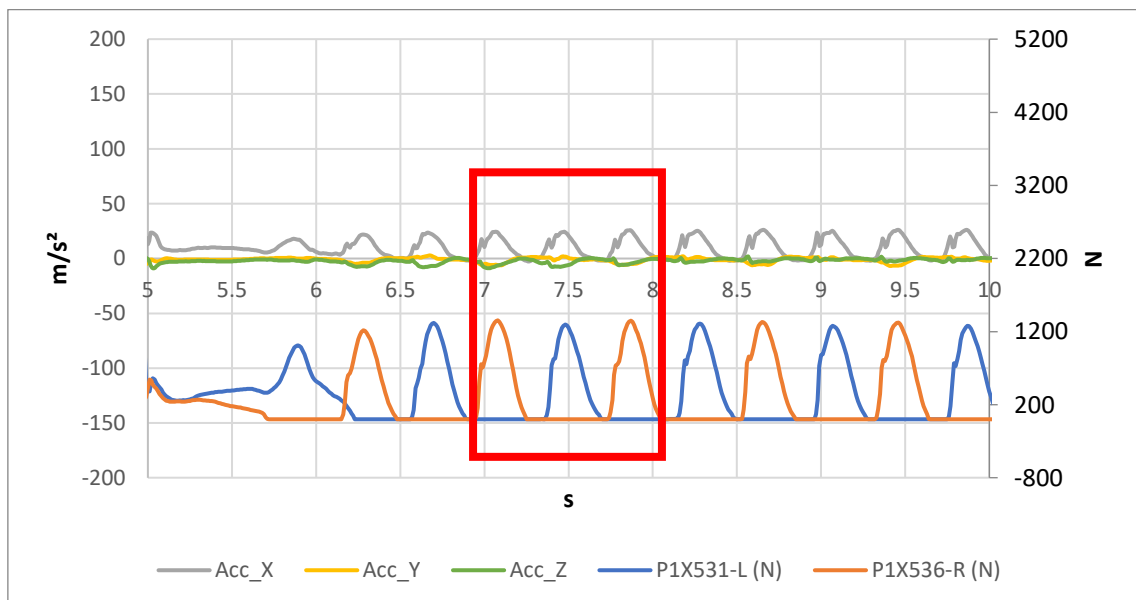


Figura 73. Patrones de pisadas y aceleraciones- XSENS B8

CAPITULO 5. Resultados

5.1. Interpretación de Resultados

La fase de interpretación de resultados emerge como un punto de gran importancia en la meticulosa experimentación realizada en este Trabajo de Fin de Grado, enfocada en la exploración y calibración de las unidades inerciales *XSENS* y plantillas *Loadsol Novel* para el análisis biomecánico durante la marcha. La profundidad de la interpretación se basa en la precisión y fiabilidad de los datos obtenidos, sustentada por una calibración rigurosa de los dispositivos y la consecuente sincronización de los datos adquiridos.

La interpretación inicial se centró en los resultados derivados del registro andando. La Figura 42 exhibe los patrones de pisadas y aceleraciones capturados por el *XSENS B7* ubicado en la zona abdominal, revelando una forma de M. Los valores máximos registrados, aproximadamente $12,98 \text{ m/s}^2$ y $12,53 \text{ m/s}^2$, son notoriamente similares, evidenciando una precisión destacada en los pasos ejecutados.

Asimismo, se analizaron los datos del *XSENS B3*, que representa la rodilla derecha (Figura 47), y del *XSENS B4*, que representa la rodilla izquierda (Figura 49). Ambos presentaron gráficas prácticamente idénticas, indicando similitud en los patrones de paso entre la pierna derecha e izquierda. Por otro lado, el *XSENS B8*, posicionado en la cabeza, mostró una representación gráfica no constante. Esto se atribuye a momentos durante la experimentación en los cuales se dirigió la mirada hacia abajo para verificar la correcta grabación en la Tablet y el iPhone, dispositivos que controlaban los softwares de captura de datos.

En el análisis de los registros durante la actividad de correr, se examinaron los patrones de pisadas y aceleraciones. Se observó una transición con respecto a la marcha, donde la configuración en forma de M con dos máximos evoluciona a tres máximos al incrementar la velocidad, registrando valores de 34.11 m/s^2 , 32.24 m/s^2 y 37.67 m/s^2 para los distintos máximos. Hay que destacar que en este escenario se evidencia una mayor dispersión de resultados, atribuible al significativo movimiento corporal inducido por la velocidad durante la carrera.

Además, resulta crucial realizar una comparación entre los registros de marcha y carrera. En el caso del *XSENS B3*, asociado a la rodilla derecha, la Figura 47 representa los registros de la marcha, donde la tendencia de cada línea graficada muestra una coherencia sin una gran dispersión en los resultados. Contrastando esto con la Figura

64, que representa los registros durante la carrera, se aprecia una considerable dispersión en los resultados. Esta disparidad se atribuye a las vibraciones corporales, siendo más leves en los registros de marcha y significativamente mayores en los de carrera, generando una dispersión más pronunciada en los resultados.

5.2. Limitaciones del Estudio y Posibles Fuentes de Error

A pesar de la meticulosa planificación y ejecución de este estudio, es crucial reconocer ciertas limitaciones y posibles fuentes de error que podrían afectar la interpretación de los resultados. Estas consideraciones son fundamentales para comprender la precisión y generalización de las conclusiones obtenidas. A continuación, se detallan las principales limitaciones.

El error mínimo en la calibración y sincronización de las unidades inerciales *XSENS* y las plantillas *Loadsol* puede influir en la precisión de los resultados. Pequeñas desviaciones en la calibración podrían introducir variaciones en los datos, afectando la fiabilidad de las conclusiones.

La variabilidad en la posición de los *XSENS* entre experimentos es una consideración importante. Aunque se hicieron esfuerzos por mantener la posición constante de los sensores en cada sesión, las ligeras variaciones podrían afectar la consistencia de los resultados.

Factores externos en la experimentación a altas frecuencias, podrían haber influido en los resultados. Ajustes mínimos en los cordones de las zapatillas o movimientos leves de las plantillas durante la carrera podrían haber afectado a los datos, especialmente debido a la mayor dinámica del cuerpo.

Estas consideraciones adicionales proporcionan un contexto crítico sobre posibles fuentes de error y limitaciones que podrían influir en la validez de los resultados. La conciencia de estos aspectos es esencial para una interpretación precisa y completa de los hallazgos del estudio.

CAPÍTULO 6. Conclusiones, recomendaciones y líneas futuras.

6.1. Conclusiones

En resumen, este estudio ha alcanzado con éxito los objetivos fundamentales establecidos en el ámbito de la biomecánica y la investigación del movimiento humano. En primer lugar, se llevó a cabo una calibración minuciosa de las unidades inerciales *XSENS* y las plantillas *Loadsol*. Esta fase crucial del estudio no solo aseguró la precisión de los datos recopilados, sino que también estableció estándares rigurosos para la confiabilidad de los resultados, contribuyendo de manera significativa a la robustez y validez de la investigación.

En segundo lugar, se procedió a la recolección y análisis detallado de datos con el propósito de identificar patrones específicos asociados a diferentes frecuencias de paso durante las actividades de andar y correr. Posteriormente en tercer y último lugar, se examinaron y se compararon las diferencias individuales en la ejecución de estas actividades, lo que proporciona información valiosa para investigaciones futuras en los campos de biomecánica y salud. Este enfoque destacó la importancia de considerar la variabilidad individual en el análisis de datos biomecánicos.

Como conclusión de estos estudios, se ha establecido una metodología para el uso conjunto de los sensores descritos, permitiendo que futuros usuarios obtengan registros de calidad que contribuyan a la formación de una base de datos integral para peatones con diversas características biométricas.

6.2. Recomendaciones y trabajo futuro

En el contexto de este Trabajo de Fin de Grado, se ha logrado establecer una valiosa base de datos que abarca las frecuencias de paso en condiciones de andar a frecuencias bajas y en condiciones de correr a frecuencias altas. Esta base de datos, generada a partir de las mediciones del propio autor de este estudio, constituye un recurso fundamental para futuras investigaciones en el campo de la biomecánica y la cinética del movimiento humano.

Sin embargo, es importante señalar que esta base de datos se ha construido en base a las características biométricas y fisiológicas específicas del autor. Como resultado, existe un vasto potencial para su expansión y enriquecimiento a través de la inclusión de datos

de una variedad de sujetos con distintos perfiles. Se proyecta la incorporación de individuos con variaciones en aspectos como talla, peso, número de pie y tipo de calzado, lo cual permitirá obtener un conjunto de datos más diversificado y representativo de la población en general.

Además, se plantea la posibilidad de implementar modificaciones en el protocolo de medición. Por ejemplo, se podría considerar la inclusión de condiciones adicionales, como la carga de una mochila durante las actividades de andar y correr. Esto proporcionaría valiosa información sobre cómo la adición de peso externo puede influir en los patrones de movimiento y en las frecuencias de paso registradas.

Otro aspecto relevante para futuras investigaciones sería la exploración de diferentes superficies de desplazamiento. En lugar de llevar a cabo las mediciones en superficies firmes y uniformes, se podrían realizar pruebas en entornos más desafiantes, como pasarelas o terrenos irregulares. Esto permitiría evaluar cómo la naturaleza del suelo afecta la frecuencia de paso y los patrones de movimiento, ofreciendo valiosa información para aplicaciones prácticas en diversas áreas.

En resumen, este Trabajo de Fin de Grado sienta las bases para futuras investigaciones que pueden ampliar nuestra comprensión de cómo nos movemos en distintas situaciones. La colaboración entre diferentes áreas de estudio y la utilización de tecnologías avanzadas pueden ser esenciales para sacar el máximo provecho de esta base de datos y aplicar lo que aprendemos para mejorar la salud y el rendimiento de las personas.

6.3. Consideraciones adicionales

En relación con la ejecución de este Proyecto de Fin de Grado, es relevante subrayar que no se ha empleado ningún material peligroso ni se ha ocasionado contaminación ambiental durante su desarrollo, a excepción del consumo energético correspondiente. El único impacto ambiental notable podría manifestarse en el futuro, al desechar los materiales utilizados. Cabe destacar también el impacto reducido que se generará al concluir el ciclo de vida de las unidades inerciales y otros componentes electrónicos del ordenador.

Con el propósito de minimizar dicho impacto, toda la instrumentación utilizada queda a disposición de futuros estudiantes que puedan emplearla en la elaboración de sus propios Proyectos de Fin de Grado, permitiendo su reutilización hasta que alcance el final de su ciclo de vida. Además, para reducir aún más el impacto, todo el material es susceptible de ser reciclado.



Para iniciar este proyecto, fue necesario invertir una cantidad considerable de tiempo en aprender a manejar los sensores utilizados. Esto implicó la instalación de diversas aplicaciones tanto en el ordenador como en un dispositivo móvil, así como la adquisición de conocimientos sobre la manipulación de estas y la descarga y procesamiento de los datos proporcionados por dichos sensores en programas informáticos.

La elaboración de escenarios y la recolección de datos, que posteriormente se descartaron, demandaron un total de 100 horas. En cuanto a la reflexión sobre posibles soluciones para la interpretación de los datos, junto con la creación de los escenarios finales, se estima que esta fase del Trabajo de Fin de Grado requirió aproximadamente 260 horas, correspondientes a las prácticas de empresa y a la ampliación de estas. Una vez concluida la fase experimental, se procedió a redactar el informe final y preparar la presentación, actividades que ocuparon alrededor de 100 horas. Sumando ambos períodos, el tiempo total dedicado al desarrollo de este proyecto asciende a 460 horas.

También es factible realizar una estimación del coste, considerando que un ingeniero en formación tiene un salario promedio de alrededor de 23.000 € al año, trabajando aproximadamente 1.800 horas al año. Al realizar el cálculo correspondiente, se obtiene un promedio de 11,06 € por hora. Para determinar el valor monetario de esta inversión de tiempo, se multiplican las horas dedicadas por la tarifa horaria de 11,06 €/h, que corresponde al salario medio de un ingeniero. De esta manera, se obtiene un coste total de 5087,60 €.

Bibliografía

- [1] Sanchis, R. (2019) *Evaluación de parámetros biomecánicos durante la marcha en adultos mayores tras dos programas de entrenamiento* [Tesis doctoral, Universitat de Valencia]
- [2] Sánchez Martín, J. C. (2022). Análisis experimental de la influencia de la velocidad de la marcha en las GRFs, Trabajo Fin de Grado. *Universidad de Valladolid. Escuela de Ingenierías Industriales.*
- [3] Bazuelo, B (2017) *Análisis biomecánico de la fase de apoyo de carrera en distintas condiciones de fatiga en corredores recreacionales.* [Tesis doctoral, Universitat de Valencia]
- [4] Delgado-García, G. (2021) *Protocolos para la evaluación biomecánico-técnica y la prevención de lesiones musculoesqueléticas, en deportistas de raqueta.* [Tesis doctoral, Universidad de Granada]
- [5] Acevedo Eustaquio, S. (2023). Propuesta de una metodología para estimar los ángulos entre la cabeza y el torso mediante sensores inerciales, Trabajo Fin de Grado. *Universidad de Valladolid. Escuela de Ingenierías Industriales.*
- [6] *Manual uso XSENS.* (6 de 11 de 2023). Obtenido de <https://www.xsens.com/hubfs/Downloads/Manuals/Xsens%20DOT%20User%20Manual.pdf>.
- [7] *Plantillas loadsol novel.* (6 de 11 de 2023). Obtenido de <https://novel.de/products/loadsol/>.
- [8] *Zapatillas salomon.* (6 de 11 de 2023). Obtenido de <https://www.salomon.com/es-es/shop-emea/product/xa-pro-3d-v8.html#color=66576>.
- [9] *SIRIUS DEWESoft.* (8 de 11 de 2023). Obtenido de <https://dewesoft.com/es>
- [10] *Sensores Xsens.* (6 de 11 de 2023). Obtenido de <https://www.movella.com/products/wearables?hsCtaTracking=fe4949e7-e6fa-4782-bb72-016082887151%7C69eb5313-452e-4312-afd4-640498d8ca6d>.



ANEXOS

ANEXO 1- Manual uso Xsens

Para llevar a cabo el uso de las unidades inerciales o sensores *XSENS* tendremos primero de todo descargar la aplicación móvil a través de la cual manipularemos los diferentes sensores *XSENS* esta aplicación es Movella DOT (figura 74).

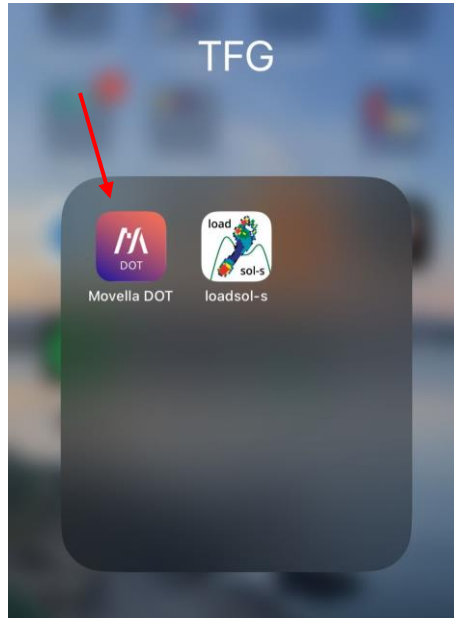


Figura 74. Aplicación Movella DOT

Posteriormente una vez se entre a la aplicación móvil y se pulse en el medio del sensor *XSENS*, en la zona naranja, el sensor se encenderá, encendiéndose un led color verde, y conectará al móvil vía bluetooth de manera directa. En caso de no conectarse vuelve a hacer el mismo proceso pulsando en el medio, zona naranja, para apagarlo comprobando que no se enciende el led y volviendo a encenderlo apretando de nuevo en la zona citada (figura 75).

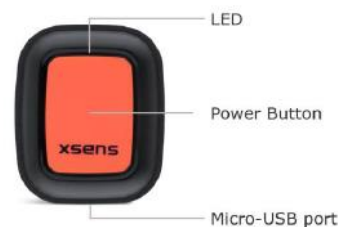


Figura 75. Acelerómetro XSENS [10]

Una vez conectados los diferentes acelerómetros XSENS nos aparecerá el menú, en este menú aparecerán todos los sensores que hayamos encendido, pero en este caso de calibración como lo que buscamos es ver si el sensor tiene precisión en las mediciones, sólo conectaremos 3 de ellos pulsando en el marcador de la derecha de aquellos que queramos conectar (figura 76). En nuestro caso conectaremos los XSENS B1, B4 y B8 (figura 77).

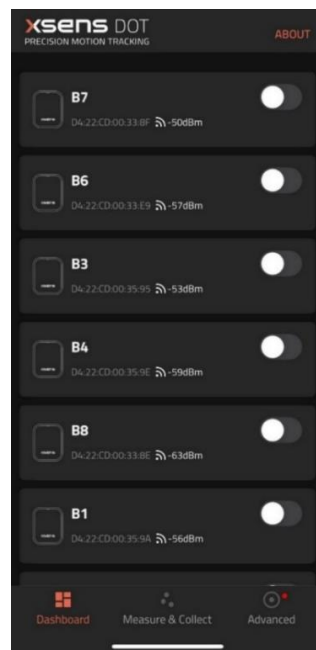


Figura 76. Menú Dashboard



Figura 77. Activación de XSENS

Una vez los tenemos conectados debemos sincronizarlos entre ellos, para hacerse se debe ir al menú de la parte inferior “measure and collect” y marcaremos “synchronization” esta sincronización durará unos minutos (figura 78). Además en este menú “measure and collect” marcaremos la frecuencia de muestreo que vamos a usar, en nuestro caso nos interesa el mayor número de datos posible para ser cuanto más exactos en nuestros datos, por lo que marcamos la máxima frecuencia de muestreo posible para nuestros sensores XSENS que es 120 Hz (figura 79).

Una vez tenemos la frecuencia de muestreo fijada y sincronizados los diferentes XSENS es el momento de colocarlos en sus soportes los cuales tienen un velcro que uniremos a las cintas de sujeción.

Posteriormente se podrá comenzar a medir entrando en “Recording” en ese menú nos aparecerán los XSENS que conectamos previamente.

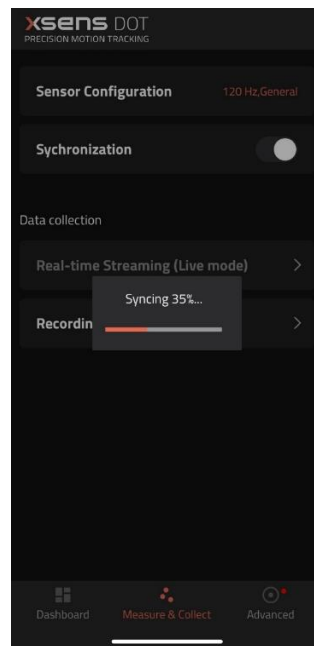


Figura 78. Sincronización de XSENS

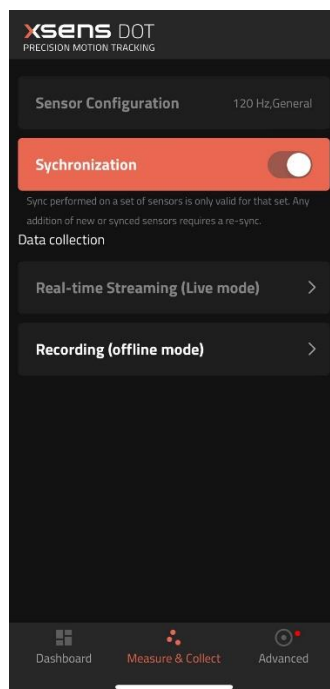


Figura 79. Sincronización completada

Antes de todo deberemos limpiar la información que tienen los sensores en su interior ya que si no tendremos datos de experimentos anteriores, para ello se debe pulsar “clear all” (figura 80) lo cual borrará toda la información que contengan los sensores, este proceso llevará unos minutos. Finalizado este proceso estamos en condiciones de comenzar a medir (figura 81).

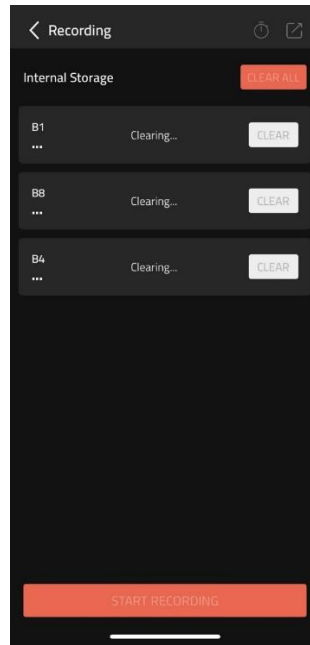


Figura 80. Menú Recording Clear All

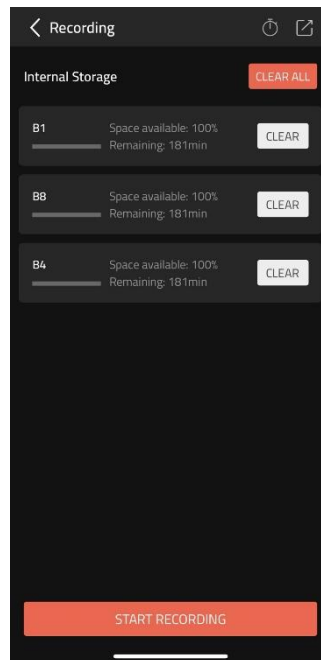


Figura 81. Menú Recording, Start Recording

Para comenzar a medir y por tanto grabar, pulsamos en “Start recording” (figura 82) haremos los movimientos que se desee de los sensores XSENS y una vez finalice la experimentación se pulsará “Stop recording” para parar la grabación de datos. Y posteriormente se grabará la información pulsando en “Finish ” (figura 82).

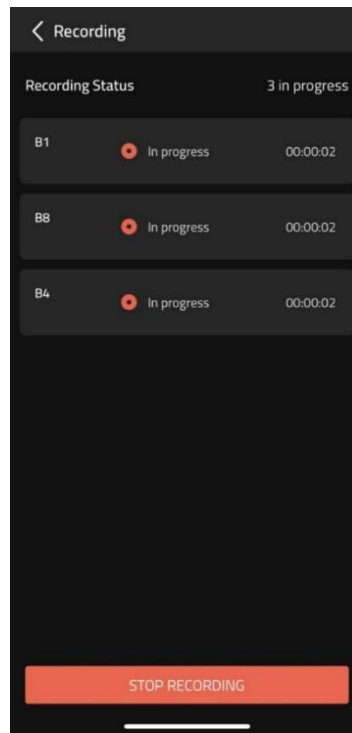


Figura 82. Menú Recording Start Recording

ANEXO 2 -Manual uso Loadsol by Novel

Para la utilización de las plantillas se debe disponer de un dispositivo con Bluetooth a través del cual nos conectaremos a ellas. Una vez se entra en el programa se encontrará un menú como el siguiente (figura 83):



Figura 83. Menú Inicio Plantillas Loadsol by Novel

Una vez se está en el menú principal, pulsamos en la parte de arriba a la derecha “sensors” y nos detectará las plantillas cercanas, nos aparecerá en un principio el pilotito de la izquierda en rojo, ya que aún no están conectadas a nuestro dispositivo (figura 84).

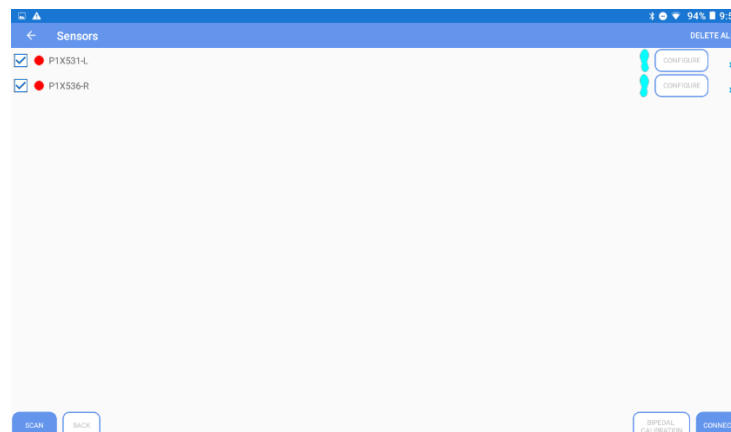


Figura 84. Conexión plantillas Loadsol by Novel

Tras darle en el botón de abajo a la izquierda “Conect” se pondrán ambas plantillas en verde y querrá decir que ya están conectadas a nuestro dispositivo (figura 85).

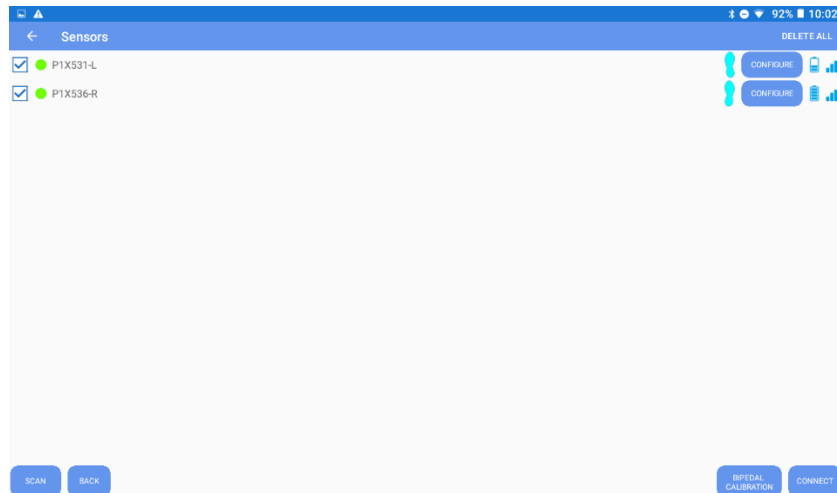


Figura 85. Plantillas conectadas

Una vez conectadas las plantillas se deben calibrar pulsando “Zero” donde nos mandará levantar un pie (figura 86) y una vez este levantado tomará lo que marque en ese momento la plantilla como 0. Este proceso para ambos pies (figura 87).

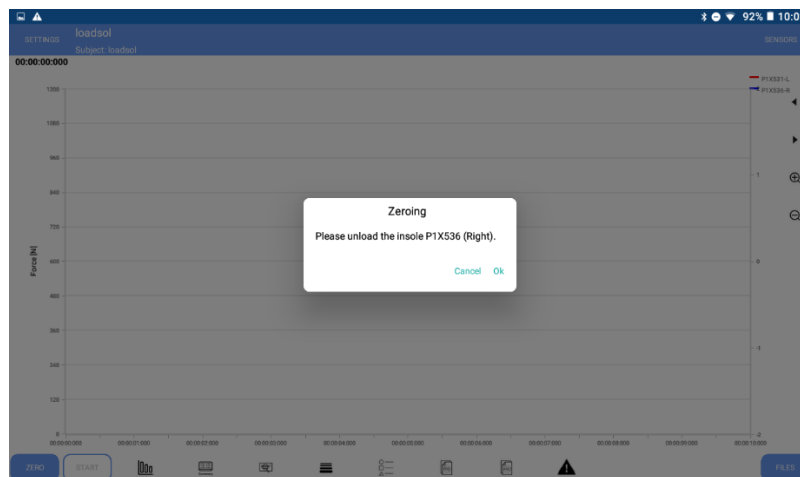


Figura 86. Calibración plantilla derecha

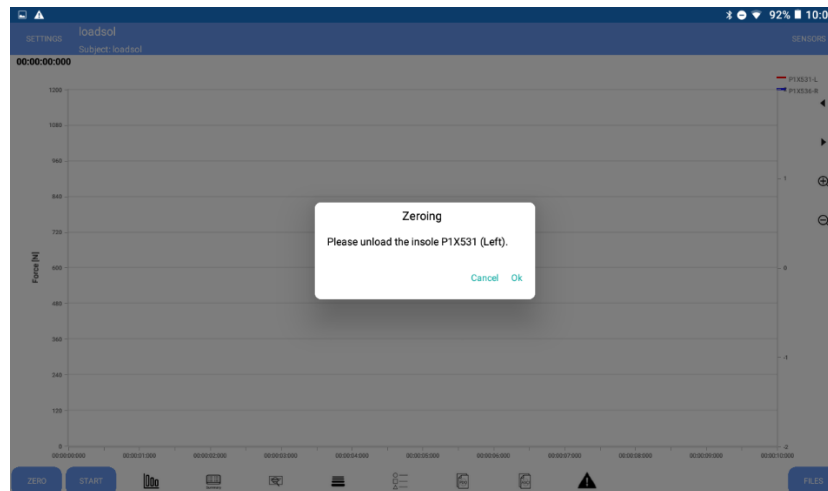


Figura 87. Calibración plantilla izquierda

Una vez calibrado, se puede empezar a medir, para ello se pulsa en “Start” y se obtiene lo que se observa en la figura 88:

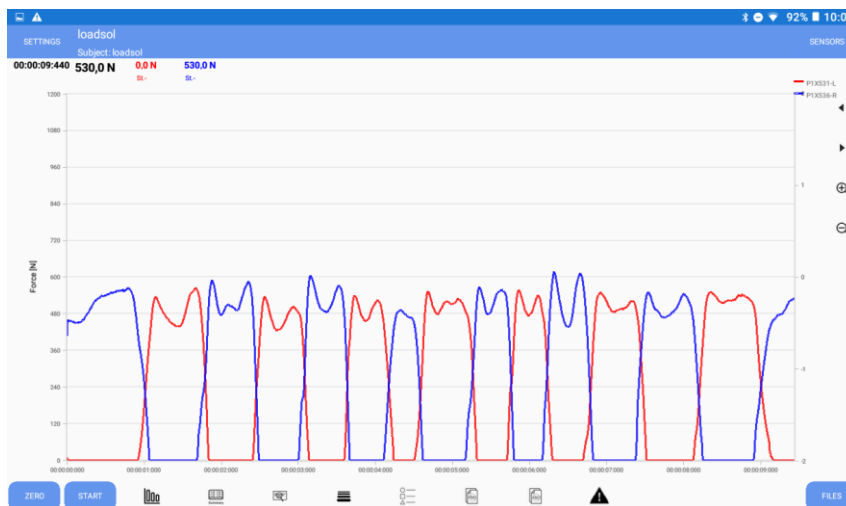


Figura 88. Grabación plantillas caminando

Tras obtener los gráficos y datos correspondientes, se guarda con ASCII pulsando “yes with ASCII”, para así poder trabajar posteriormente con esos datos (figura 89).



Figura 89. Guardado de datos

Y tras tenerlo guardado se extrae al ordenador y ya se puede trabajar con ello en Excel (figura 90).

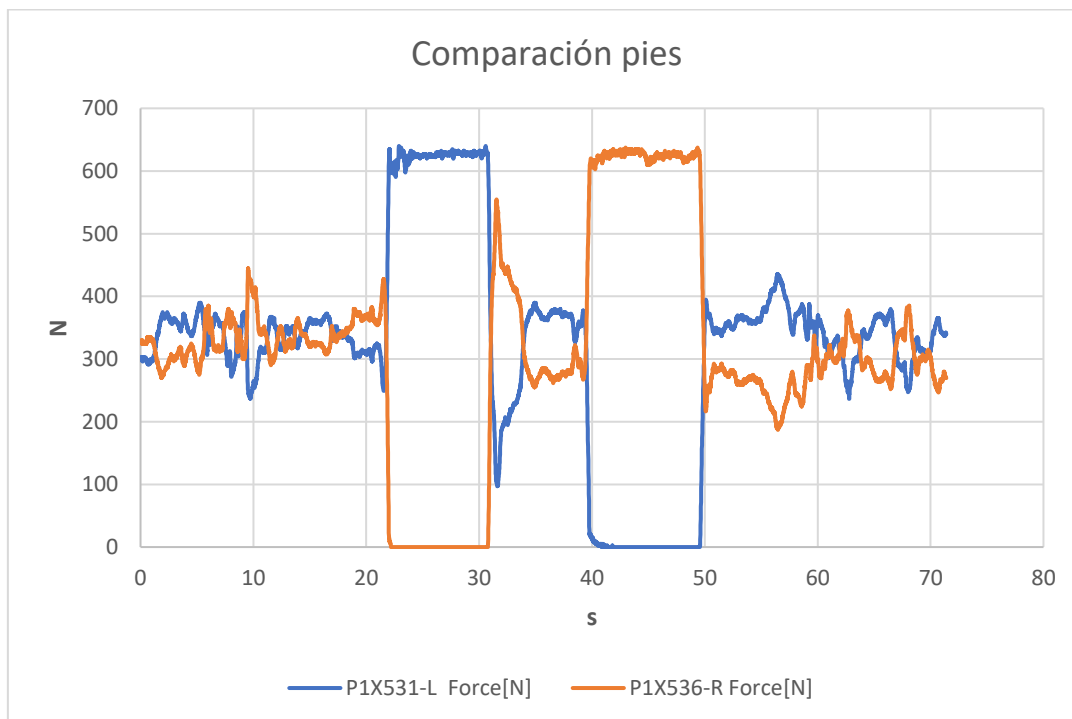


Figura 90. Grabación de pasos extraída a Excel

Donde P1X531-L es la plantilla del pie izquierdo indicado por esa L de Left representada en color azul y P1X536-R es la plantilla del pie derecho indicado por la R de Right representada en color azul.



En este gráfico vemos en los dos picos, en el primero he levantado el pie derecho y vemos que la plantilla del pie izquierdo se lleva toda la fuerza generada por mi masa. Lo mismo sucede en el otro pico donde el pie que se ha levantado es el izquierdo y de ahí que marque 0 y se lleve toda la fuerza el derecho.

ANEXO 3 - Validación Triangular Force Plate, TFP.

Para llevar a cabo la calibración de las plantillas vamos a compararlas con esta TFP (figura 3 y 4), por lo que primero debo ver la precisión de esta ya que está hecha de forma “casera” por lo que se va a comprobar que mida de manera correcta, para ello me ayudará de la herramienta Sirius-Dewesoft, un sistema de adquisición de datos a alta velocidad.

Para ello abrimos Dewesoft, creo un “new set up”, se mira el puerto que quieres usar, en nuestro caso el 14 ya que es al que tenemos conectado a través del cable la TFP y le pones “Used” ya que es el puerto que voy a usar (figura 91).

ID	Used	Name	Ampl. name	Range	Measurement	Min	Value	Max	Physical quantity	Units	Zero	Setup
A-1	Unused	AI A-1	DSI-ACC-0.18Hz	10000 mV	IEPE	-10000...	0,0	10000,00	Acceleration	m/s ²	Zero	Setup
A-2	Unused	AI A-2	DSI-ACC-0.18Hz	10000 mV	IEPE	-10000...	0,0	10000,00	Acceleration	m/s ²	Zero	Setup
A-3	Unused	AI A-3	DSI-ACC-0.18Hz	10000 mV	IEPE	-10000...	0,0	10000,00	Acceleration	m/s ²	Zero	Setup
A-4	Unused	AI A-4	DSI-ACC-0.18Hz	10000 mV	IEPE	-10000...	0,0	10000,00	Acceleration	m/s ²	Zero	Setup
A-5	Unused	AI A-5	DSI-ACC-0.18Hz	10000 mV	IEPE	-10000...	0,0	10000,00	Acceleration	m/s ²	Zero	Setup
A-6	Unused	AI A-6	DSI-ACC-0.18Hz	10000 mV	IEPE	-10000...	0,0	10000,00	Acceleration	m/s ²	Zero	Setup
A-7	Unused	AI A-7	DSI-ACC-0.18Hz	10000 mV	IEPE	-10000...	0,0	10000,00	Acceleration	m/s ²	Zero	Setup
A-8	Unused	AI A-8	DSI-ACC-0.18Hz	10000 mV	IEPE	-10000...	0,0	10000,00	Acceleration	m/s ²	Zero	Setup
A-9	Unused	AI A-9	DSI-ACC-0.18Hz	10000 mV	IEPE	-10000...	0,0	10000,00	Acceleration	m/s ²	Zero	Setup
A-10	Unused	AI A-10	DSI-ACC-0.18Hz	10000 mV	IEPE	-10000...	-0,1	10000,00	Acceleration	m/s ²	Zero	Setup
A-11	Unused	AI A-11	SRJUS-HD-STGS	10 V	Voltage	-10,00	-0,0892	10,00		V	Zero	Setup
A-12	Unused	AI A-12	SRJUS-HD-STGS	10 V	Voltage	-10,00	-0,1083	10,00		V	Zero	Setup
A-13	Unused	AI A-13	SRJUS-HD-STGS	10 V	Voltage	-10,00	-0,0273	10,00		V	Zero	Setup
A-14	Used	AI A-14	SRJUS-HD-STGS	2 mV/V	Bridge	-9760,35	1,8	9718,85	Force	N		Setup
A-15	Unused	AI A-15	DSI-ACC-0.18Hz	10000 mV	IEPE	-10000...	0,0	10000,00	Acceleration	m/s ²	Zero	Setup
A-16	Unused	AI A-16	DSI-ACC-0.18Hz	10000 mV	IEPE	-10000...	0,0	10000,00	Acceleration	m/s ²	Zero	Setup
B-1	Unused	AI B-1	SRJUS-ACC/2	10 V	Voltage	-10,00	0,0024	10,00		V	Zero	Setup
B-2	Unused	AI B-2	SRJUS-ACC/2	10 V	Voltage	-10,00	0,0025	10,00		V	Zero	Setup
B-3	Unused	AI B-3	SRJUS-ACC/2	10 V	Voltage	-10,00	0,0024	10,00		V	Zero	Setup
B-4	Unused	AI B-4	SRJUS-ACC/2	10 V	Voltage	-10,00	0,0026	10,00		V	Zero	Setup
B-5	Unused	AI B-5	SRJUS-ACC/2	10 V	Voltage	-10,00	0,0024	10,00		V	Zero	Setup
B-6	Unused	AI B-6	SRJUS-ACC/2	10 V	Voltage	-10,00	0,0024	10,00		V	Zero	Setup
B-7	Unused	AI B-7	SRJUS-ACC/2+	10 V	Voltage	-10,00	0,0026	10,00		V	Zero	Setup

Figura 91. Menú inicio DEWESoft

Posteriormente le das a “Setup” y configuras, en este caso en donde pone “Used sensor” ponemos “TFP (handcraft)” en el apartado “Range” ponemos 2 y en “Low-pass filter” 10Hz. En El gráfico que nos aparece en este menú podemos ver si está funcionando o no la TFP ya que si pisamos en ella se verá reflejado (figura 92).

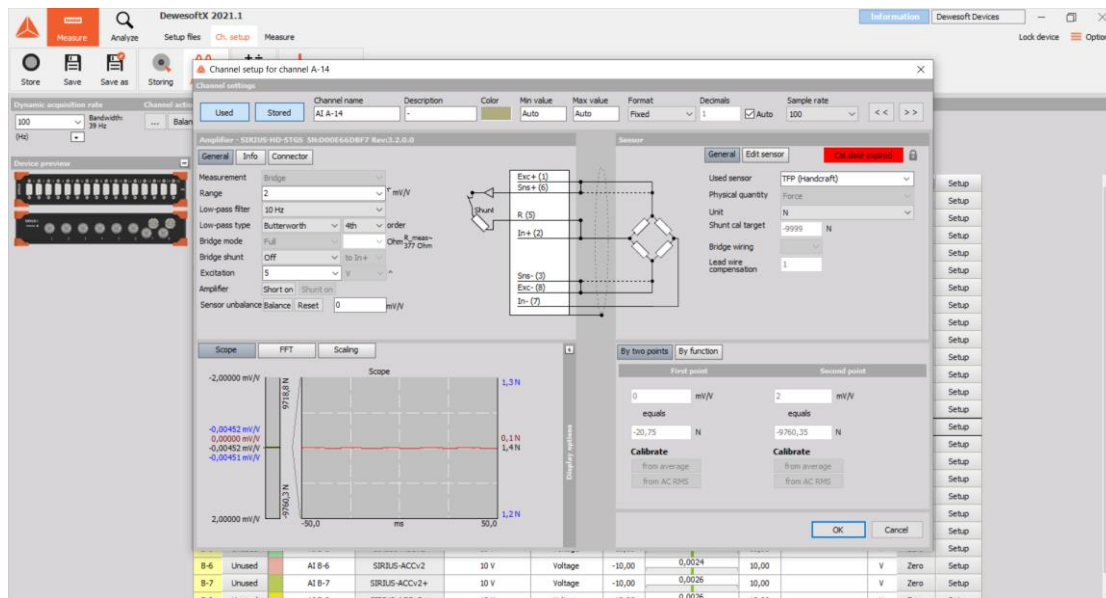


Figura 92. Menú Channel DEWESoft

Ya se está en condiciones de medir, para ello se daría a “Measure”. Se auto escala el eje Y para ello marcamos “Auto scale y”, también debemos marcar una frecuencia de muestreo de 100Hz ya que es la frecuencia de muestreo de las plantillas Loadsol, con las que posteriormente compararemos, para empezar a medir se da a “Store” y empezamos a subir placas de acero de 18,8 Kg de masa la primera, 19 Kg la segunda, 18,7 Kg la tercera y 18,9 Kg la cuarta, al acabar de subirla se para la medición dando otra vez a “Store”. Para exportar los datos de esa medida iremos a “Analyze”, buscas el nombre como lo hallas guardado al dar a “Store” y al pulsar sobre el nombre se nos abrirá el grafico que se haya obtenido y en la parte superior el apartado “Export” al cual se entrará y marcará en “Export type” “Excel” para luego poder manipularlo y representar lo obtenido, de esta forma si la TFP está bien calibrada quedará al hacer una representación en Excel a través de una regresión lineal una recta.

Al acabar de subir estos pesos a la TFP en DEWESoft obtenemos lo que se puede visualizar en la figura 93.

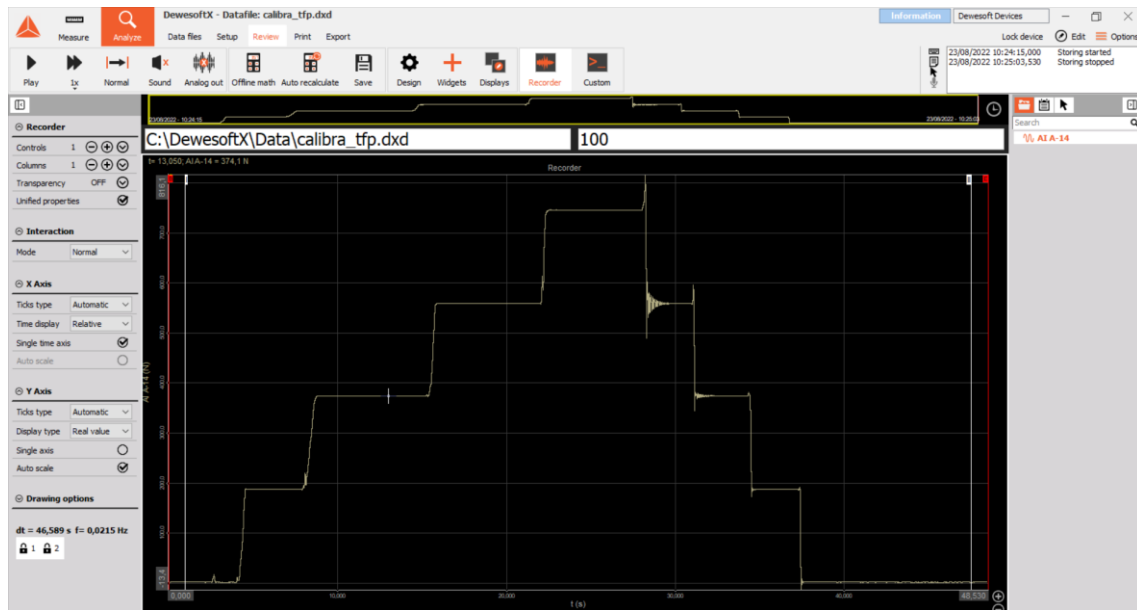


Figura 93. Gráfico TFP DEWESoft

Al exportar los datos a Excel tenemos la figura 94:

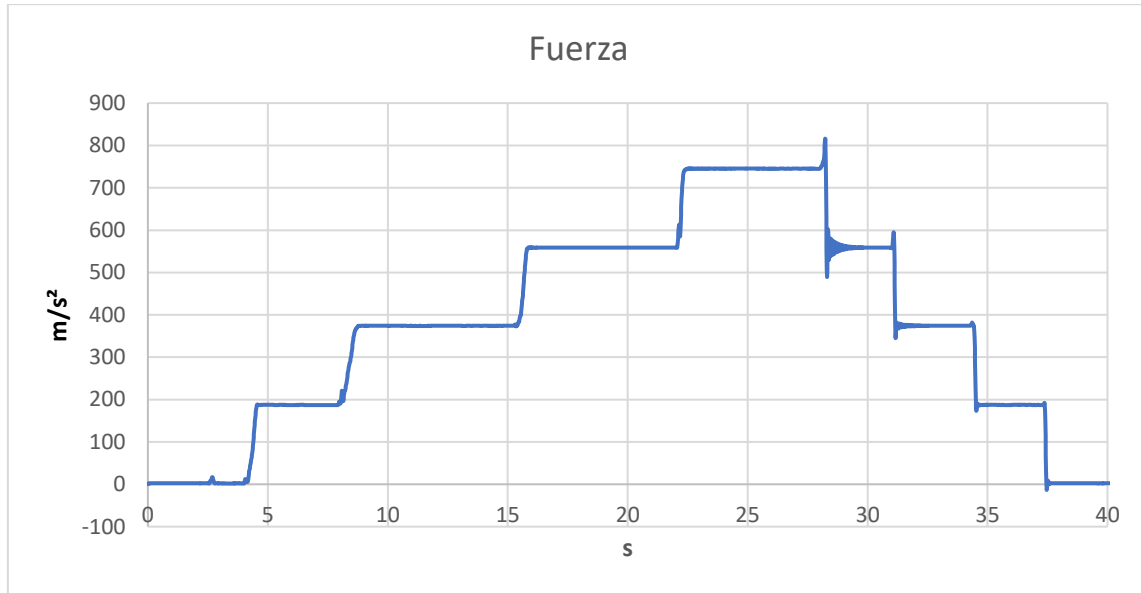


Figura 94. Gráfico TFP Excel

He llevado a cabo un promediado de los escalones que aparecen en la gráfica y posteriormente tras llevar a cabo la regresión lineal a través de Excel, vemos que los datos que nos aporta la TFP son fiables ya que los errores cometidos al haber subido los pesos son de alrededor al 1% (Tabla 6).

Tabla 6. Promedios y errores TFP DEWSoft

kg	Promedios [N]	DEWSoft [N]	Resta	Error
0	0	2.58	2.58	0.00%
18.8	184.35	187.25	2.89	1.57%
37.8	370.66	374.11	3.44	0.93%
56.5	554.03	558.89	4.85	0.88%
75.4	739.37	745.23	5.85	0.79%
56.5	554.03	558.74	4.70	0.85%
37.8	370.66	374.27	3.60	0.97%
18.8	184.35	187.36	3.00	1.63%
0	0	2.26	2.26	0.00%

Llevando a cabo una representación para ver la linealidad de las medidas obtenemos la figura 95:

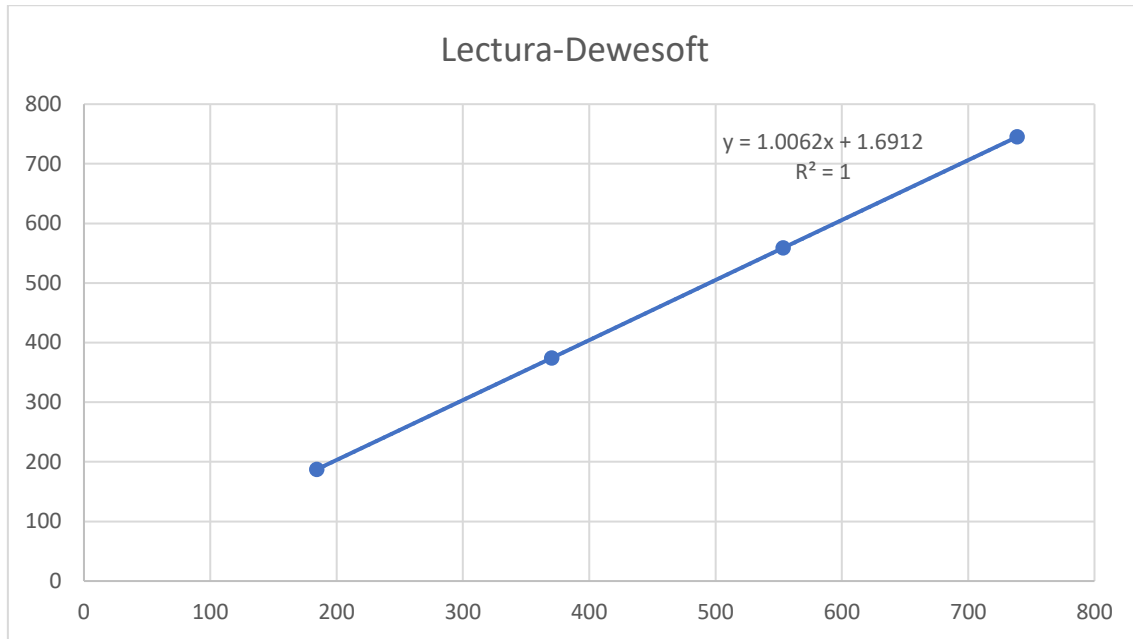


Figura 95. Representación linealidad TFP

Donde se puede observar que el $R^2=1$ por lo que sí que es lineal que es lo que buscamos y que tenemos un Offset de 1,69 lo cual es mínimo por lo que no es necesario corregirlo en Sirius-Dewesoft a la hora de llevar a cabo la calibración con las plantillas, en el caso de que fuera mayor se debería corregir ya que afectaría en nuestra calibración.

Por lo que se puede tomar como que lo que se mida con la TFP es fiable y lo tomaremos como referencia.

