



Universidad de Valladolid



ESCUELA DE INGENIERÍAS
INDUSTRIALES

UNIVERSIDAD DE VALLADOLID

ESCUELA DE INGENIERÍAS INDUSTRIALES

GRADO EN INGENIERÍA MECÁNICA

**Análisis experimental de la velocidad
de la marcha en las GRFs**

Autor:

Sánchez Martín, Juan Carlos

Tutores:

Lorenzana Ibán, Antolín
García Teran, José María
Área de Mecánica de los Medios
Continuos y Teoría de Estructuras

Valladolid, Julio 2022



Universidad de Valladolid



ESCUELA DE INGENIERÍAS
INDUSTRIALES

UNIVERSIDAD DE VALLADOLID

ESCUELA DE INGENIERÍAS INDUSTRIALES

GRADO EN INGENIERÍA MECÁNICA

Análisis experimental de la influencia
de la velocidad de la marcha en las
GRFs

Autor:

Sánchez Martín, Juan Carlos

Tutores:

Lorenzana Ibán, Antolín
García Teran, José María
Área de Mecánica de los Medios
Continuos y Teoría de Estructuras

Valladolid, Julio 2022

Agradezco la dedicación y ayuda prestadas por mis profesores Álvaro Magdaleno y Antolín Lorenzana.

Gracias a mi familia y a mis amigos, por apoyarme siempre en mis decisiones y acompañarme en estos años de carrera

RESUMEN

El “*Ground Reaction Forces*” (*GRF*) es la fuerza que ejerce el suelo sobre un cuerpo en contacto con él. Se basa en la tercera ley de Newton.

Cuando una persona está de pie sin movimiento, el GRF se corresponde con el peso de la persona. Cuando el cuerpo se mueve, el GRF varía debido a las fuerzas inerciales. Por ejemplo, mientras se corre, el GRF aumenta hasta dos o tres veces el peso corporal, estas fuerzas tienen un gran interés en el ámbito de la ingeniería, debido a su influencia en el estudio estructural dinámico de estructuras esbeltas, donde es fácil que los ocupantes induzcan vibraciones que pueden llegar a crear incomodidades a otros usuarios o incluso problemas estructurales debidos a la fatiga mecánica

El objetivo de este Trabajo Fin de Grado es el estudio de la influencia de las distintas variables en dichas fuerzas, ya sean puntos de fuerza máxima, tiempos, distancias... a medida que aumentamos la velocidad.

El proceso comienza con la recogida de datos experimentales, para lo que se han utilizado las plantillas instrumentadas *Loadsol*, y su correspondiente aplicación para smartphones, que permiten obtener ficheros de datos en formato ASCII con los valores de las fuerzas de cada pie. Posteriormente, mediante el sistema de análisis numérico MATLAB, se ha desarrollado un software para obtener los distintos datos de interés en cada medición.

PALABRAS CLAVE

Ground Reaction Forces (GRF), Plantillas instrumentadas, Velocidad, Pisada, Carga peatonal.

ABSTRACT

The "Ground Reaction Forces" (GRF) is the force exerted by the ground on a body in contact with it. It is based on Newton's third law.

When a person is standing motionless, the GRF corresponds to the person's weight. When the body moves, the GRF varies due to inertial forces. For example, while running, the GRF increases up to two or three times the body weight, these forces are of great interest in the field of engineering, due to their influence on the dynamic structural study of slender structures, where it is easy for the occupants induce vibrations that can create discomfort for other users or even structural problems due to mechanical fatigue

The objective of this Final Degree Project is to study the influence of the different variables on these forces, whether they are points of maximum force, times, distances... as we increase speed.

The process begins with the collection of experimental data, for which Loadsol instrumented insoles have been used, and their corresponding application for smartphones, which allow data files to be obtained in ASCII format with the values of the forces of each foot. Subsequently, using the MATLAB numerical analysis system, software has been developed to obtain the different data of interest in each measurement.

KEYWORDS

Ground Reaction Forces (GRF), Instrumented templates, Speed, Footfall, Pedestrian load.

INDICE

1. Introducción
 - 1.1 Biomecánica de la marcha humana
 - 1.2 Influencia de las GRFs en las estructuras
 - 1.3 Estado del arte
 - 1.3.1 Galgas extensiométricas
 - 1.3.1.1 Fundamento teórico
 - 1.3.1.2 Puente de Wheaststone
 - 1.3.2 Sensores capacitivos
 - 1.3.3 Pressure pads
 - 1.3.4 Force plates
 - 1.3.5 Instrumented treadmill
2. Adquisición de datos
 - 2.1 Cinta de correr
 - 2.2 Funcionamiento de las plantillas
 - 2.3 Precisión de las plantillas
 - 2.4 Toma de datos
 - 2.4.1 Ensayos caminando
 - 2.4.2 Ensayos corriendo
3. Procesado en MATLAB
 - 3.1 Procesado de datos caminando
 - 3.2 Procesado de datos corriendo
4. Análisis de resultados
 - 4.1 Análisis final de los ensayos caminando
 - 4.1.1 Análisis del primer máximo
 - 4.1.2 Análisis del mínimo central
 - 4.1.3 Análisis del segundo máximo
 - 4.1.4 Análisis de la duración
 - 4.1.5 Análisis de la predominancia del primer máximo sobre el segundo
 - 4.1.6 Análisis de la predominancia del máximo sobre el mínimo
 - 4.2 Análisis final de los ensayos corriendo
 - 4.2.1 Análisis del máximo
 - 4.2.2 Análisis de la duración
5. Líneas futuras

Índice de figuras

Figura 1: Fases de la pisada andando	2
Figura 2: Fases de la pisada corriendo	2
Figura 3: Descomposición vectorial de las fuerzas en la pisada. (Fuente: [9])	5
Figura 4: Esquema explicativo estado del arte (Fuente: [9])	6
Figura 5: Disposición Galgas extensiométricas (Fuente: [9])	7
Figura 6: Configuración galgas extensiométricas (Fuente: [9])	8
Figura 7: Puente de Wheatstone (Fuente: [9])	10
Figura 8: Preasure pads (Fuente: [9])	13
Figura 9: Conexión preasure pads (Fuente: [9])	13
Figura 10: Gráfica preasure pads (Fuente: [9])	14
Figura 11: Force plates (Fuente: [9])	15
Figura 12: Gráfica forcé plates (Fuente: [9])	16
Figura 13: Funcionamiento forcé plates (Fuente: [9])	17
Figura 14: Disposición forcé plates (Fuente: [9])	18
Figura 15: Conexiones forcé plates (Fuente: [9])	18
Figura 16: Dimensiones forcé plates (Fuente: [9])	19
Figura 17: Disposición pisadas (Fuente: [9])	20
Figura 18: Instrumented threadmill (Fuente: Bertec)	21
Figura 19: Compact Tandem Force-Sensing Treadmill (Fuente: Amti)	21
Figura 20: Cinta de correr (Fuente: SALTER)	22
Figura 21: Sensor (Fuente: Novel electronics)	23
Figura 22: colocación de la plantilla (Fuente: Novel electronics)	24
Figura 23: Configuraciones Loadsol (Fuente: Novel electronics)	25
Figura 24: Pantalla aplicación	26
Figura 25: Configuración plantillas app	26
Figura 26: Configuración app	27
Figura 27: Configuración app	27
Figura 28: Precision loadsol (Fuente: Novel electronics)	29
Figura 29: Medida 3 Km/h	30
Figura 30: Medida 4 Km/h	31
Figura 31: Medida 5 Km/h	31
Figura 32: Medida 6 Km/h	32
Figura 33: Medida 7 Km/h	32
Figura 34: Medida 8 Km/h	33
Figura 35: Medida 9 Km/h	33
Figura 36: Medida 7 Km/h	34
Figura 37: Medida 8 Km/h	35
Figura 38: Medida 9 Km/h	35
Figura 39: Medida 10 Km/h	36
Figura 40: Medida 12 Km/h	36
Figura 41: Medida 14 Km/h	37
Figura 42: Medida 16 Km/h	37
Figura 43: Fases código MATLAB	38
Figura 44: Datos obtenidos con la app	40
Figura 45: Datos modificados	40
Figura 46: Código 1	41

Figura 47: Código 2	41
Figura 48: Gráfico total andando	42
Figura 49: Código 3	43
Figura 50: Gráfico cortado andando	44
Figura 51: Código 4	45
Figura 52: Código 5	45
Figura 53: Pasos agrupados andando	46
Figura 54: Código 6	46
Figura 55: Pasos colocados andando	47
Figura 56: Código 7	47
Figura 57: Pre-eliminación pasos atípicos	48
Figura 58: Diagrama caja y bigotes (Fuente: Wikipedia)	48
Figura 59: Ubicación máximos y mínimos andando	49
Figura 60: Eliminación total de valores atípicos andando	50
Figura 61: Pasos finales andando	50
Figura 62: Paso modelo andando	51
Figura 63: Gráfico total corriendo	52
Figura 64: Grafico cortado corriendo	52
Figura 65: Pasos agrupados corriendo	53
Figura 66: Pasos colocados corriendo	53
Figura 67: Ubicación máximos corriendo	54
Figura 68: Eliminación valores atípicos corriendo	54
Figura 69: Pasos finales corriendo	55
Figura 70: Paso modelo corriendo	55
Figura 71: Variación de las GRF andando	56
Figura 72: Variación de las GRF corriendo	57
Figura 73: Variación GRFs andando	58
Figura 74: Datos velocidades andando	59
Figura 75: Puntos de interés andando	59
Figura 76: Evolución primer máximo andando	60
Figura 77: Evolución mínimo andando	61
Figura 78: Evolución segundo máximo andando	62
Figura 79: Otros puntos de interes andando	63
Figura 80: Evolución duración andando	64
Figura 81: Evolución predominancia primer máximo andando	65
Figura 82: Evolución max/min andando	66
Figura 83: Variación GRF corriendo	67
Figura 84: Datos velocidades corriendo	67
Figura 85: Puntos de interés corriendo	68
Figura 86: Evolución máximo corriendo	68
Figura 87: Evolución duración corriendo	69

1. INTRODUCCIÓN

1.1. BIOMECÁNICA DE LA MARCHA HUMANA

El ciclo de la marcha humana es un proceso de locomoción en el que el cuerpo humano se mueve generalmente hacia delante, soportando su peso alternativamente sobre sus dos miembros inferiores para lograr mantener el equilibrio mediante la actividad muscular. Esta sucesión de movimientos permite desplazar nuestro centro de gravedad.

El ciclo se define como el periodo temporal entre dos eventos idénticos, en este caso, vamos a poner como punto de inicio el instante de contacto con el suelo de un pie, y como punto final, el siguiente instante de contacto del mismo pie, aunque al ser un movimiento cíclico, cualquier instante podría ser determinado como el comienzo.

La marcha humana puede dividirse en dos fases o periodos principales distinguibles:

- Fase de apoyo: periodo del tiempo en el que el pie se encuentra en contacto con el suelo, normalmente, se inicia con el apoyo del talón y finaliza con el despegue de la punta, pero a la hora de correr existen diferentes técnicas de carrera que varían estas posiciones.
- Fase de balanceo: periodo de tiempo en el que el pie está en el aire.

La duración de estas fases depende principalmente de la velocidad, a mayor velocidad el tiempo de contacto entre el pie y el suelo es menor.

Al andar existe un periodo de tiempo en el que los dos pies están en contacto con la superficie del suelo de forma simultánea, este periodo de tiempo se denomina fase de apoyo bipodal (Ver Figura 1), y aparece en dos ocasiones a lo largo de un ciclo completo. Al igual que la duración de la fase de apoyo, este periodo disminuye rápidamente al aumentar la velocidad.

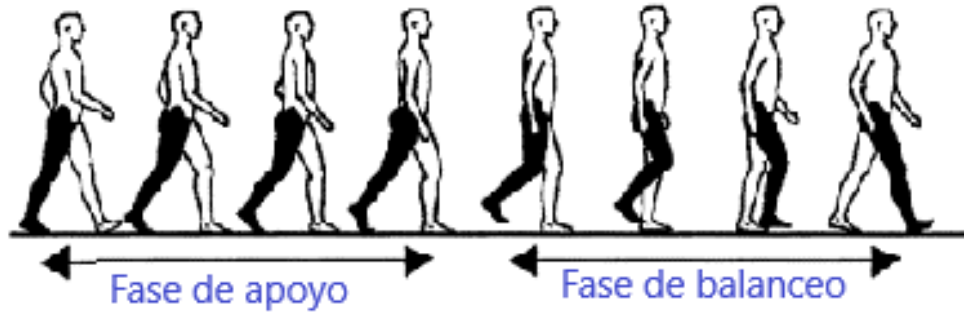


Figura 1: Fases de la pisada andando

Al correr, al contrario que al andar, existe un periodo de tiempo en el que los dos pies están en el aire de forma simultánea, este periodo de tiempo se denomina fase de vuelo o suspensión (Ver figura [2]), y aparece en dos ocasiones a lo largo de un ciclo completo, al aumentar la velocidad y por consiguiente disminuir la fase de apoyo, la duración de este periodo se aumenta.

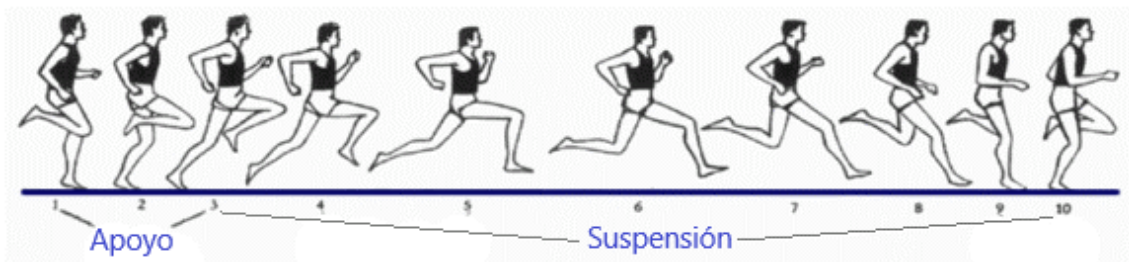


Figura 2: Fases de la pisada corriendo

Las fuerzas ejercidas en estos dos tipos de movimientos comúnmente desarrollados por la actividad humana cotidiana tienen un carácter altamente estocástico y aleatorio, lo que provoca que estas cambien en el tiempo y espacio de manera impredecible, por lo que incluso para una misma persona es prácticamente imposible realizar dos pasos exactamente idénticos [1].

El carácter tan aleatorio de estos ejercicios viene ocasionado por la influencia de incontables variables en el proceso, algunas son muy obvias como la frecuencia de paso o la velocidad, y otras no lo son tanto, como la vestimenta del individuo o la temperatura del ambiente.

Las variables más influyentes son:

- Frecuencia de paso: la frecuencia, normalmente medida en ppm (pasos por minuto) determina el número de pasos, tanto del pie izquierdo como del derecho que se dan en un minuto, es el parámetro más importante, ya que determina el inverso del tiempo entre pasos.
- Longitud de paso: normalmente medida en metros es la distancia entre la posición del impacto del primer talón hasta la posición del impacto del talón del otro pie, también existe la longitud de zancada, que corresponde con la distancia entre la posición de impacto del talón en dos instantes consecutivos para el mismo pie.
- Velocidad: la velocidad de marcha, normalmente medida en km/h es la relación entre la distancia recorrida por el individuo y el tiempo empleado en recorrer dicha distancia, para el estudio de velocidades medias en el ámbito del deporte también suele usarse la medida de min/km.

Estas tres variables, están relacionadas entre sí, ya que, si aumenta la frecuencia de paso y se mantiene la longitud de paso, aumenta la velocidad, y si, por el contrario, aumentamos la frecuencia de paso y mantenemos la velocidad constante, la longitud de paso se ve reducida.

En nuestro estudio, analizaremos con detenimiento la influencia de la Velocidad en las *Ground Reaction Forces (GRF)*, se conoce como GRF a las fuerzas de reacción entre el pie y la superficie donde camina o corre, la aparición de esta fuerza se determina con las tres leyes de Newton:

- 1- Primera ley de Newton: Todo cuerpo continúa en su estado de reposo o movimiento uniforme rectilíneo, a no ser que sea obligado a cambiar su estado por fuerzas impresas sobre él.
- 2- Segunda ley de Newton: El cambio de movimiento es directamente proporcional a la fuerza motriz impresa y ocurre según la línea recta a lo largo de la cual aquella fuerza se imprime.

- 3- Tercera ley de Newton: Con toda acción ocurre siempre una reacción igual y contraria: quiere decir que las acciones mutuas de dos cuerpos siempre son iguales y dirigidas en sentido opuesto.

En nuestro caso de estudio, las leyes que tienen más importancia son la segunda y la tercera, en especial la tercera, la también llamada ley de “acción y reacción”, esta aparece de forma constante al realizar la marcha humana, ya que, en cada pisada, el cuerpo ejerce una fuerza sobre la superficie, y este ejerce la misma fuerza, pero de sentido opuesto sobre nuestro cuerpo para que este no se hunda o incluso quede suspendido en el aire en el caso de que estemos corriendo.

$$\vec{F}_{12} = -\vec{F}_{21}$$

Al caminar, nosotros “empujamos” el suelo hacia atrás, por lo que el suelo, ejerce la misma fuerza y de sentido contrario, “empujándonos” hacia adelante, es aquí donde aparecen las componentes horizontales de las GRF, que gracias a la fuerza de rozamiento y a la segunda ley de Newton hacen que el cuerpo adquiera una aceleración.

$$\sum \vec{F} = m\vec{a} = m \frac{d\vec{v}}{dt}$$

Como podemos ver, la fuerza tiene tres componentes (Ver figura [3]), representadas en los tres ejes cartesianos (x, y, z), y se denomina Ground Reacion Force al vector resultante de la suma de dichas componentes (ref. [2]).

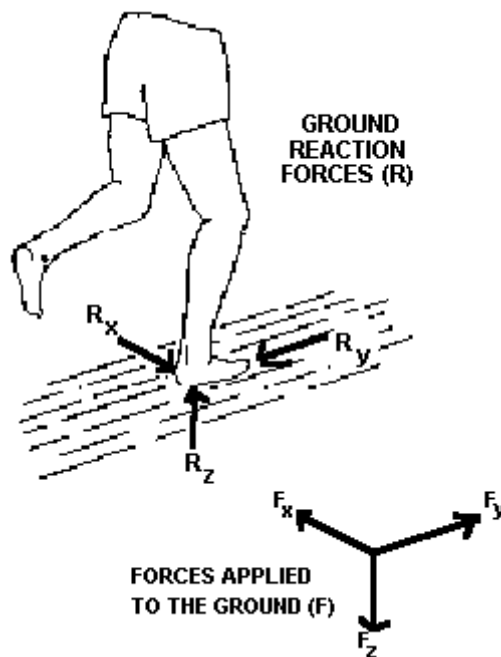


Figura 3: Descomposición vectorial de las fuerzas en la pisada. (Fuente: Wikipedia)

Como podemos intuir, para una marcha normal, las fuerzas que se sitúan en el plano de apoyo horizontal (F_x , F_y), son despreciables frente a la componente vertical F_z , ya que es la encargada de soportar el peso corporal, junto con las fuerzas de inercia, por lo que esta, es del orden de entre 10 y 100 veces mayor a las otras, por lo que la mayoría de los aparatos de medida, solo tienen en cuenta la componente vertical, como ocurre en nuestro estudio (ref. [3]).

La mayoría de los aparatos de medida que solo tienen en cuenta la componente vertical de la fuerza, representan los datos medidos en una gráfica, en la que el eje de abscisas representa el tiempo y el eje de las ordenadas representa la fuerza medida en cada instante.

1.2. INFLUENCIA DE LA MARCHA HUMANA EN LAS ESTRUCTURAS

Aunque estas fuerzas pueden parecer insignificantes a la hora del diseño de una estructura, pueden provocar vibraciones, ya que generan un rango de frecuencias que puede coincidir con la frecuencia de excitación de un puente o un edificio, provocando la incomodidad de los habitantes, por lo tanto, para el diseño estructural, se necesita tener en cuenta dichas fuerzas ejercidas por distintos tipos de personas, distintas formas de caminar o correr, distintas velocidades...

1.3 ESTADO DEL ARTE

El estado del arte se refiere a la investigación técnica, científica e industrial y, está relacionado con el estado de una determinada tecnología (Ver figura [4]). Lo más innovador o reciente con respecto a un arte específico.



Figura 4: Esquema explicativo estado del arte (Fuente: Wikipedia)

Se puede definir, como un estudio de investigación en el que se trata una compilación de los resultados de las investigaciones similares recientes respecto al tema de estudio. En el área de los estudios académicos, esa labor de investigación documental consiste en recopilar fuentes, ideas, conceptos, opiniones que luego se puedan comparar con otras. Obviamente el objetivo es la capacidad de aportar información relevante, que se posicione a la vanguardia de las fuentes ya previamente consultadas. Este

tipo de metodología de investigación es más común en los estudios propiamente de especialización o doctorales, pero también en trabajos de Postgrado y otras áreas como la música o la filosofía.

En nuestro caso de estudio, nos vamos a centrar en los aparatos de medida de las *Ground Reaction Forces*, existes distintos instrumentos y maquinas comerciales para realizar esta tarea.

Los requisitos necesarios para el buen funcionamiento de estos son la precisión, la resolución y la usabilidad, el funcionamiento se basa en una medida continua del peso de nuestro cuerpo, es decir, si una persona esta quieta, las GRF medirán su peso corporal, pero si esta está en movimiento, a este peso corporal se le suman las fuerzas de inercia y de reacción debidas al empuje del suelo.

1.3.1 GALGAS EXTENSIOMETRICAS

1.3.1.1 Fundamento teórico de las Galgas extensiométricas

Los distintos dispositivos de medida de las GRF que veremos posteriormente basan su funcionamiento en una serie de Galgas extensiométricas, estas son elementos transductores, que son capaces de modificar sus propiedades eléctricas cuando se aplican esfuerzos mecánicos sobre ellas (ref. [4]).

Estas se forman de un hilo conductor (normalmente de unas 10 a 20 ramas), que depende de su posición es capaz de detectar las distintas cargas ejercidas sobre ella, superponiendo varias galgas con distintas orientaciones (Ver figura [5]), somos capaces de obtener el tensor de tensiones completo en dicho punto.

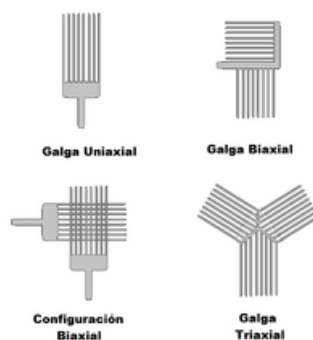


Figura 5: Disposición Galgas extensiométricas (Fuente: Wikipedia)

Para poder explicar su funcionamiento de forma sencilla vamos a tomar como ejemplo la Galga uniaxial.

Su funcionamiento se basa principalmente en los esfuerzos de flexión para poder determinar la fuerza vertical aplicada, el hilo conductor se fija sobre el elemento deformable (mediante un soporte aislante) (Ver figura [6]), sobre el que ejerceremos la fuerza en la dirección deseada, al ser elementos solidarios, al aplicar la fuerza, la galga se deformara en la dirección requerida.

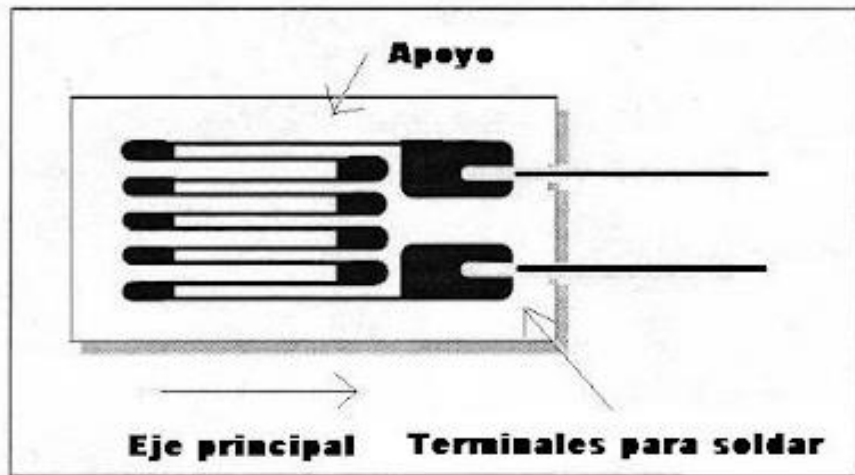


Figura 6: Configuración galgas extensiométricas (Fuente: Wikipedia)

Al recibir el esfuerzo mecánico, las galgas, debidamente orientadas, experimentan una deformación axial, la cual provoca las siguientes modificaciones en sus características eléctricas:

- Resistencia Interna R
- Longitud del hilo l
- Sección del hilo S
- Resistividad ρ

La resistencia eléctrica para un conductor cilíndrico de sección S , longitud l y resistividad ρ , puede expresarse como:

$$R = \rho \frac{l}{S}$$

Sabiendo que la galga está compuesta de una rejilla de entre 10 y 20 hilos, podemos calcular l como número de hilos n por longitud de la galga L :

$$R = \rho n \frac{L}{S}$$

Teniendo en cuenta la variación de dichas variables:

$$\frac{dR}{R} = \frac{dL}{L} - \frac{dS}{S} + \frac{d\rho}{\rho}$$

Para una galga rectangular ($h \times b$), la variación de su sección será aproximadamente proporcional a la variación de la sección unitaria del hilo, y puede definirse como:

$$\frac{dS}{S} = \frac{dh}{h} + \frac{db}{b} = -2\nu \frac{dL}{L}$$

Siendo ν el coeficiente de *Poisson* (aproximadamente 1)

La ley de *Bridgman* nos explica que, para una galga, la variación diferencial de volumen es proporcional a la variación diferencial de su resistividad, por lo que para nuestro caso:

$$\frac{d\rho}{\rho} = c \frac{dV}{V}$$

Siendo c la constante de *Bridgman* (aproximadamente 1,14 en el caso de las galgas)-

La deformación unitaria de volumen de la galga puede definirse como:

$$\frac{dV}{V} = \frac{dL}{L} + \frac{dS}{S} = (1 - 2\nu) \frac{dL}{L}$$

Juntando todas las anteriores expresiones, llegamos a la fórmula general de las galgas, donde la constante K_g es el factor de la galga, el cual depende de cada fabricante (normalmente $K_g=2$) y donde la deformación axial de la galga es igual a la variación unitaria de su longitud.

$$\frac{dR}{R} = [1 + 2\nu + c(1 - 2\nu)] \frac{dL}{L} = K_g \frac{dL}{L} = K_g \varepsilon$$

Por lo que podemos ver, la resistividad de la galga es proporcional a la variación de la longitud, dependiendo del orden de dicha variable K_g .

1.3.1.2 Puente de Wheatstone

Una vez determinada la resistividad de nuestra galga y conocida su variación con respecto a la carga aplicada sobre ella, podemos emplearla en un circuito comparador de tensión, también llamado Puente de Wheatstone.

El Puente de Wheatstone es un circuito formado por cuatro resistencias. Este circuito se compone de 4 resistencias, separadas en dos ramas, dos a dos (Ver figura [7]), al que alimentamos con un voltaje de entrada, y donde será medida la caída de potencial en el punto medio de cada rama, es un circuito muy utilizado para medir señales eléctricas resultado de medidas físicas (ref. [5]).

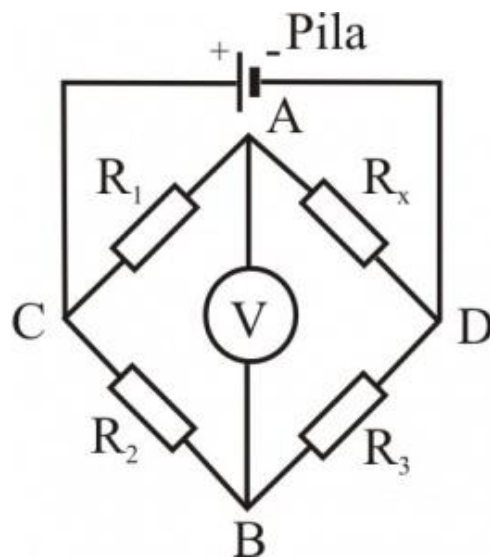


Figura 7: Puente de Wheatstone (Fuente: Wikipedia)

Analizando el circuito:

$$I_1 R_1 = I_4 R_4$$

Sabiendo que:

$$I_1 = \frac{V_{in}}{R_1 + R_2}$$

$$I_4 = \frac{V_{in}}{R_3 + R_4}$$

Igualando las anteriores expresiones, obtenemos la ecuación de equilibrio:

$$\frac{R_1}{R_1 + R_2} = \frac{R_4}{R_3 + R_4}$$

Simplificando:

$$\frac{R_2}{R_1} = \frac{R_3}{R_4}$$

Por otro lado, tenemos:

$$V_{out} = I_1 R_1 - I_4 R_4 = \left(\frac{R_1}{R_1 + R_2} - \frac{R_4}{R_3 + R_4} \right) V_{in}$$

Derivando la expresión anterior:

$$dV_{out} = \left[\frac{R_1 R_2}{(R_1 + R_2)^2} \left(\frac{dR_1}{R_1} - \frac{dR_2}{R_2} \right) - \frac{R_3 R_4}{(R_3 + R_4)^2} \left(\frac{dR_3}{R_3} - \frac{dR_4}{R_4} \right) \right] V_{out}$$

Simplificando:

$$dV_{out} = \left[\frac{R_1 R_2}{(R_1 + R_2)^2} \left(\frac{dR_1}{R_1} - \frac{dR_2}{R_2} + \frac{dR_3}{R_3} - \frac{dR_4}{R_4} \right) \right] V_{out}$$

Empleando la nomenclatura del apartado anterior para el funcionamiento de una galga extensiométrica, tenemos:

$$dV_{out} = \left[\frac{R_1 R_2}{(R_1 + R_2)^2} K g (\varepsilon_1 - \varepsilon_2 + \varepsilon_3 - \varepsilon_4) \right] V_{out}$$

Suponiendo que tenemos el mismo Kg en las dos ramas, podemos observar que la tensión de salida, varía de manera lineal con la deformación axial diferencial de cada galga.

1.3.2 Sensores capacitivos

Los sensores capacitivos de presión funcionan gracias al principio de un condensador de placas ideal, donde una de las placas es el sensor y la otra placa, es el objeto de medición opuesto, cuando se ejerce cierta presión, se genera un campo eléctrico entre las placas, un anillo protector alrededor de

la estructura garantiza que el campo eléctrico sea lo más homogéneo posible.

Las dos placas acumulan una cantidad de carga (Q) la cual, se puede relacionar con la tensión eléctrica (U) mediante la capacitancia:

$$C = \frac{Q}{U}$$

La cantidad de carga del sensor capacitivo depende del tamaño de sus placas (A), así como del material dieléctrico alojado entre las placas, la tensión, es inversamente proporcional a la distancia entre ambas placas (d), por lo que tenemos:

$$C = \frac{eA}{d}$$

Siendo e la constante dieléctrica del material.

Al ejercer cierta presión, el material dieléctrico alojado entre las placas se deformará, haciendo así que la distancia entre las placas disminuya, pudiendo así cuantificar la presión ejercida mediante la variación en la tensión entre las placas.

1.3.3 Pressure pads

Las “*pressure pads*” o “placas de presión” son el instrumento más sencillo de los que estudiaremos a continuación, como su propio nombre indica, consiste en una almohadilla que es capaz de capturar la presión que se ejerce sobre ella de forma continuada (Ver figura [8]).



Figura 8: Pressure pads (Fuente: Wikipedia)

En su interior, existe una determinada cantidad de sensores piezoeléctricos distribuidos uniformemente en el área de la placa para captar la presión en los distintos puntos, estas suelen tener una dimensión aproximada de $450 \times 375 \text{ mm}^2$ y un espesor de entre 5 y 10 mm, las placas alcanzan un rango de presiones admitidas desde 350 hasta 850 kPa, y frecuencias de hasta los 100 Hz, pero tienen la ventaja de que son capaces de realizar un mapeo de la presión de la presión ejercida en los distintos puntos, medida por cada sensor piezoeléctrico, mostrando los resultados en una distribución por colores gracias a un software adecuado (Ver figura [9]).

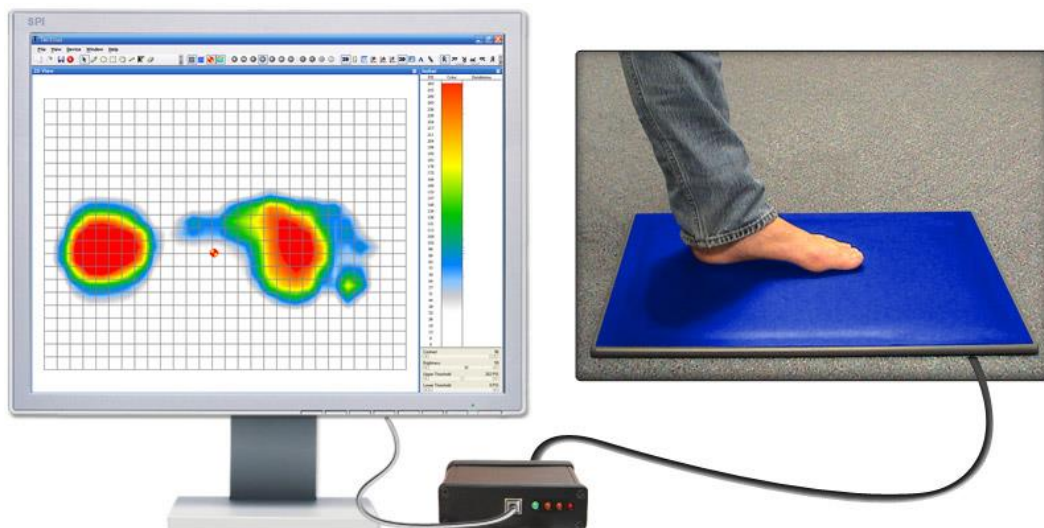


Figura 9: Conexión pressure pads (Fuente: Wikipedia)

La marca comercial más conocida en vender estos dispositivos es Tekscan, ubicada en el distrito de innovación de Boston, fabricando dispositivos de medición desde 1987, el software actual de los dispositivos de Tekscan crea la siguiente representación de fuerzas:

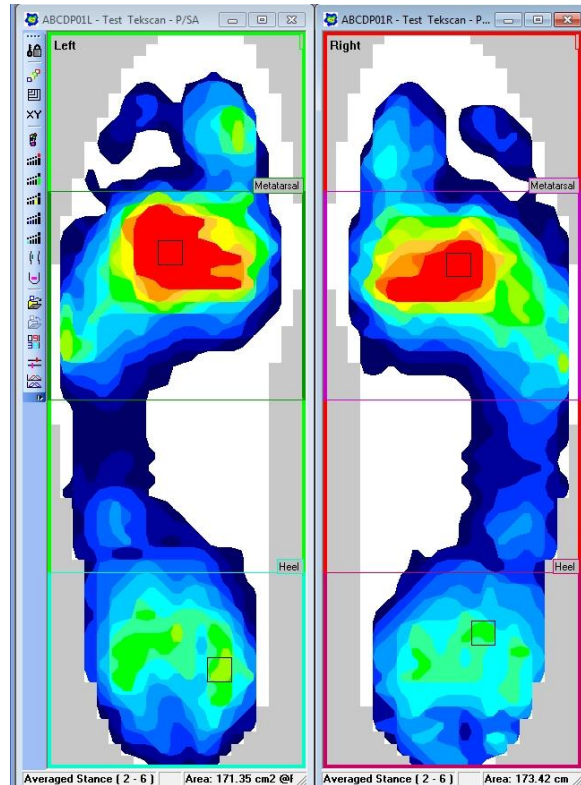


Figura 10: Gráfica pressure pads (Fuente: Wikipedia)

Estos dispositivos, tienen la ventaja de poder estudiar con más detenimiento la distribución de fuerzas en un instante concreto (Ver figura [10]), permitiendo calcular el centro de presiones del pie (CoP), ubicar el punto de máxima fuerza de impacto o medir la presión media de la pisada, son muy útiles para estudiar medidas estáticas y corregir errores en la pisada al detectar los puntos de presión máxima, pero el principal inconveniente de este tipo de dispositivos, es el de no poder utilizarlas para medir una marcha de pasos ininterrumpidos, por lo que no nos sirven para nuestro estudio.

1.3.4 Force Plates

Las “Force Plates” o “plataformas de fuerza” son instrumentos de medida que permiten medir momentos ejercidos sobre los tres ejes (x,y,z) (Ver figura [11]) , estas son utilizadas para medir las fuerzas en movimientos cuasiestáticos y dinámicos, para obtener datos biomecánicos en ejercicios cotidianos como andar, correr, saltar...



Figura 11: Force plates (Fuente: Wikipedia)

El software más utilizado en este tipo de dispositivos es BioWare, el cual proporciona las siguientes características:

- Medición de fuerzas, momentos, centro de presión (COP), coeficiente de fricción (COF) en diferentes representaciones
- Exportación e importación de datos en varios formatos, intervalo de tiempo de datos y fusionar
- Funciones en tiempo real (fuerzas, vector 3D, COP)
- Estadísticas completas, funciones de cursor, normalizaciones

- Control remoto de amplificador completo, disparadores de entrada y salida (TTL), antes y después del disparo
- Amplio procesamiento de señales digitales: filtros digitales, frecuencia análisis (FFT), remuestreo, muestreo y retención de software (SSH), algoritmo de mejora de COP

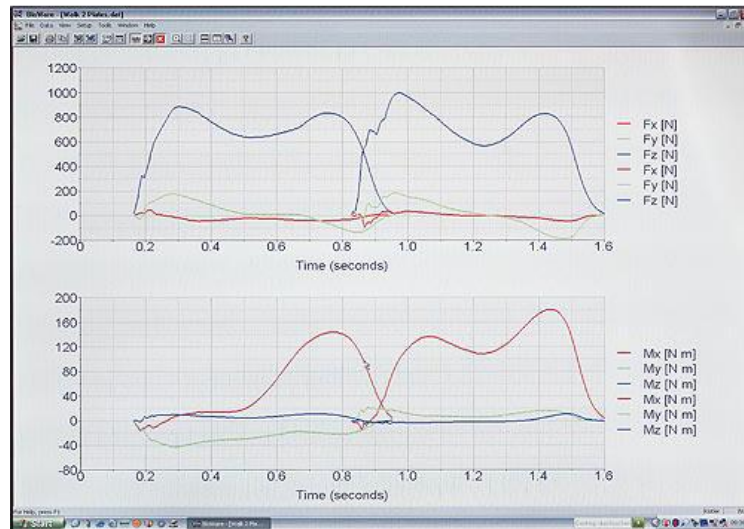


Figura 12: Gráfica forcé plates (Fuente: Wikipedia)

Estas plataformas pueden ser utilizadas para medir una marcha colocándolas en serie de forma consecutiva, también pueden utilizarse de forma individual para hacer distintas mediciones estáticas (Ver figura [12]), los materiales más utilizados para la fabricación de estas son el aluminio y el vidrio, que junto con sus 4 sensores piezoeléctricos son capaces de analizar las fuerzas recibidas.

Algunos modelos de este tipo de dispositivos, aparte de sensores piezoeléctricos, también cuentan con una serie de galgas extensiométricas, las cuales permiten determinar las 3 componentes cartesianas, así como los momentos de la fuerza ejercida con una gran precisión (Ver figura [13]).

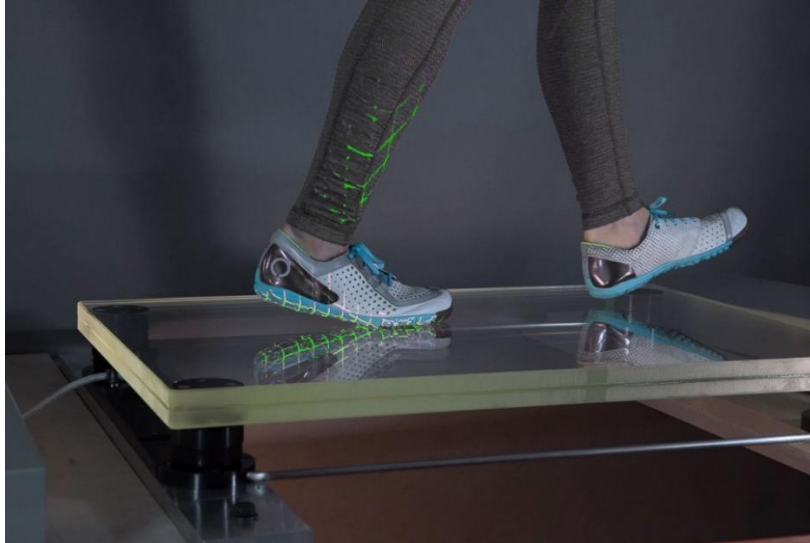


Figura 13: Funcionamiento forcé plates (Fuente: Wikipedia)

Este aparato de medida es capaz de registrar medidas de fuerzas muy pequeñas, lo cual amplía el rango de experimentos y aplicaciones de estas, como, por ejemplo, analizar la marcha de distintos animales o niños.

Estas plataformas también cuentan con una gran fiabilidad y exactitud.

Como desventajas, cabe destacar la complejidad de configuración a la hora de medir una marcha larga, ya que harían falta una gran cantidad de dispositivos, lo cual implica un gran coste económico (Ver figura [14]).

Esta desventaja, es por lo que normalmente, las *Force plates* suelen ser utilizadas para medir una sola pisada, siendo necesario solo un dispositivo.

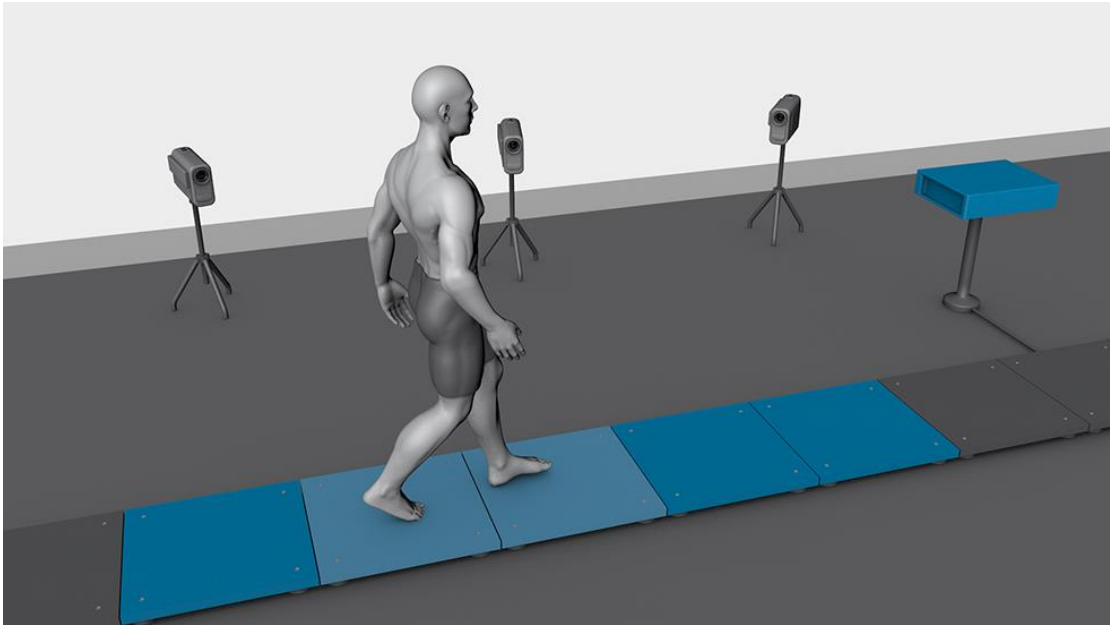


Figura 14: Disposición forcé plates (Fuente: Wikipedia)

Una de las empresas más importantes en vender este tipo de aparatos de medida, es la denominada Kistler, la cual también comercializa dispositivos de adquisición de datos como los siguientes (Ver figura [15]):



Figura 15: Conexiones forcé plates (Fuente: Wikipedia)

También existen otros fabricantes como Tec Gihan, el cual nos proporciona planos de dimensiones y configuración en todos sus dispositivos, en los que se puede observar donde están colocados los sensores (Ver figura [16]):

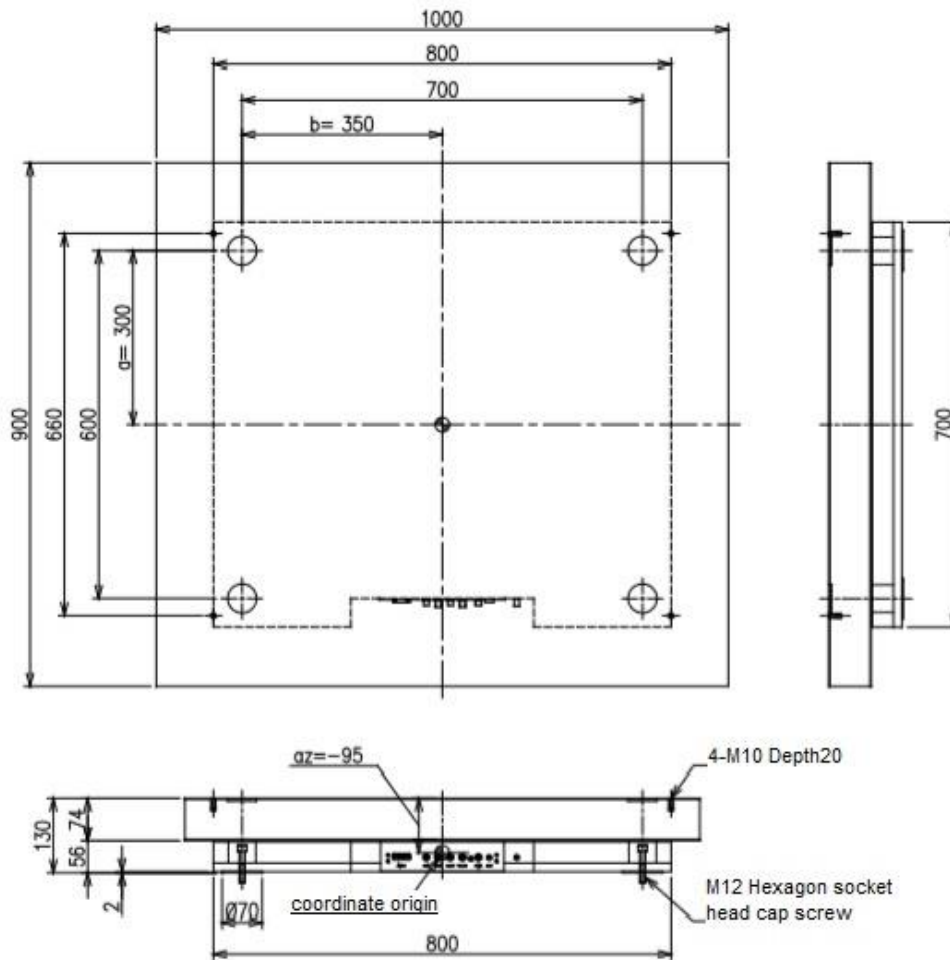


Figura 16: Dimensiones forcé plates (Fuente: Wikipedia)

1.3.5 Instrumented treadmill

El instrumento más interesante en relación con nuestro estudio sería la cinta de correr instrumentada, también llamada *"Instrumented Treadmill"*, esta permite obtener datos de una marcha de forma continua ya sea corriendo o andando, con un rango de velocidades comprendidas entre 0.1 km/h y 10 km/h. Su diseño consiste en una doble correa para poder medir la fuerza de los pies por separado (Ver figura [17]), esto no tiene inconvenientes al andar, pero al correr, hay que tener cuidado de realizar las pisadas en la zona correcta ya que, en una marcha rápida, las pisadas suelen centrarse en una línea recta para evitar los desequilibrios (ref. [6]).

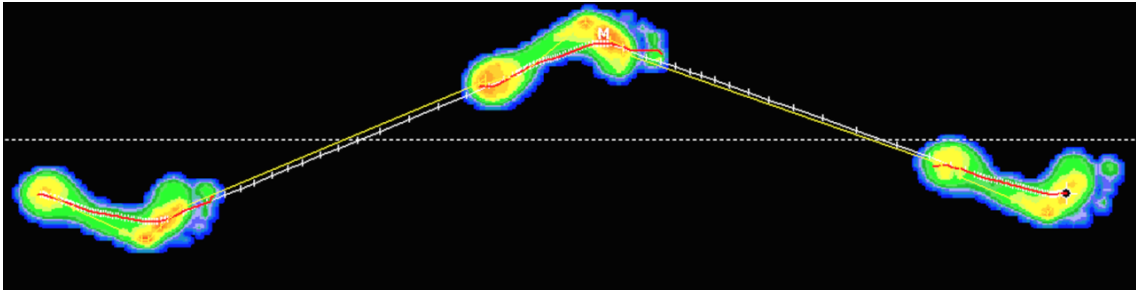


Figura 17: Disposición pisadas (Fuente: Wikipedia)

Las principales ventajas de las cintas de correr instrumentada son las siguientes:

- Control de movimiento independiente en cada correa, lo que permite distintas aplicaciones de comparación.
- Control muy exacto sobre la velocidad, haciendo que la variación de frecuencia de pisada y la distancia de esos pasos sea mínima.
- Inexistencia de inestabilidades en la cinta.
- Alta precisión y fiabilidad.
- Facilidad de control, configuración e integración.
- Rapidez en recolección de datos.
- Espacio reducido
- Posibilidad de agregar pendiente positiva o negativa

Las dimensiones habituales de estos dispositivos asemejan bastante las de una cinta de correr convencional rondando el 1.50m de largo por 0.50m de ancho y con un motor de una potencia de unos 2 kW, algo menor que una cinta de correr común, ya que no está pensado para altas velocidades. Estas cintas, emplean galgas extensiométricas para poder medir las fuerzas ejercidas, las cuales mediante distintos aparatos electrónicos son recibidas en el software correspondiente.

La empresa líder en la fabricación de estos dispositivos es “Bertec”, empresa situada en Ohio, que, en sus 30 años de historia, han diseñado, fabricado y comercializado equipos y software de análisis biomecánico para ensayos clínicos e investigación, la primera cinta de correr instrumentalizada, la fabricaron en 2001 bajo el nombre comercial de Bertec FIT (Ver figura [18]).



Figura 18: Instrumented treadmill (Fuente:Bertec)

Otro de los fabricantes más conocidos a nivel mundial, es AMTI, empresa que utiliza un innovador diseño de cinta en tándem, que evita los problemas de la doble cinta horizontal, permitiendo mantener una marcha mucho más natural, estas dos cintas, están separadas solo por 1mm de distancia, para minimizar las interferencias en la medición.

La cinta de AMTI, permite una velocidad de medición de hasta 20 km/h (Ver figura [19]), registrando los valores de las tres fuerzas de reacción al suelo en los ejes cartesianos (F_x , F_y , F_z) y los tres momentos ejercidos (M_x , M_y , M_z).



Figura 19: Compact Tandem Force-Sensing Treadmill (Fuente: Amti)

2. ADQUISICIÓN DE DATOS

2.1 Cinta de correr

Para realizar las mediciones hemos decidido realizar los ensayos sobre una cinta de correr, debido a su gran control sobre la velocidad, y su gran facilidad de uso, gracias a este instrumento podemos fijar una velocidad de

marcha con una precisión de hasta 0.1 km/h manipulándola simplemente con un botón, y siendo capaz de modificar esta cuando sea necesario.

El mayor inconveniente de realizar los ensayos en una cinta de correr, son las vibraciones, producidas por las propias GRF, para minimizar estos efectos que pueden distorsionar nuestros resultados, hemos realizado las mediciones en la cinta de correr modelo M7L de la marca SALTER (Ver figura [20]), donde logramos minimizar dichas vibraciones, debido al gran peso y la robustez de la máquina.



Figura 20: Cinta de correr (Fuente: SALTER)

Esta cinta, nos permite una carrera muy estable, gracias a sus dimensiones, su peso y sus características.

Principales características:

- Área útil de banda de 153 x 55 cm
- Peso 167 Kg
- Peso Máximo usuario 182 Kg
- Dimensiones totales 212 x 92 x 148 cm

- Soporte para dispositivos móviles
- Conexión USB para carga de dispositivos
- Función de paro de seguridad
- Velocidad mínima 0.5 Km/h
- Velocidad máxima de 20 Km/h
- Precisión de velocidad 0.1 Km/h
- Nivel máximo de inclinación 18%
- Joystick para regulación de velocidad
- Monitor con información constante de tiempo, distancia, pulso, pasos...
- Motor de 3CV
- Railes de aluminio para mayor resistencia y durabilidad

2.1. FUNCIONAMIENTO DE LAS PLANTILLAS LOADSOL

Para realizar nuestro estudio, hemos decidido utilizar las plantillas instrumentalizadas modelo Loadsol de la empresa Novel Electronics de Norte América, debido a sus grandes ventajas en la facilidad de exportar los datos y realizar mediciones, y que a diferencia de todos los demás instrumentos de medida estudiados anteriormente, las plantillas Loadsol, estas son portátiles ya que solo tenemos que poner las plantillas en nuestras zapatillas y salir a caminar o correr, lo que agiliza en gran medida el proceso de la toma de datos.



Figura 21: Sensor (Fuente: Novel electronics)

Estas plantillas se conectan a nuestro smartphone vía bluetooth (Ver figura [21]), y mediante una aplicación, podremos monitorear nuestras mediciones, crear los archivos de datos ASCII e incluso calibrar nuestras plantillas.



Figura 22: colocación de la plantilla (Fuente: Novel electronics)

Las plantillas, funcionan gracias a una pila de litio de 3V alojada en la parte de los circuitos electrónicos (aunque las más novedosas, ya tienen una pequeña batería en su interior y permiten cargarse mediante USB), esta proporciona la energía suficiente para hacer funcionar los sensores de medición de fuerza alojados en la plantilla y el dispositivo de conexión vía bluetooth (Ver figura [22]), las plantillas, se comercializan en hasta 11 tamaños distintos, para adaptarse a las características del individuo, también existen distintos modelos en cuanto a calidades y tipo de datos de medición, dependiendo del número y el tipo de sensor, podrán ofrecernos distintos tipos de datos, desde una sola fuerza para cada pie como es en nuestro caso, o hasta tres zonas de fuerza diferenciadas en cada pisada (Ver figura [23]).

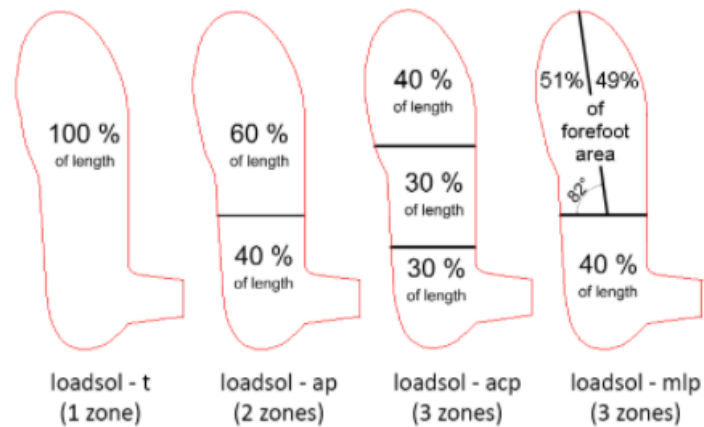


Figura 23: Configuraciones Loadsol (Fuente: Novel electronics)

El modelo adquirido por el departamento de Mecánica de los Medios Continuos y Teoría de Estructuras de La Escuela de Ingenierías Industriales de la Universidad de Valladolid es el modelo Loadsol-t, el cual permite una sola zona de medición por cada pie, lo que es suficiente para nuestro estudio.

Para conectar nuestras plantillas a la aplicación para smartphone, deberemos apretar el botón que se sitúa en la parte de los circuitos hasta que el Led indicador, se encienda de modo pulsante en color verde, entonces, en nuestro smartphone deberemos abrir la aplicación, en la cual nos encontraremos esta pantalla (Ver figura [24]):



Figura 24: Pantalla aplicación

Para poder escanear vía Bluetooth desde la aplicación, en el apartado SENSORS podremos ver los dispositivos disponibles (Ver figura [25]):

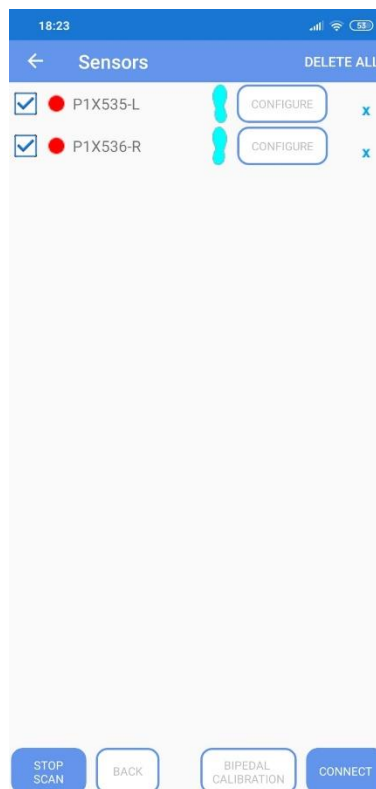


Figura 25: Configuración plantillas app

Nos conectaremos a nuestras plantillas, denominadas P1X535-L correspondiente al pie izquierdo y P1X536-R correspondiente al pie

derecho, en el apartado SETTINGS, podremos configurar distintas variables, como el peso del individuo, la frecuencia de muestreo o la fuerza medida máxima (Ver figura [26]):

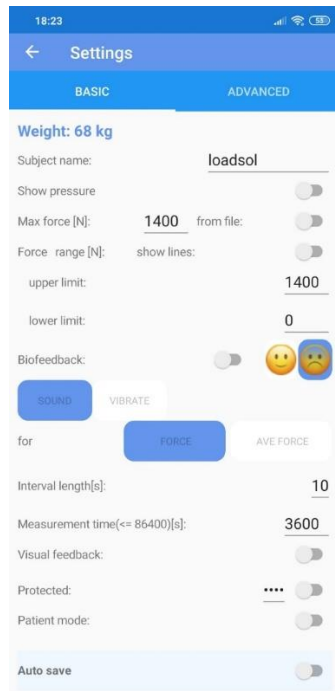


Figura 26: Configuración app



Figura 27: Configuración app

Una vez todo esté debidamente configurado, ya podremos comenzar con la toma de datos (Ver figura [27]).

En mi caso, para poder establecer una velocidad constante minimizando todos los errores posibles y tener un control exacto sobre ella, he decidido realizar mis mediciones en una cinta de correr, lo ideal, sería hacerlo sobre un suelo perfectamente rígido, para que las GRF no se vean amortiguadas, al tomar las medidas sobre una cinta de correr, corremos el riesgo de que las vibraciones y las deformaciones de la propia cinta alteren nuestros datos, por eso es importante que la cinta de correr sea de alta calidad, robusta y estable, en mi caso, he utilizado la cinta de correr de la marca SALTER ubicada en el centro deportivo Rio Esgueva de Valladolid.

2.3 Precisión de las plantillas

Uno de los factores más importantes en este estudio, es la precisión de las medidas, para poder evaluar los datos de forma correcta y fiable, Uno de los motivos de elección de estas plantillas, es su precisión y fiabilidad, la cual ha sido comprobada por varios científicos, gracias a diferentes estudios que podemos ver en la página web del fabricante Loadsol (ref. [7]).

Uno de los estudios más representativos es el realizado por *Kristen E. Renner, DS Blaise Williams y Robin M. Queen*, en el cual se analizaron las GRF de un alto número de individuos a una frecuencia de 100Hz para unas velocidades de 10.8 y 12.6 km/h, con distintas inclinaciones ascendentes y descendentes (Ver figura [28]):

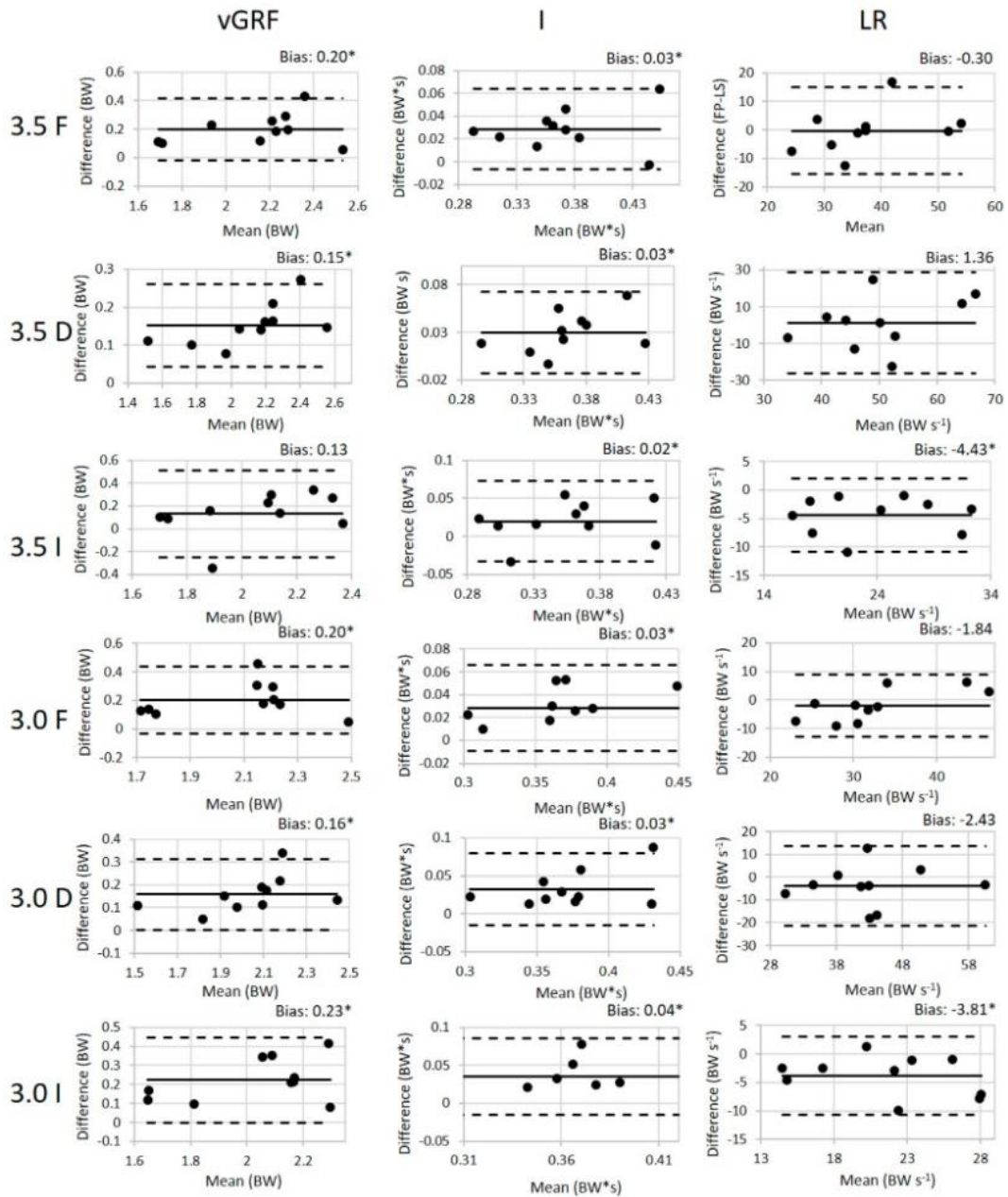


Figura 28: Precision loadsol (Fuente [7])

Los resultados mostrados en la imagen corresponden con los datos de fuerza máxima e impulso de las mediciones, donde las líneas horizontales corresponden con el valor medio y sus desviaciones típicas, y como podemos observar, muy pocos datos salen de ese límite de aceptabilidad. Por lo que podemos afirmar que las plantillas son lo suficientemente precisas para este tipo de estudios.

2.4 Toma de datos

2.4.1 Ensayos caminando

Para realizar nuestro estudio, vamos a comenzar a tomar datos a velocidades muy bajas, para posteriormente ir aumentando la velocidad de la cinta con incrementos de +1 Km/h y poder ver las variaciones que se presentan en las GRF.

Nuestra primera medida será de 3 Km/h (Ver figura [29]):

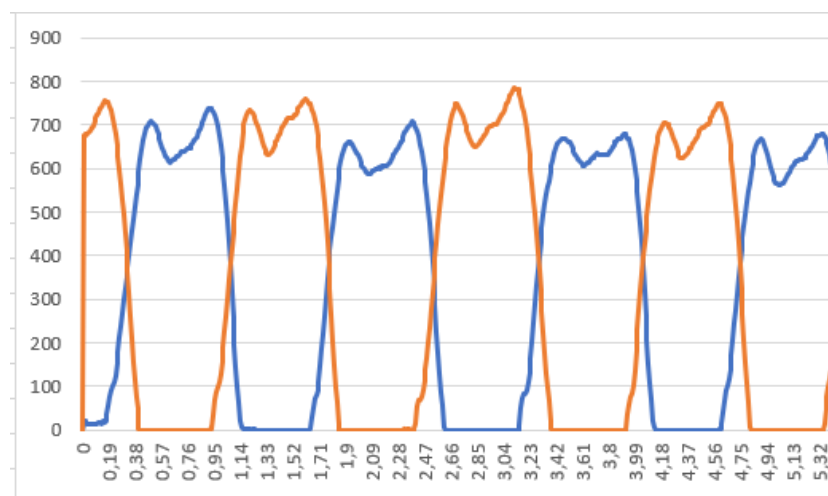


Figura 29: Medida 3 Km/h

Al ser una velocidad tan baja, se hace incomodo andar tan despacio, hasta el punto en que en cierta medida cuesta mantener el equilibrio en las fases de apoyo de un solo pie, esto se ve reflejado en nuestras mediciones, la parte del mínimo local situado entre los dos máximos, es una zona con muchas vibraciones, debido a esta inestabilidad causada por la velocidad tan baja.

Nuestra siguiente medida será de 4 Km/h (Ver figura [30]):

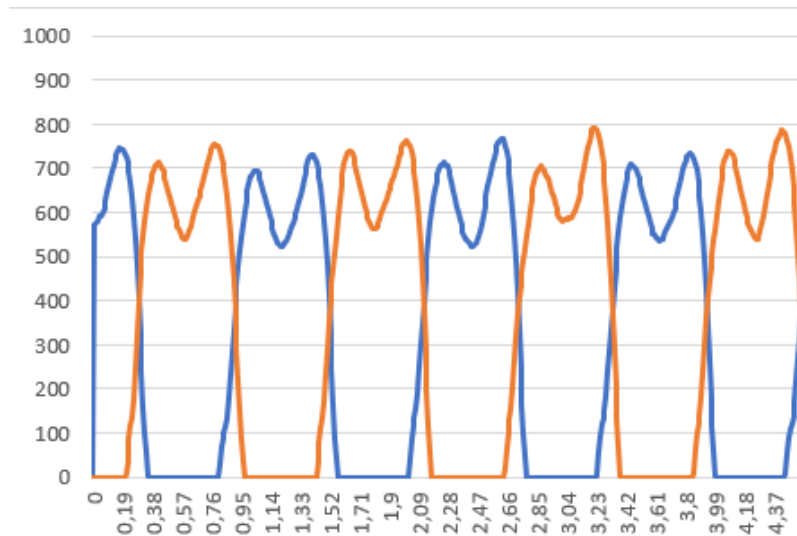


Figura 30: Medida 4 Km/h

La segunda medida fue tomada en 4 Km/h, parece un aumento insignificante, pero corresponde un aumento de un 33% con respecto a la primera medida, podemos observar que las inestabilidades en la zona central se suavizan en gran medida, viéndose así el paso en forma de M mucho más claro.

Nuestra siguiente medida será de 5 Km/h (Ver figura [31]):

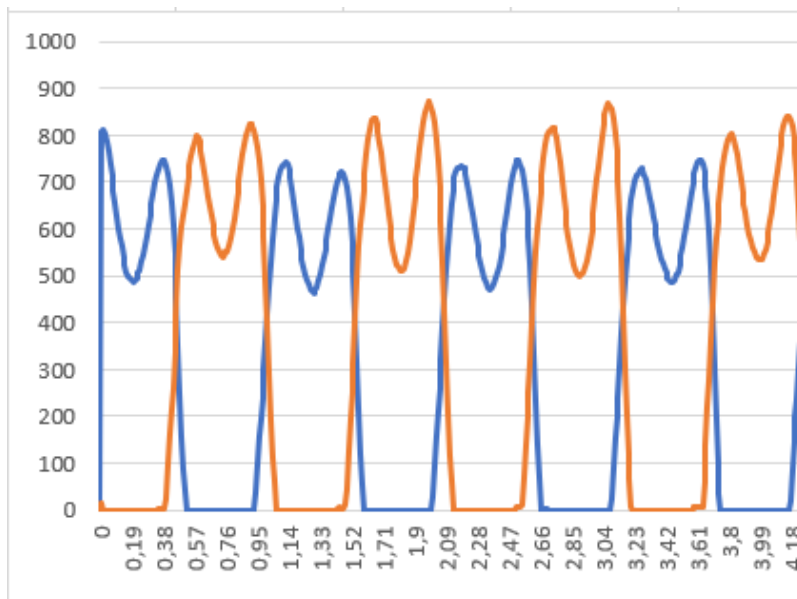


Figura 31: Medida 5 Km/h

A medida que la velocidad aumenta, podemos ver a simple vista que los máximos y mínimos se acentúan, alcanzando unos máximos más altos.

Nuestra siguiente medida será de 6 Km/h (Ver figura [32]):

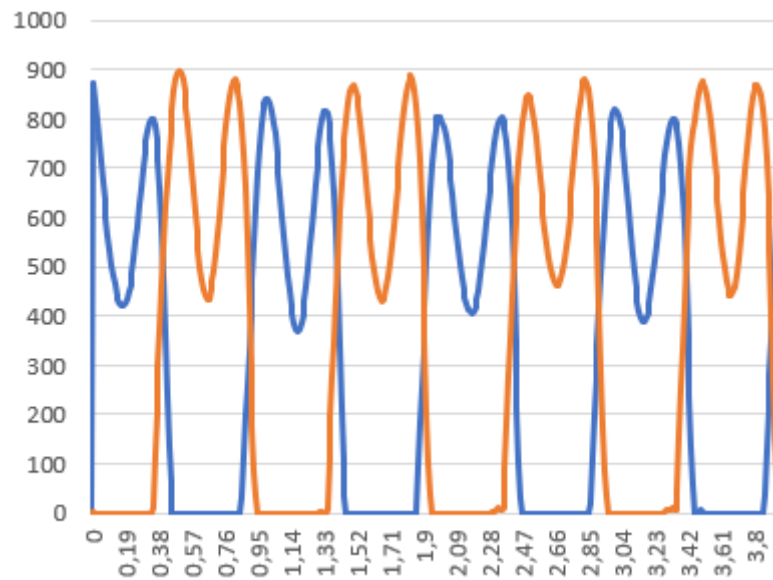


Figura 32: Medida 6 Km/h

Para una velocidad de 6 km/h vemos que los máximos ya alcanzan los 900N

Nuestra primera medida será de 7 Km/h (Ver figura [33]):

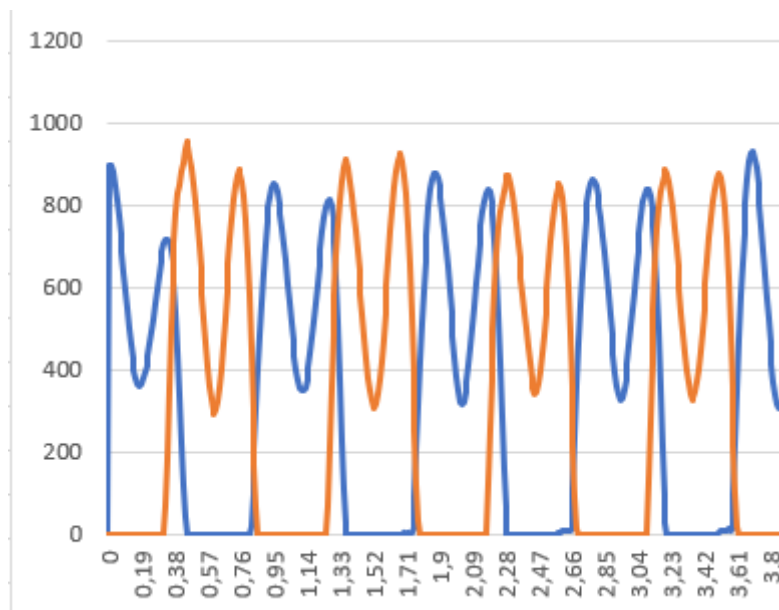


Figura 33: Medida 7 Km/h

A partir de los 7kh/h comienza a hacerse incomodo andar, ya que se hace difícil mantener la zona de apoyo bípeda.

Nuestra primera medida será de 8 Km/h (Ver figura [34]):

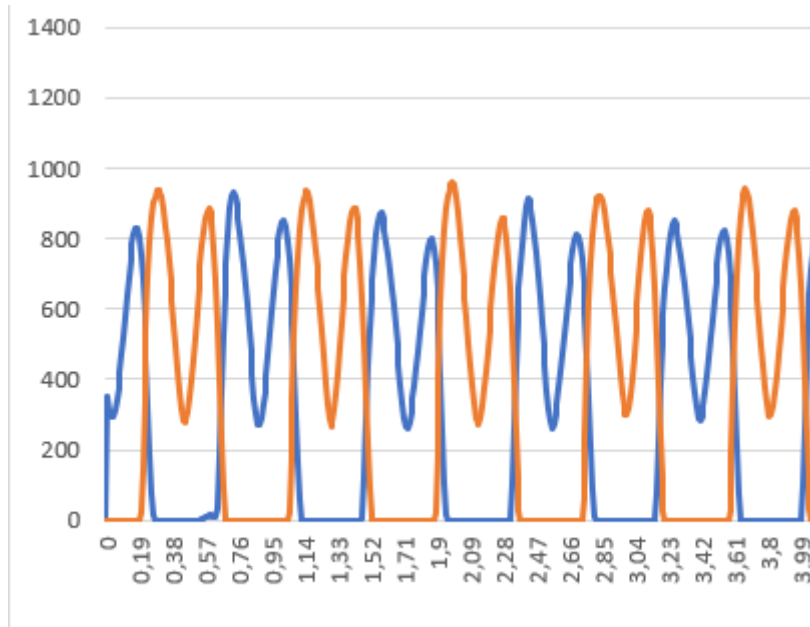


Figura 34: Medida 8 Km/h

Como última medida andando, tenemos los 8 km/h, una velocidad mayor hace que sea imposible mantener la fase de apoyo bípeda, en esta medida vemos como esta fase tiene una duración mínima.

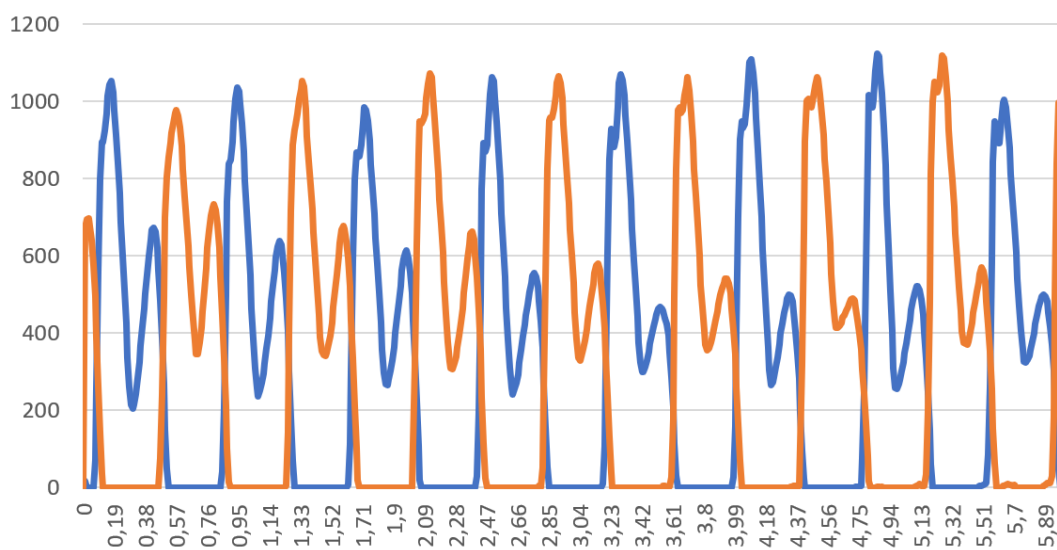


Figura 35: Medida 9 Km/h

Mantener la fase de apoyo bípoda a velocidades altas, se hace una tarea muy complicada, en el ensayo de 9 Km/h de velocidad caminando (Ver figura [35]), vemos una pisada muy distinta a las demás, ya que tenemos una mezcla entre correr y andar, los dos máximos, ahora son muy distintos, siendo el primero mucho mayor, llegando incluso a valores de 1000N, mientras que el segundo máximo se sitúa alrededor de los 500N, también podemos observar como en el primer máximo, comienza a aparecer un punto de inflexión, e incluso en algunos de esos máximos este punto de inflexión genera un nuevo máximo de poca prominencia.

2.4.2 Ensayos corriendo

Una vez realizadas las mediciones de los ensayos caminando, procedemos a realizar las mediciones corriendo, la velocidad más baja a la que pude mantener la fase área es de 7 km/h, para una velocidad menor, es imposible conseguir un instante en el que los dos pies se encuentren en el aire (Ver figura [36]).

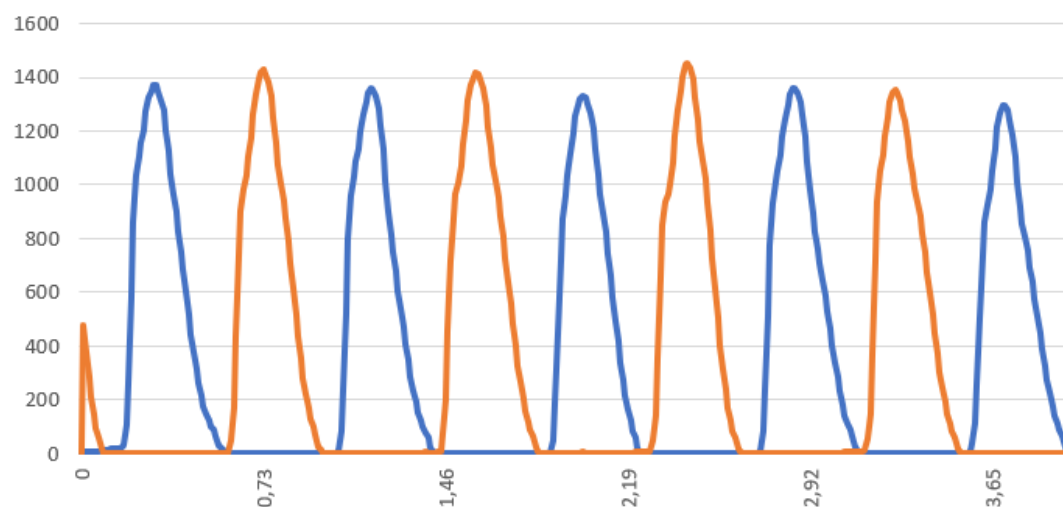


Figura 36: Medida 7 Km/h

Como podemos observar, las pisadas, son muy distintas a las que realizamos cuando caminamos, aunque sea a la misma velocidad, el máximo pico de fuerza es mucho mayor, y ya no aparece ese mínimo intermedio.

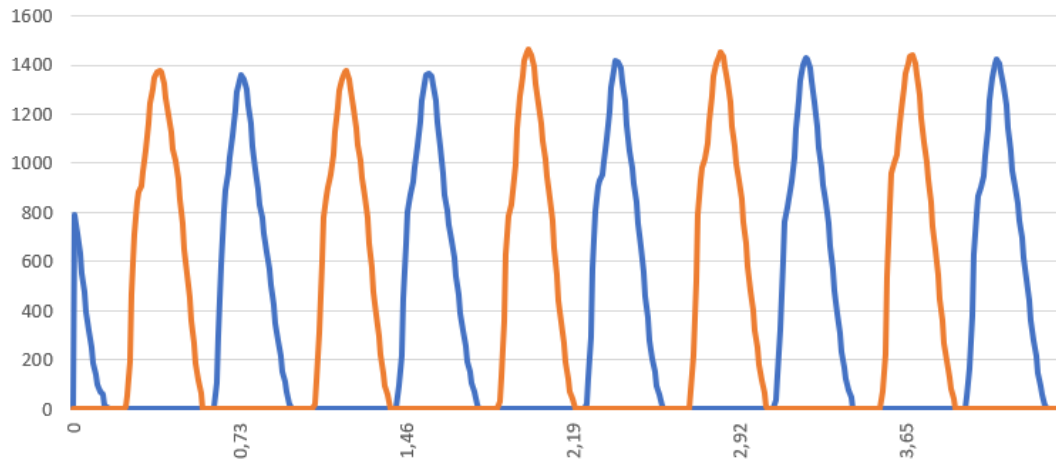


Figura 37: Medida 8 Km/h

A medida que aumentamos la velocidad, las pisadas son más uniformes, debido a la comodidad de la cadencia de paso (Ver figura [37]).

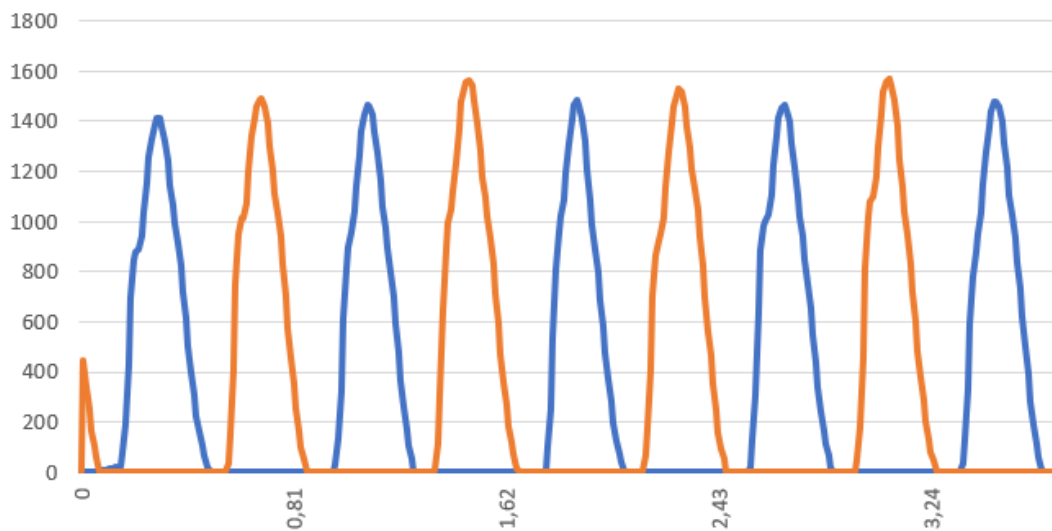


Figura 38: Medida 9 Km/h

La fase aérea, aumenta a medida que aumentamos la velocidad (Ver figura [38]).

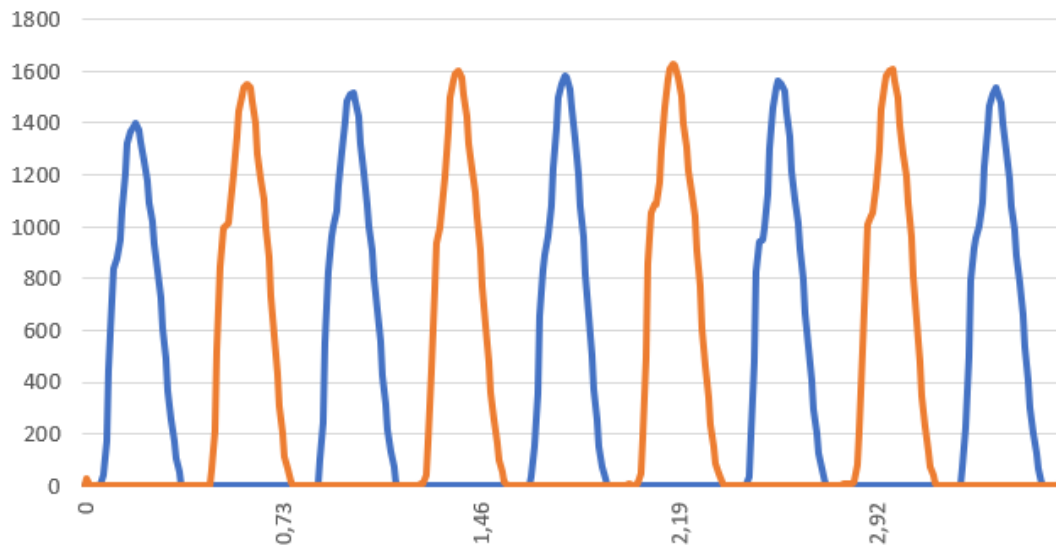


Figura 39: Medida 10 Km/h

10 Km/h es una velocidad muy cómoda para correr, como podemos ver comienza a aparecer un punto de inflexión en la parte inicial de la pisada (Ver figura [39]).

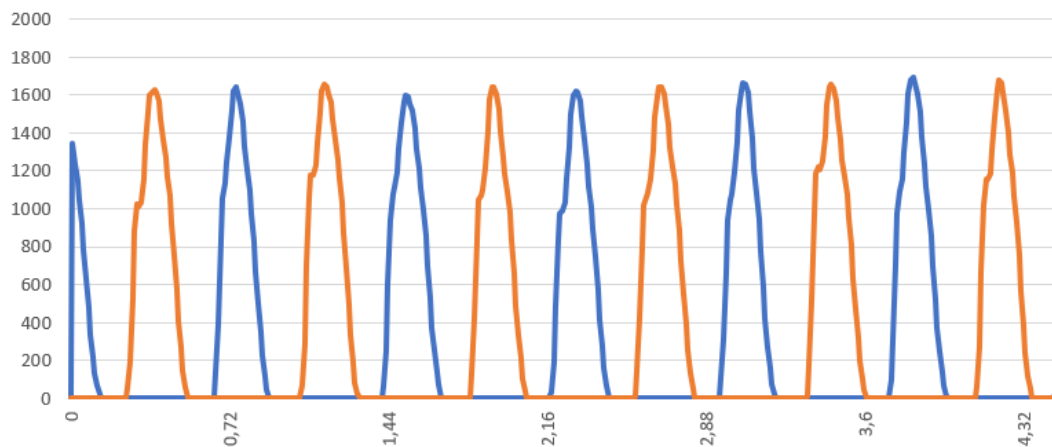


Figura 40: Medida 12 Km/h

A medida que aumentamos la velocidad, las pisadas son aún más uniformes, debido al equilibrio y la concentración para mantener esa velocidad (Ver figura [40]).

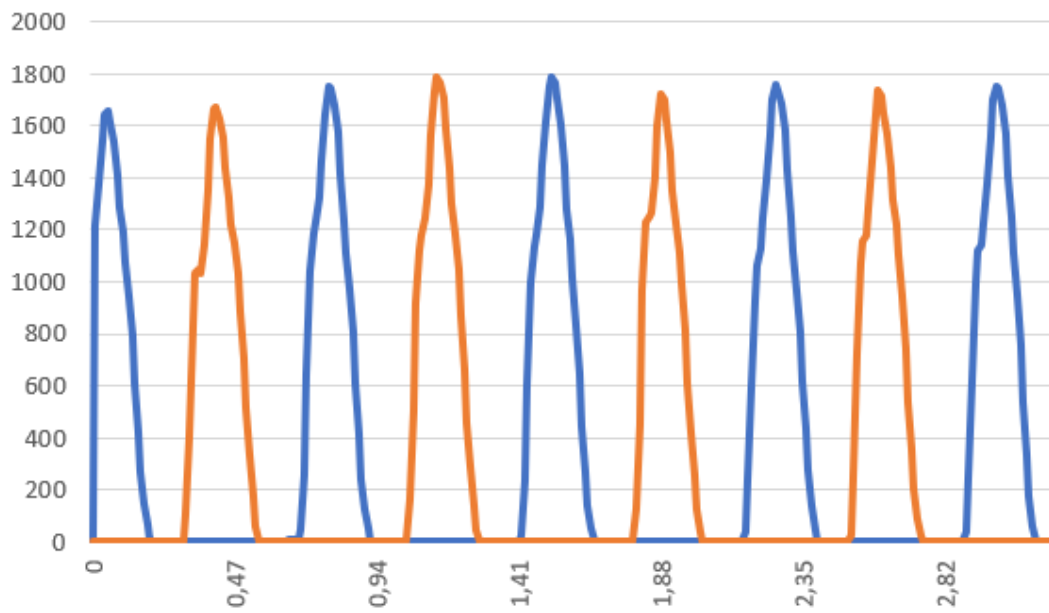


Figura 41: Medida 14 Km/h

A 14 Km/h vemos que algunos de los picos máximos alcanzan los 1800N (Ver figura [41]).

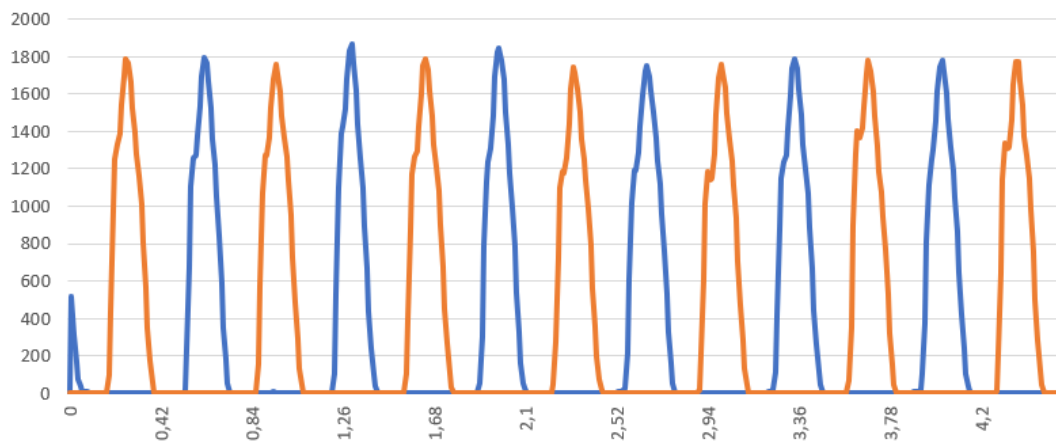


Figura 42: Medida 16 Km/h

Como última medida, tenemos los 16 km/h donde podemos ver (Ver figura [42]), que alguno de los puntos de inflexión de la fase inicial de la pisada, se convierte en un máximo local, que corresponde al instante del apoyo del talón.

3.- PROCESADO EN MATLAB

Una vez tomados todos los datos, vamos a crear un código en Matlab para calcular una gráfica que sea la media de todos los pasos que hemos dado en las mediciones, las mediciones, tienen una duración de unos 120 segundos, por lo que tenemos un gran número de pisadas, eliminando los valores atípicos y las pisadas irregulares, conseguiremos calcular una pisada casi ideal para cada velocidad.

El código de Matlab consta de 6 partes, empieza extrayendo los datos de los archivos ASCII generados en la aplicación móvil gracias a las plantillas Loadsol, y finaliza grabando los datos calculados en un archivo de Excel.

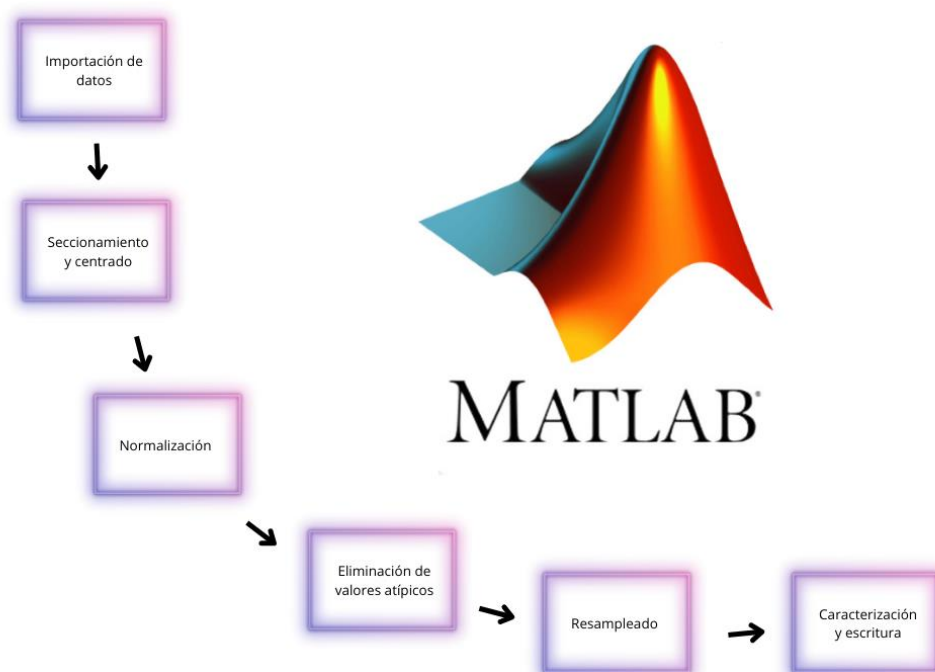


Figura 43: Fases código MATLAB

A continuación, realizaremos una breve explicación del código paso a paso:

1.- **Importación de los datos:** La primera parte del código consiste en adquirir los datos de las mediciones de los archivos ASCII creados con las plantillas y la aplicación.

2.- **Ajuste de tiempo:** en una primera visualización: veremos la totalidad de los datos, tenemos que ajustar un intervalo para deshacernos de los datos

que no sean válidos, lo normal es quitar unos 10 s del inicio y unos 10 s del final.

3.- **Aislamiento**: el primer paso en la modificación de los pasos es separarlos de uno en uno, eliminando los periodos de tiempo en los que el pie está en el aire.

4.- **Centrado**: En estos datos de cada pisada, podremos calcular el centro de fuerzas, para situar todos de forma conjunta.

5.- **Reescalado de tiempo**: calcularemos la media de duración de todas las pisadas, y estableceremos ese dato como la duración de todos los pasos.

6.- **Eliminación de valores atípicos**: Eliminaremos los pasos erróneos, gracias a ciertos indicadores y al proceso estadístico que recibe el nombre de método de Tukey

7.- **Resamplado**: Igualamos el número de puntos que definen cada paso, para así poder obtener un “paso modelo”

8.- **Caracterización del paso**: Realizamos un análisis estadístico, para así obtener una media de todos los pasos, y calcular así un “paso modelo” que posteriormente analizaremos.

3.1 Procesado de datos andando

En primer lugar, analizaremos los datos de las marchas caminando, para ello, tendremos que modificar ciertos aspectos del archivo ASCII generado, abriendo el archivo con el block de notas, veremos lo siguiente (Ver figura [44]):

```

Archivo Edición Formato Ver Ayuda
File: loadso1ASCII_21-10-19 13-12-08-267.txt
Comment:walk|
      PIX535-L          PIX536-R
Time[secs]      Force[N]      Time[secs]      Force[N]      Time      AccX      AccY      AccZ
0,000  0,000  0,000  0,000
0,010  1345,000  0,010  0,000
0,020  1237,400  0,020  0,000
0,030  1145,940  0,030  0,000
0,040  1043,720  0,040  0,000
0,050  925,360  0,050  0,000
0,060  785,480  0,060  0,000
0,070  634,840  0,070  0,000
0,080  478,820  0,080  0,000
0,090  338,940  0,090  0,000
0,100  220,580  0,100  0,000
0,110  134,500  0,110  0,000
0,120  64,560  0,120  0,000
0,130  21,520  0,130  0,000
0,140  5,380  0,140  0,000
0,150  5,000  0,150  0,000
0.160  0.000  0.160  0.000

```

Figura 44: Datos obtenidos con la app

Para que el código de Matlab lo reconozca, deberemos eliminar la cabecera y sustituir las comas por puntos, en algunos archivos, también hay que truncar los últimos valores, ya que a veces la aplicación genera algún dato más en una plantilla que en la otra, y esto genera un error en MATLAB, el archivo quedará así (Ver figura [45]):

```

Archivo Edición Formato Ver Ayuda
0.000  0.000  0.000  0.000
0.010  1345.00  0.010  0.000
0.020  1237.40  0.020  0.000
0.030  1145.94  0.030  0.000
0.040  1043.72  0.040  0.000
0.050  925.360  0.050  0.000
0.060  785.480  0.060  0.000
0.070  634.840  0.070  0.000
0.080  478.820  0.080  0.000
0.090  338.940  0.090  0.000
0.100  220.580  0.100  0.000
0.110  134.500  0.110  0.000
0.120  64.560  0.120  0.000
0.130  21.520  0.130  0.000
0.140  5.380  0.140  0.000
0.150  5.000  0.150  0.000
0.160  0.000  0.160  0.000

```

Figura 45: Datos modificados

La primera parte del código se encarga de limpiar la memoria, para poder comenzar desde cero y abrir el archivo requerido (Ver figura [46]):

```
% Borrar cualquier variable y datos antes de iniciar
clear
clc
close all

% Archivo de datos a importar:
file='6w.txt';
```

Figura 46: Código 1

Posteriormente, cargaremos los datos en las variables de tiempo, fuerza del pie derecho y fuerza del pie izquierdo, y crearemos una gráfica para poder previsualizar los pasos (Ver figura [47]):

```
data=load(file,'-ascii');
t=data(:,1);
LF=data(:,2);
RF=data(:,4);

% Dibujamos la gráfica
figure(1)

plot(t,LF,'r',t,RF,'b','LineWidth',2);

xlabel('Tiempo (s)')
ylabel('Fuerza (N)')

set(gcf,'color','#f8f8ff');
set(gca,'color','w');
set(gcf,'InvertHardcopy','off');
set(gca,'YColor','k');
set(gca,'XColor','k');
set(gca,'fontsize',20);

legend('Pie izquierdo','Pie derecho')

grid on
grid minor
```

Figura 47: Código 2

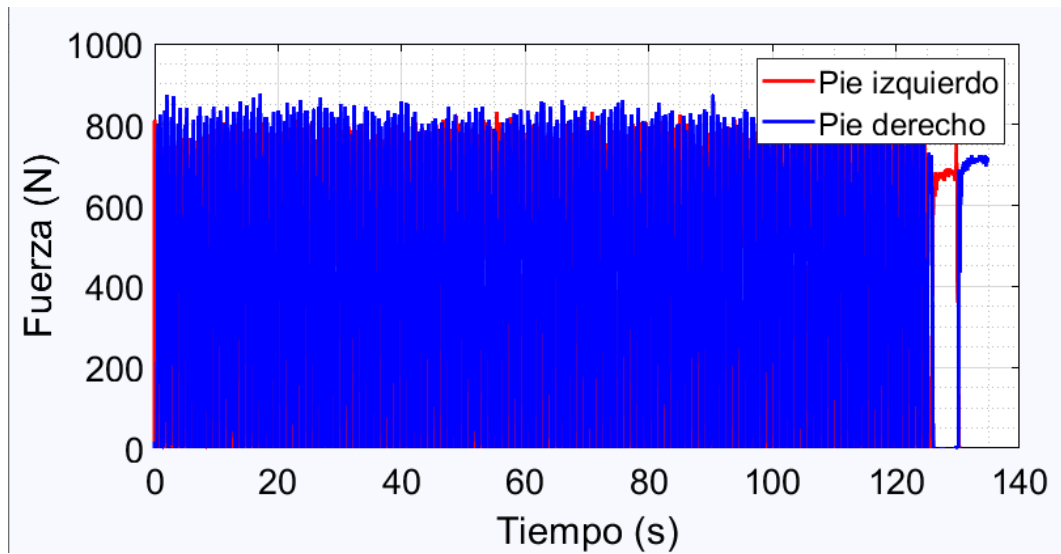


Figura 48: Gráfico total andando

Esta gráfica nos es muy útil para poder decidir la sección del tiempo (Ver figura [48]), en este caso, podemos ver que de 10 s a 120 s sería una buena elección (Ver figura [50]).

La siguiente parte del código cortará los datos por nuestra selección de tiempo y grabará los datos resultantes en las nuevas variables (Ver figura [49]):

```

% Ajuste de tiempo
tmin=10;
tmax=120;

% Recorto la primera gráfica con estos valores de tiempo.
LF=LF(t>=tmin & t<=tmax);
RF=RF(t>=tmin & t<=tmax);
t=t(t>=tmin & t<=tmax);

% Creo las nuevas variables.
% LF/RF: Primera columna es el tiempo y la segunda son las fuerzas del paso
% izquierdo/derecho
% Total: suma de las fuerzas de los dos pies

Total=LF+RF;
LF=[t(:) LF(:)];
RF=[t(:) RF(:)];
Total=[t(:) Total(:)];

figure(2)
hold on
plot(LF(:,1),LF(:,2),'r',RF(:,1),RF(:,2),'b','LineWidth',3);
% plot(Total(:,1),Total(:,2),'color','#2f4f4f','LineWidth',3);
hold off

xlabel('Tiempo (s)')
ylabel('Fuerza (N)')

set(gcf,'color','#f8f8ff');
set(gca,'color','w');
set(gcf,'InvertHardcopy','off');
set(gca,'YColor','k');
set(gca,'XColor','k');
set(gca,'fontSize',40);

legend('Pie izquierdo','Pie derecho')

axis([10 120 0 1000])

grid on
grid minor

set(gcf,'units','normalized','outerposition',[0 0 1 1])

```

Figura 49: Código 3

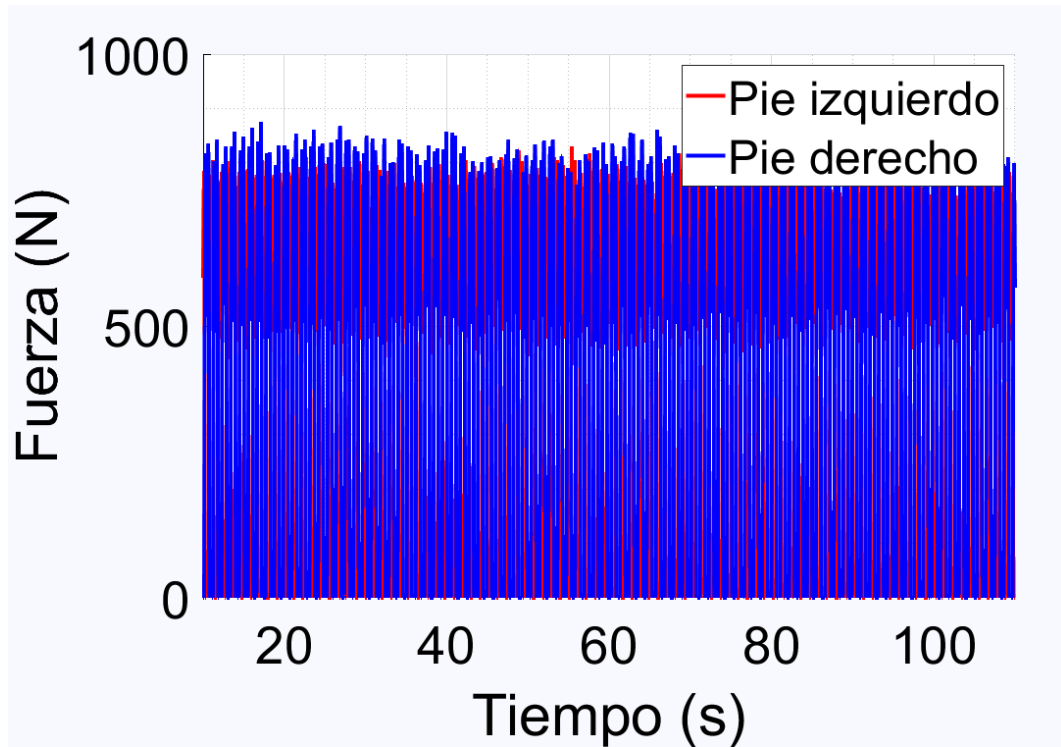


Figura 50: Gráfico cortado andando

En la parte de aislamiento, fijaremos una fuerza mínima, la cual se encargará de seccionar los pasos y liminar los valores por debajo de ella, para así eliminar los periodos en los que el pie está en el aire, también centraremos los pasos en torno a su centro geométrico (Ver figura [53]) gracias al cálculo del área bajo la curva (Ver figura [51]) (Ver figura [52]):

```

PasoLF=zeros(1,2);
k=1;
z=1;
bool=false;
for i=1:length(LF(:,1))
    if LF(i,2)>Fmin
        PasoLF(z:z,:)=LF(i,:);
        z=z+1;
        bool=true;
    end
    if LF(i,2)<Fmin && bool==true
        A{k}=PasoLF(1:end,:);
        k=k+1;
        PasoLF=zeros(1,2);
        bool=false;
        z=1;
    end
end
end

```

Figura 51: Código 4

```

for j=1:length(A)
    A{j}(1,2)=0;
    A{j}(end,2)=0;
end

timeA=cell(1,length(A));
tgA=zeros(length(A),1);
FgA=zeros(length(A),1);
for j=1:length(A)
    tgA(j,1)=sum((A{j}(:,1)).*(A{j}(:,2)))/sum(A{j}(:,2));
    FgA(j,1)=sum((A{j}(:,2)).*(A{j}(:,2)))/sum(A{j}(:,2));
    timeA{j}=A{j}(:,1)-tgA(j,1);
end

```

Figura 52: Código 5

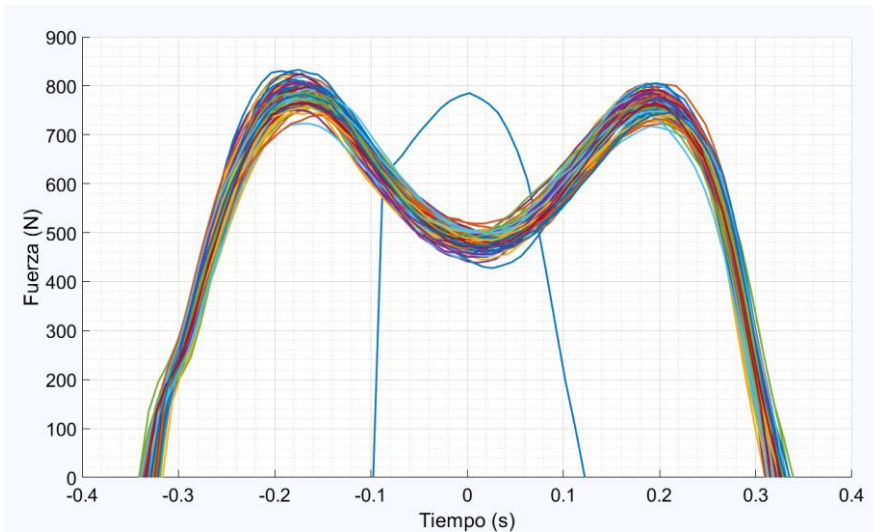


Figura 53: Pasos agrupados andando

Posteriormente colocaremos todos los pasos comenzando desde el instante 0 (Ver figura [54]) (Ver figura [55]):

```

tiempo_normalizado1=cell(1,length(A));
desnormalizado1=zeros(1,length(A));
paso_izq=cell(1,length(A));

for j=1:length(timeA)
    tiempo_normalizado1{j}=(timeA{j}-min(timeA{j}));
    desnormalizado1(j)=max(timeA{j})-min(timeA{j});
end

for j=1:length(tiempo_normalizado1)
    paso_izq{j}=[tiempo_normalizado1{j}(:,1),A{j}(:,2)];
end

tiempo_normalizado2=cell(1,length(B));
desnormalizado2=zeros(1,length(B));
paso_der=cell(1,length(B));

for j=1:length(timeB)
    tiempo_normalizado2{j}=(timeB{j}-min(timeB{j}));
    desnormalizado2(j)=max(timeB{j})-min(timeB{j});
end

for j=1:length(tiempo_normalizado2)
    paso_der{j}=[tiempo_normalizado2{j}(:,1),B{j}(:,2)];
end

figure(5)
hold on
for j=1:length(paso_izq)
    plot(paso_izq{j}(:,1),paso_izq{j}(:,2),'LineWidth',2)
end
hold off

```

Figura 54: Código 6

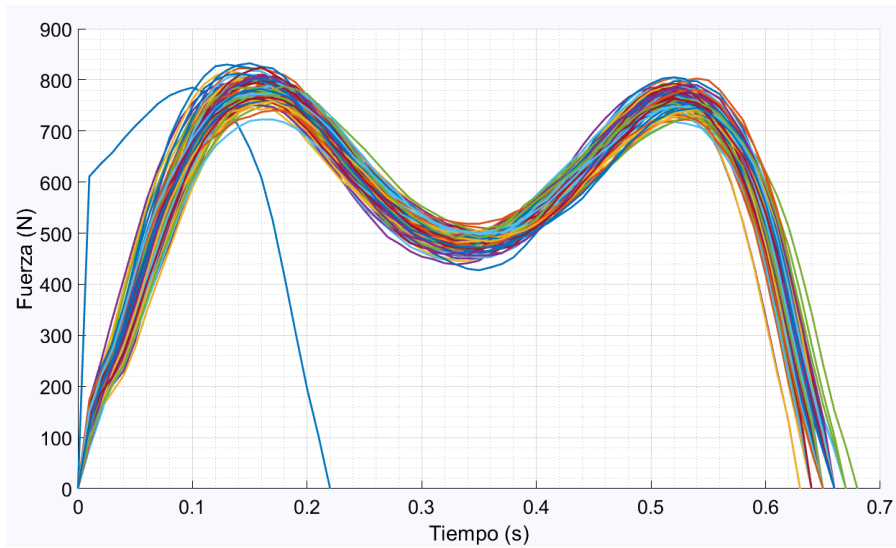


Figura 55: Pasos colocados andando

Una vez tenemos todos los pasos correctamente colocados en el instante 0 es el momento de eliminar los valores atípicos, para ello, haremos una primera criba, eliminando los pasos que no tengan una forma de M (Ver figura [56]), es decir, buscaremos los máximos y mínimos locales de las figuras, y eliminaremos los valores que no tengan un mínimo local situado entre sus dos máximos (Ver figura [57]):

```

bool=false;
c=0;
while bool==false
    for i=1:length(paso_izq)
        try
            [max,a]=findpeaks(paso_izq(i)(:,2));
            [min,b]=findpeaks((-1).*(paso_izq(i)(:,2)));
            if isempty(max)==1 || isempty(min)==1
                paso_izq(i)=[];
                continue
            end
            if length(max)==2 && length(min)==1
                if a(1)<b && a(2)>b
                    c=c+1;
                    continue
                else
                    paso_izq(i)=[];
                end
            else
                paso_izq(i)=[];
            end
        catch
            if i==length(paso_izq)
                break
            else
                continue
            end
        end
    end
    if c==length(paso_izq)
        bool=true;
    else
        bool=false;
        c=0;
    end
end
end

```

Figura 56: Código 7

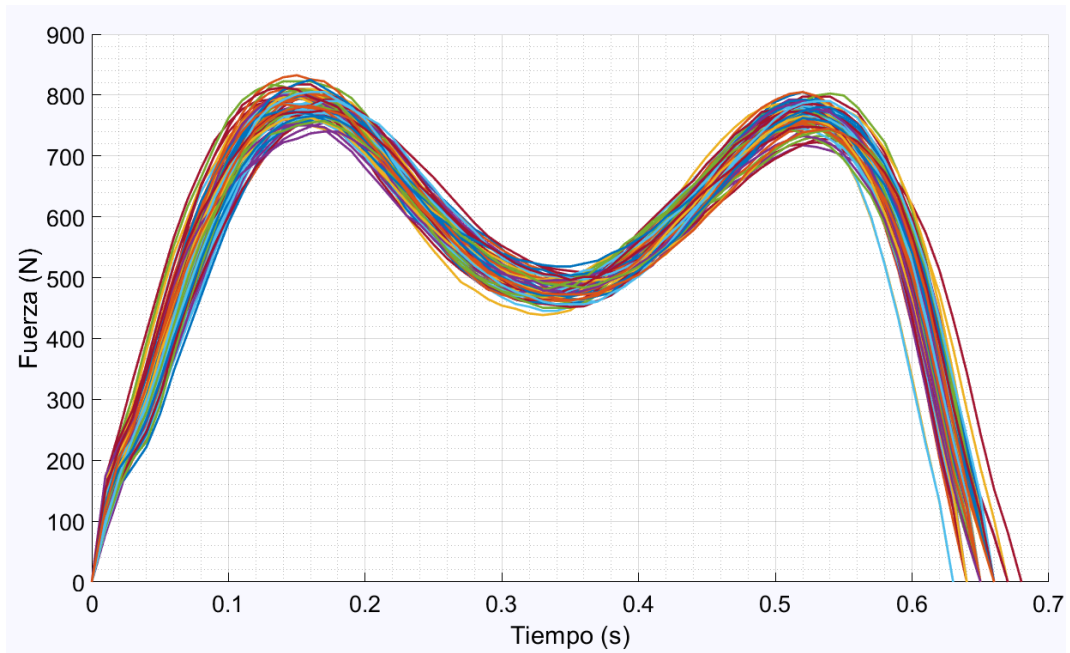


Figura 57: Pre-eliminación pasos atípicos

En el segundo proceso de eliminación de valores atípicos, emplearemos el proceso estadístico llamado Método Tukey.

El Método Tukey consiste en crear intervalos de confianza para ciertos indicadores, y así poder eliminar los más alejados, mejorando así el muestreo realizado, todo esto se consigue gracias a la realización de un diagrama de “caja y bigotes” (Ver figura [58]).

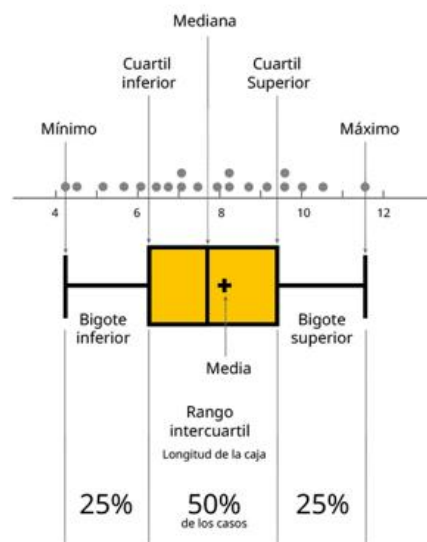


Figura 58: Diagrama caja y bigotes (Fuente: Wikipedia)

El diagrama de caja y bigotes tiene en cuenta las 5 variables estadísticas: mínimo, máximo, mediana y percentiles 23 y 75 como podemos ver en la imagen anterior.

Con estos datos sabemos que valores se salen de nuestro rango intercuartílico, y eliminando así los valores que se consideran atípicos.

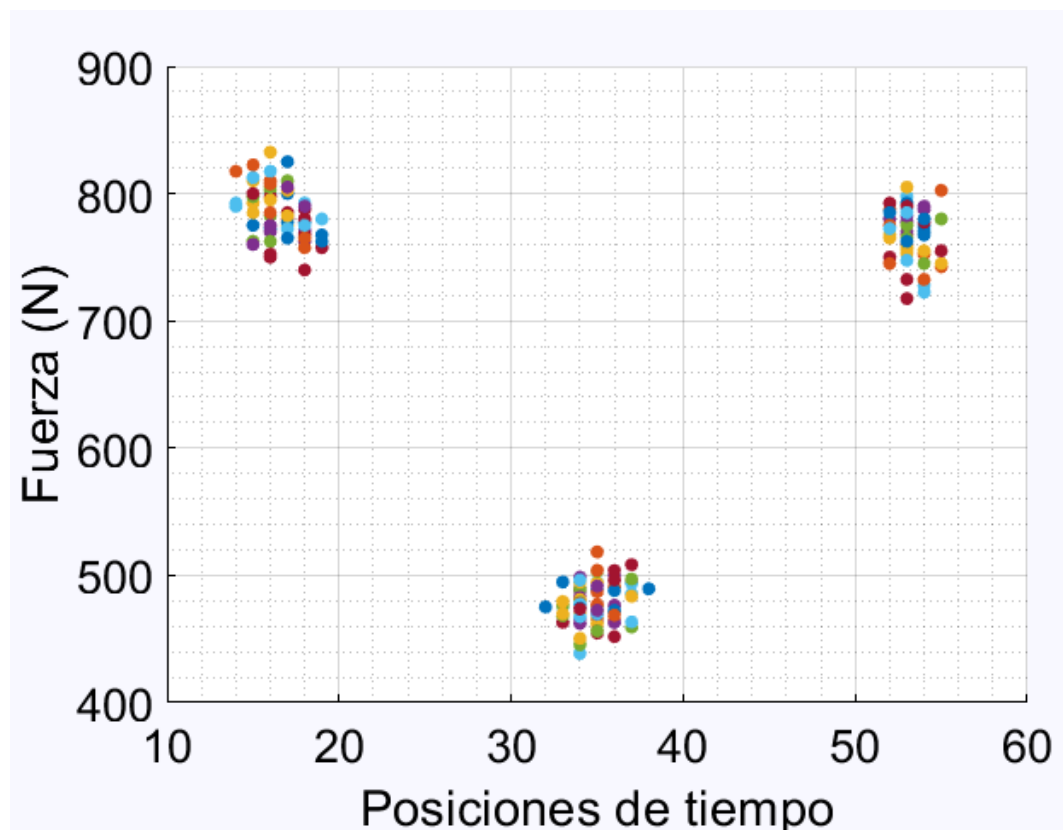


Figura 59: Ubicación máximos y mínimos andando

Para hacer una correcta selección, vamos a localizar los puntos de interés, en nuestro caso serán 3 (Ver figura [59]), los dos máximos y el mínimo central, esto nos creara 3 nubes de puntos, a las cuales aplicaremos el diagrama de caja y bigotes en sentido horizontal, para eliminar los puntos que se alejen del tiempo medio, y en sentido vertical, para eliminar los puntos que se alejen del valor de fuerza media, así conseguiremos aumentar la exactitud y la validez de nuestro muestreo, y nuestros datos estarán listos para ser analizados (Ver figura [60]).

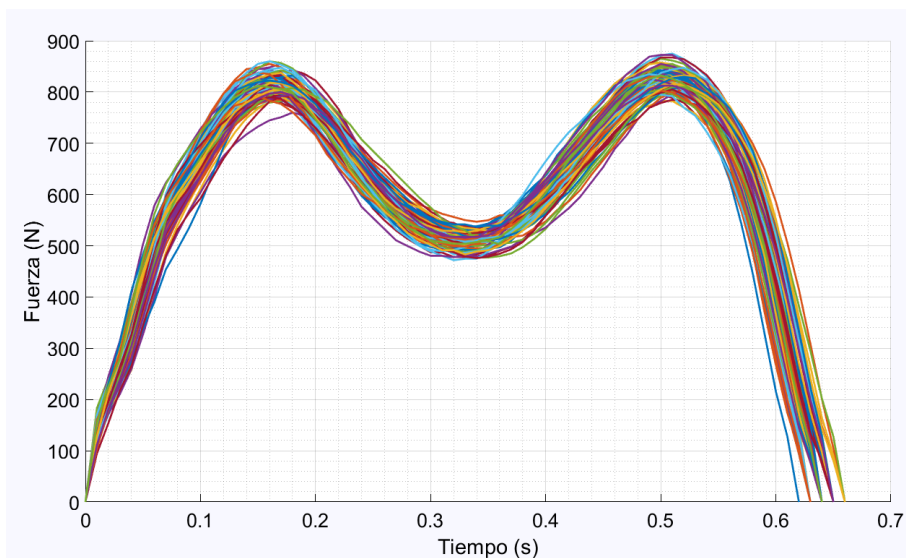


Figura 60: Eliminación total de valores atípicos andando

El último paso antes de obtener el “paso modelo” es realizar un resamplado (Ver figura [61]), para que todos los pasos estén formados por un mismo número de puntos, con esto, conseguimos que, para cada instante de tiempo, tendremos un mismo número de valores de fuerza correspondientes a todos los pasos, con estos valores, calcularemos la media en cada instante de tiempo, y obtendremos así nuestro “paso modelo” (Ver figura [62]).

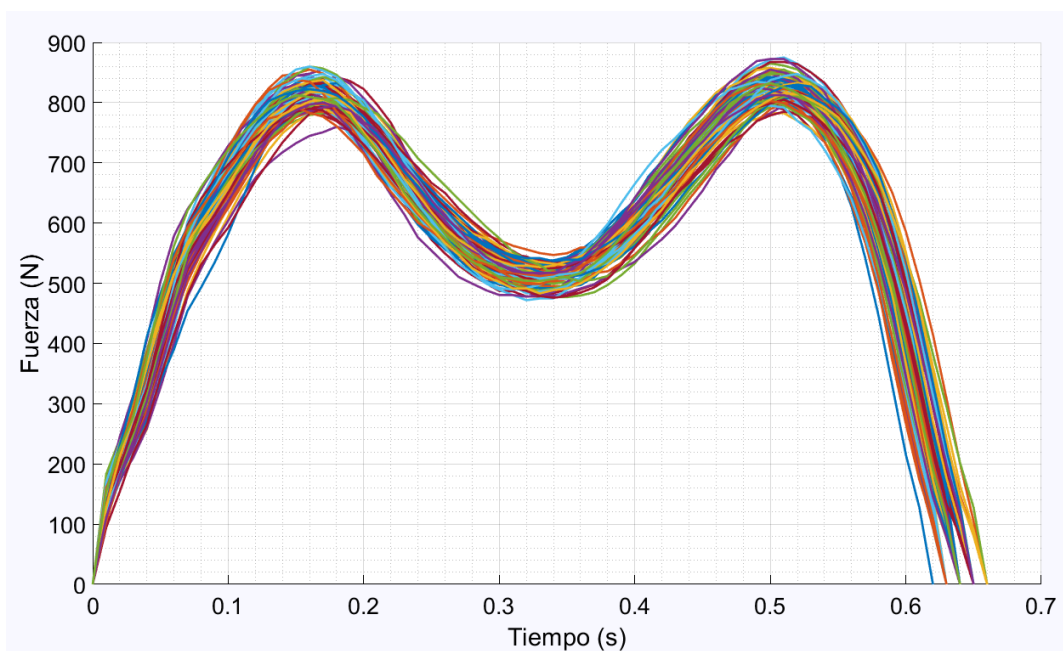


Figura 61: Pasos finales andando

Una vez tenemos todos los datos, realizamos el cálculo del paso modelo, el cual se representará con una sola línea, y nos permitirá compararlo con los pasos modelo de otras velocidades.

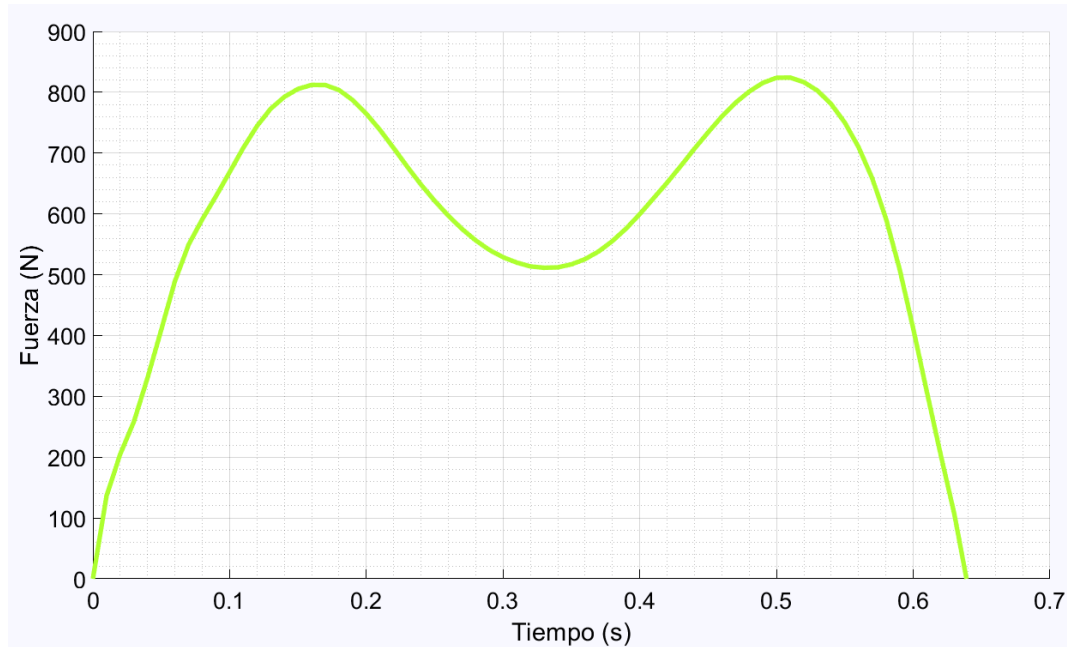


Figura 62: Paso modelo andando

Para el cálculo del paso modelo de nuestros datos en carrera, el código debe ser modificado en algunos apartados, como podemos observar a simple vista, tanto un paso como otro tienen formas muy distintas, por lo que si metemos los datos de nuestros experimentos corriendo, el código nos generara un paso modelo erróneo, el punto más importante, es la forma general del paso, cuando realizamos la eliminación de valores atípicos, en la marcha caminando, una primera selección de valores, se realizaba gracias a la existencia o no de tres puntos importantes, dos máximos y un mínimo, en los cuales, el mínimo, se tenía que encontrar en un tiempo intermedio de los dos máximos, para obtener así la forma de M, en los ensayos de marcha en carrera, la forma del paso no tiene forma de M, si no de V invertida, por lo que esta selección previa no nos servirá, si es verdad, que algunos pasos tienen un pequeño punto de inflexión en la parte ascendente de la curva, e incluso algunos tienen un máximo y un mínimo en esa zona, obteniendo así forma de M, pero si no modificásemos el código, solo estaríamos seleccionando esos pasos, que si observamos la gráfica a simple vista son una gran minoría, por lo que nuestro muestreo sería erróneo.

3.1 Procesado de datos corriendo

Vamos a realizar el cálculo del paso modelo para el ensayo de marcha en carrera a una velocidad de 10 km/h.

Los primeros pasos, al igual que en los ensayos de marcha caminando, serán, cargar los datos, realizar una selección previa, cortar y centrar todos los pasos (Ver figura [63]).

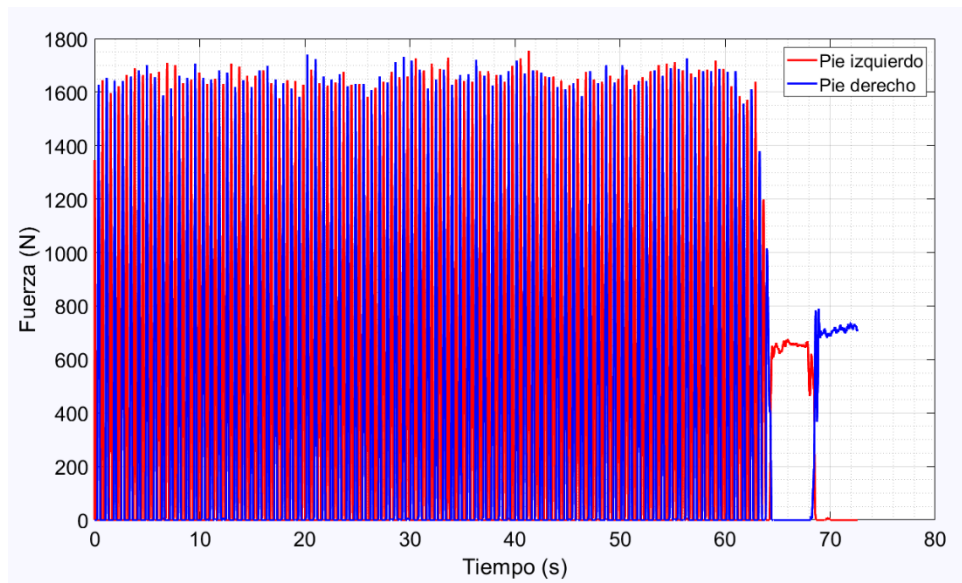


Figura 63: Gráfico total corriendo

Posteriormente, seccionaremos nuestros datos en un intervalo aceptable (Ver figura [64]):

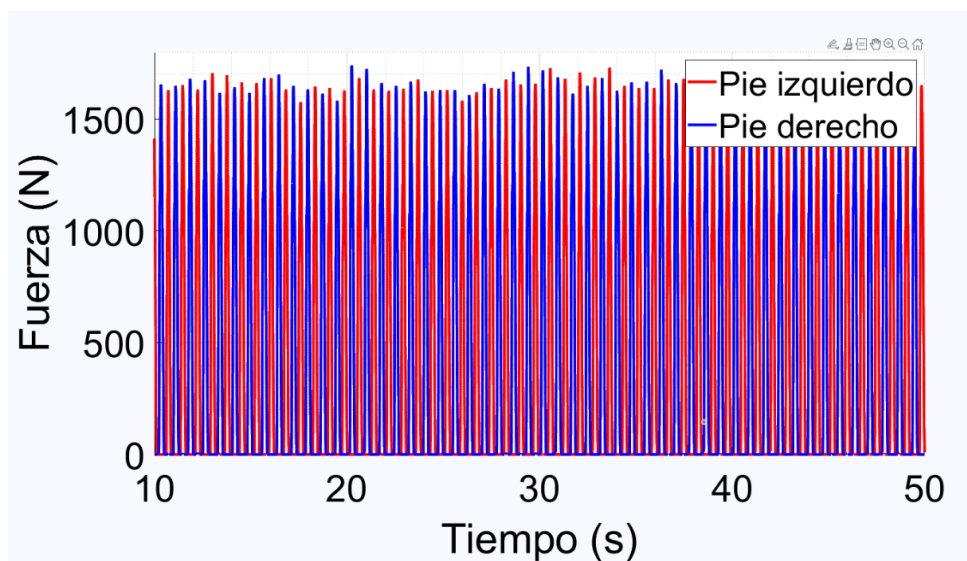


Figura 64: Gráfico cortado corriendo

Agrupamos nuestros pasos (Ver figura [65]):

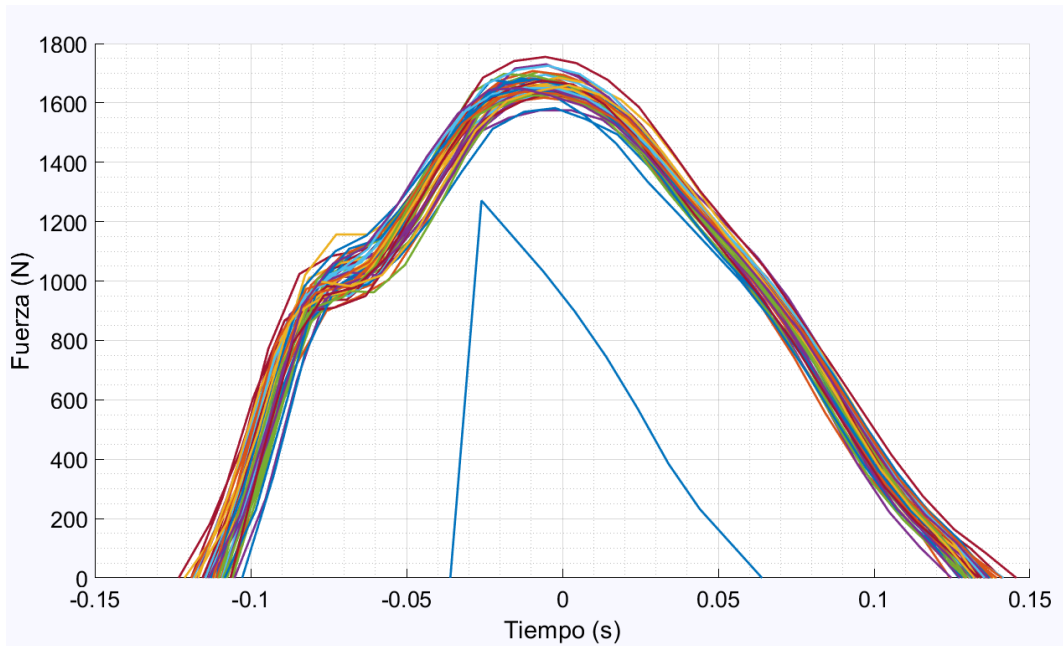


Figura 65: Pasos agrupados corriendo

Colocamos los pasos desde el instante 0 (Ver figura [66]):

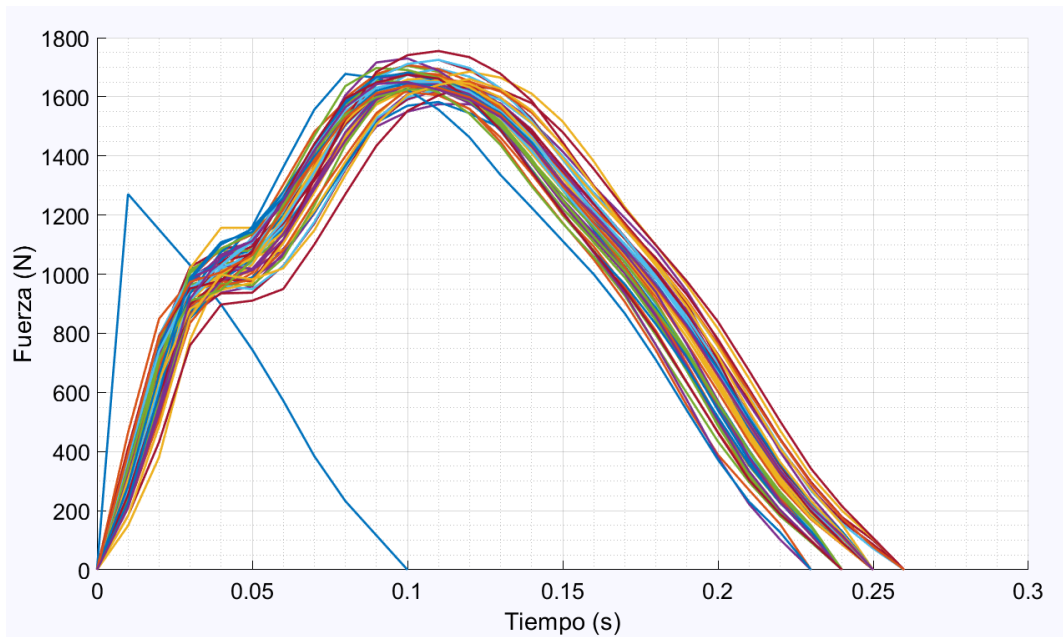


Figura 66: Pasos colocados corriendo

Localizamos todos los máximos para comenzar con la eliminación de valores atípicos (Ver figura [67]):

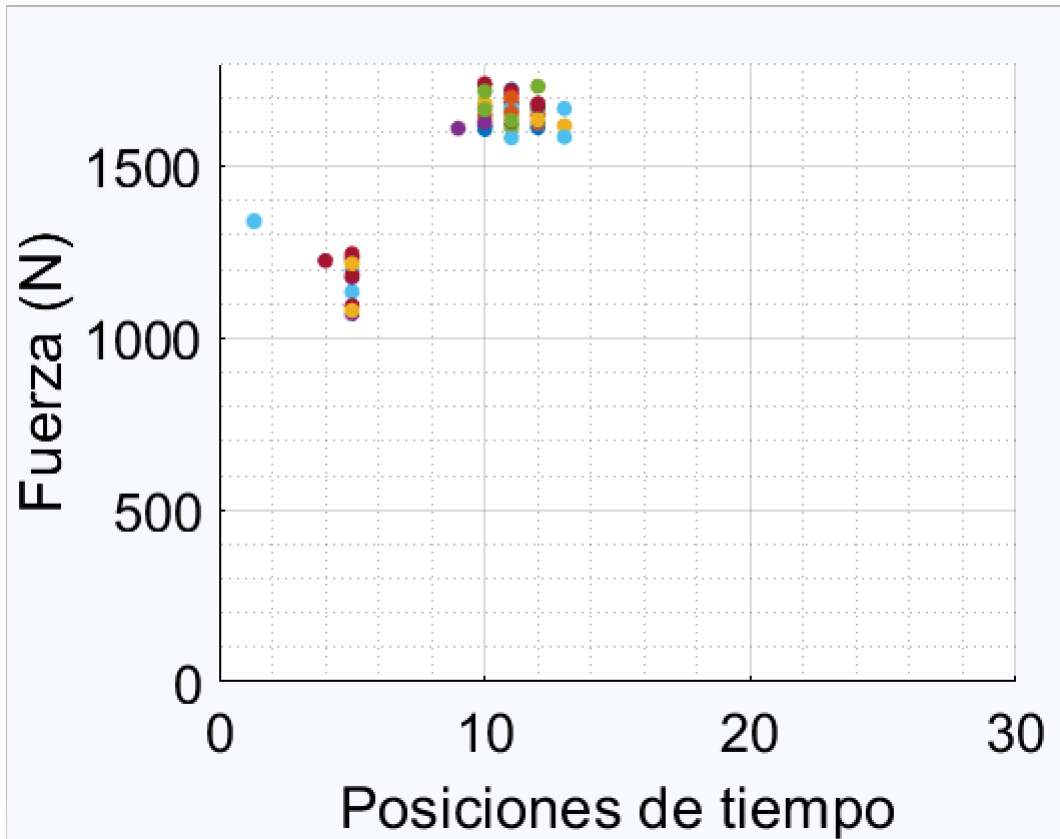


Figura 67: Ubicación máximos corriendo

Eliminamos los pasos cuyo máximo se salga de nuestro intervalo de confianza (Ver figura [68]):

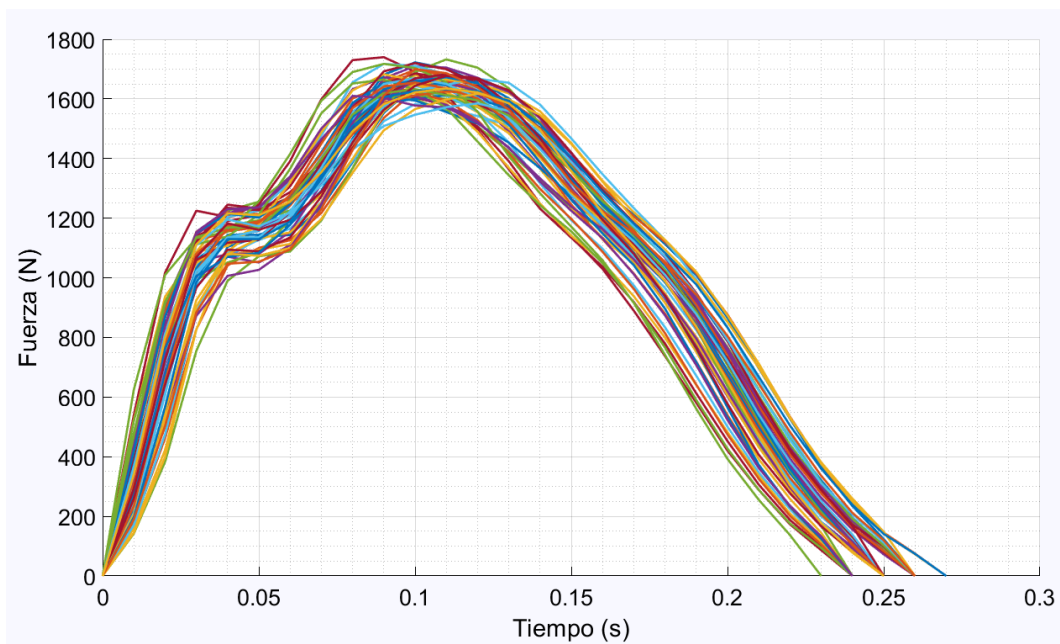


Figura 68: Eliminación valores atípicos corriendo

Realizamos el resamplado para obtener nuestros pasos finales (Ver figura [69]):

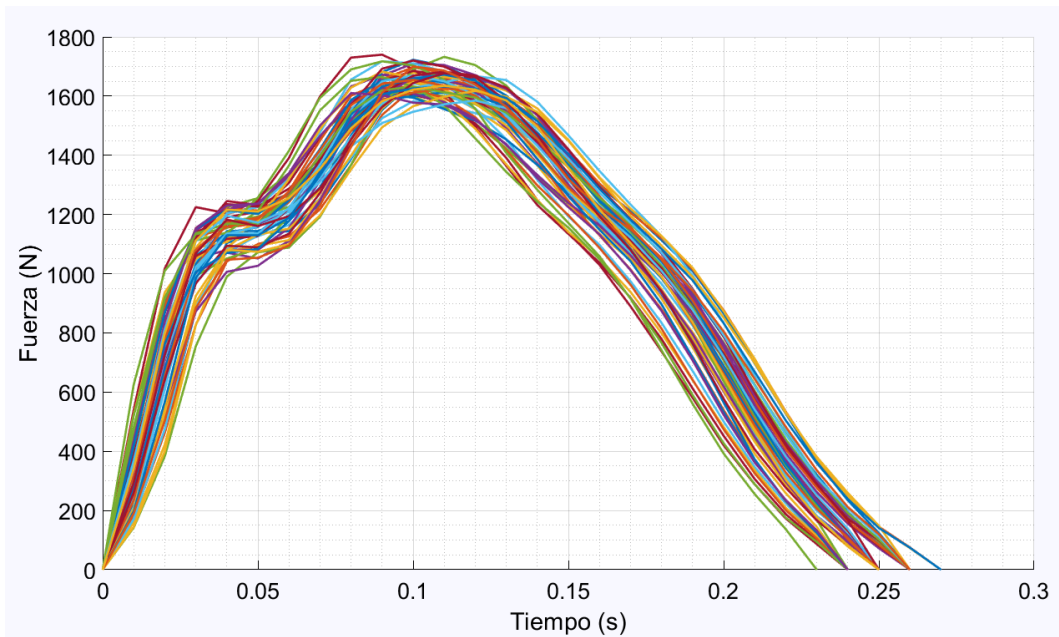


Figura 69: Pasos finales corriendo

Finalmente, obtenemos nuestro paso modelo (Ver figura [70]):

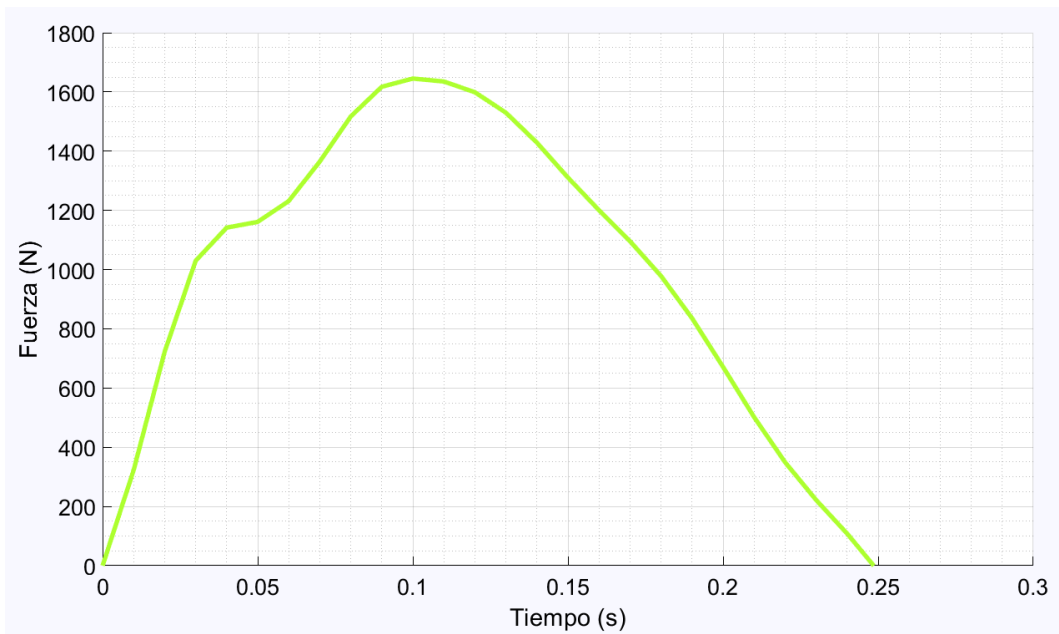


Figura 70: Paso modelo corriendo

4- ANALISIS DE RESULTADOS

Una vez realizado el cálculo del paso modelo para cada una de las mediciones, tendremos las curvas de todos los pasos, las cuales podemos juntar en una gráfica para ver a simple vista su evolución (Ver figura [71]):

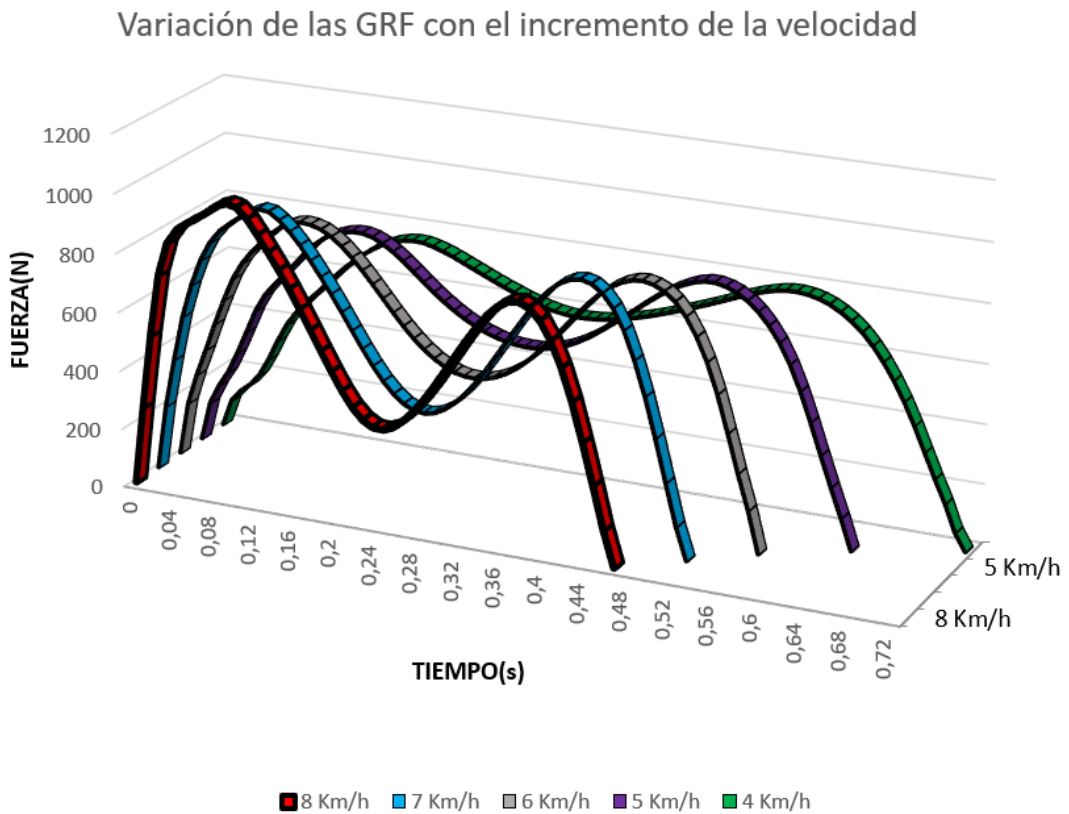


Figura 71: Variación de las GRF andando

En una primera inspección visual, podemos ver claramente como el tiempo del paso disminuye a medida que la velocidad aumenta, es decir, los pasos son más rápidos, esto provoca, que para poder mantener el equilibrio, al acortar la duración de este paso, la fuerza aplicada aumenta y cómo podemos ver los máximos son cada vez más altos, un aspecto curioso a destacar, es que aunque la fuerza máxima, es mayor a medida que la velocidad aumenta, el calor del mínimo central disminuya, es decir, cada vez hay más diferencia de fuerza entre los máximos y el mínimo central, como podemos ver, la forma de M se acentúa más a medida que la velocidad aumenta.

Ahora, al igual que para los datos de marcha caminando, una vez obtenidas todas las curvas correspondientes a los ensayos de marcha en carrera, vamos a realizar un primer análisis visual para los datos de calculados (Ver figura [72]):

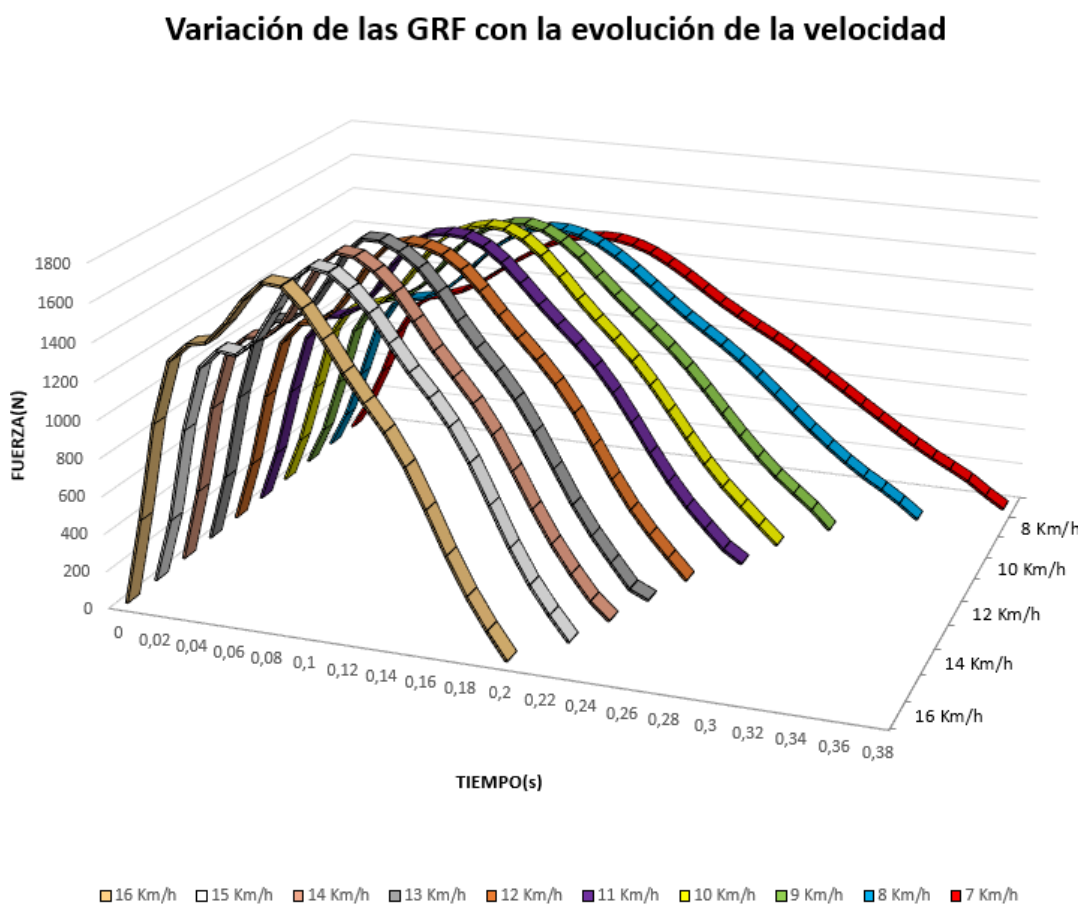


Figura 72: Variación de las GRF corriendo

Como podemos ver a simple vista, al igual que en los anteriores ensayos, a medida que la velocidad aumenta, la duración del paso disminuye, y a su vez, vemos que los máximos son cada vez mayores, por lo que a medida que aumenta la velocidad, también aumenta la fuerza aplicada.

Una vez observada la variación de las pisadas a simple vista, vamos a profundizar más en el análisis.

4.1 Análisis final de los ensayos caminando

Para realizar un análisis más detallado, nos vamos a fijar en los puntos más significativos de las curvas (Ver figura [73]).

Los principales puntos de interés son distintos para los dos ensayos (Ver figura [74]).

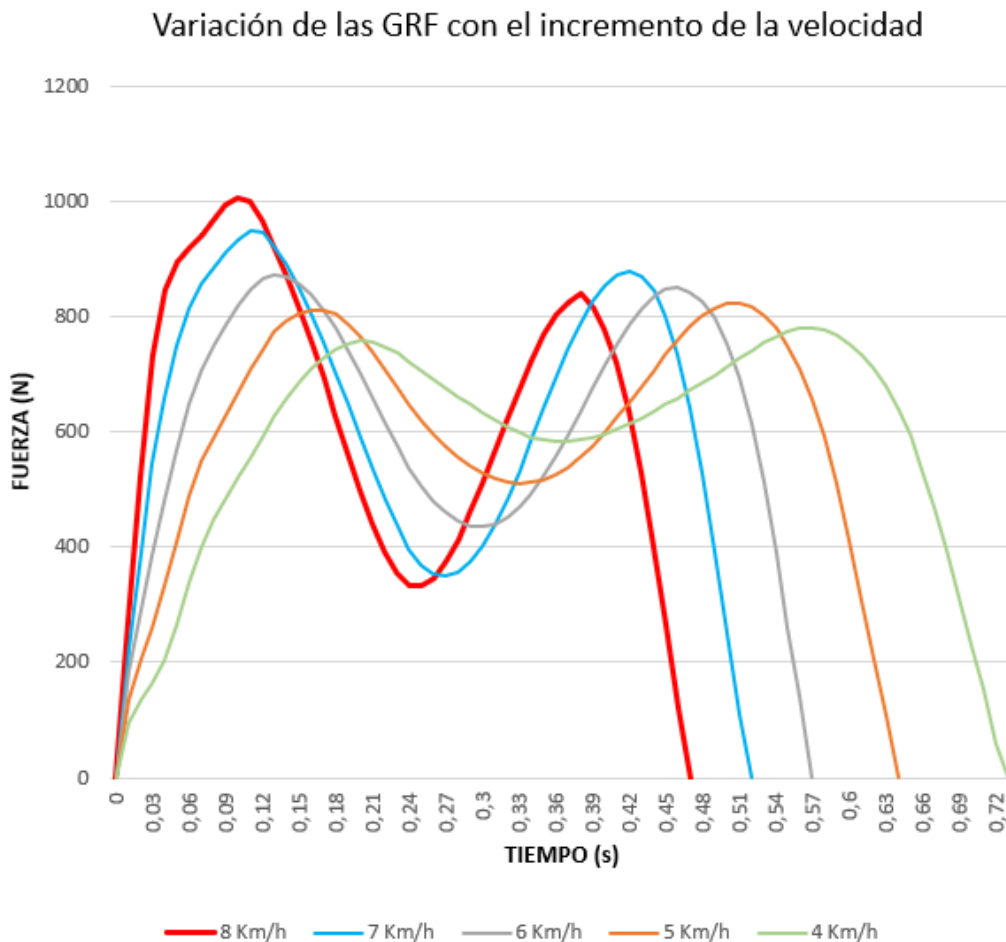


Figura 73: Variación GRFs andando

En el ensayo de marcha caminando, en primer lugar, analizaremos el valor de los dos máximos y el mínimo central, para poder observar de una forma gráfica la evolución de estos y poder aproximar el valor de cualquiera de estos puntos de interés para otras velocidades no experimentadas gracias a una aproximación por mínimos cuadrados.

Para obtener los valores de los puntos más significativos, lo haremos buscando en los datos a simple vista:

	A	B	C	D	E	F
1	Tiempo (s)	8 Km/h	7 Km/h	6 Km/h	5 Km/h	4 Km/h
2	0	0	0	0	0	0
3	0,01	268,954	222,6528	184,2048	136,52256	96,03797
4	0,02	520,9845	390,771	290,973	205,04634	135,515
5	0,03	731,4444	544,5315	383,2388	258,48122	163,3936
6	0,04	846,7017	658,5463	478,4837	330,69122	204,2306
7	0,05	895,4582	748,6726	567,7526	409,52134	265,5011
8	0,06	920,709	813,8147	647,1924	489,42488	336,5984
9	0,07	941,6	856,9928	705,933	549,48915	400,3409
10	0,08	966,592	885,4208	749,3008	591,08768	447,59
11	0,09	993,6234	911,9016	785,3752	629,08195	486,5036
12	0,1	1007,416	935,4313	819,5388	668,62476	521,3898
13	0,11	999,0592	950,7529	848,1412	708,6611	556,917
14	0,12	965,8541	945,946	866,1033	744,37707	593,2775
15	0,13	918,1844	922,6908	872,597	772,84085	627,543
16	0,14	866,4056	890,0285	869,2936	792,36707	658,2728
17	0,15	812,853	850,2184	858,262	805,52012	685,6559
18	0,16	754,8806	803,6836	839,2187	812,09061	709,8041
19	0,17	692,6731	754,3311	812,1564	811,89159	729,553
20	0,18	628,7626	701,7438	779,0722	803,62256	744,26
21	0,19	563,9257	646,7869	741,3728	787,19866	753,4995
22	0,2	500,383	589,7782	700,4241	764,61915	757,6186
23	0,21	440,9262	534,0498	657,7778	737,96146	756,1367
24	0,22	390,524	481,3629	614,9521	708,09707	747,9502
25	0,23	353,7807	435,3321	574,4112	677,37866	736,8455
26	0,24	333,342	397,7392	537,7321	648,07451	723,3953
27	0,25	331,8885	369,7525	506,6648	621,38659	707,7892
28	0,26	346,3443	353,302	480,0714	596,93634	692,3444
29	0,27	375,0763	348,9993	459,8616	575,10012	676,8945
30	0,28	413,4292	356,5677	444,7016	556,3778	661,4427
31	0,29	458,37	375,4144	437,0483	540,70841	646,9202
32	0,3	508,6963	402,8366	435,7092	528,70622	633,4502
33	0,31	563,1723	439,4728	440,4772	519,97232	620,2206
34	0,32	618,3214	482,6689	451,6814	513,62793	608,9672
35	0,33	672,8015	531,3805	469,0702	511,46976	599,1745
36	0,34	723,6836	584,1971	492,1502	512,11524	591,1172

Figura 74: Datos velocidades andando

Una vez localizados los valores máximos y mínimos, los metemos en una tabla para después calcular las gráficas (Ver figura [75]).

Velocidad	1º Máximo	Mínimo	2º Máximo
4	757,6185938	582,95875	780,254375
5	812,0906098	511,46976	824,1396341
6	872,597	435,70922	849,7934444
7	950,7528736	348,99931	878,3572414
8	1007,415784	331,88853	840,2088235

Figura 75: Puntos de interés andando

4.1.1 Análisis del 1º Máximo:

Juntando todos los valores en una misma gráfica obtenemos lo siguiente (Ver figura [76]):

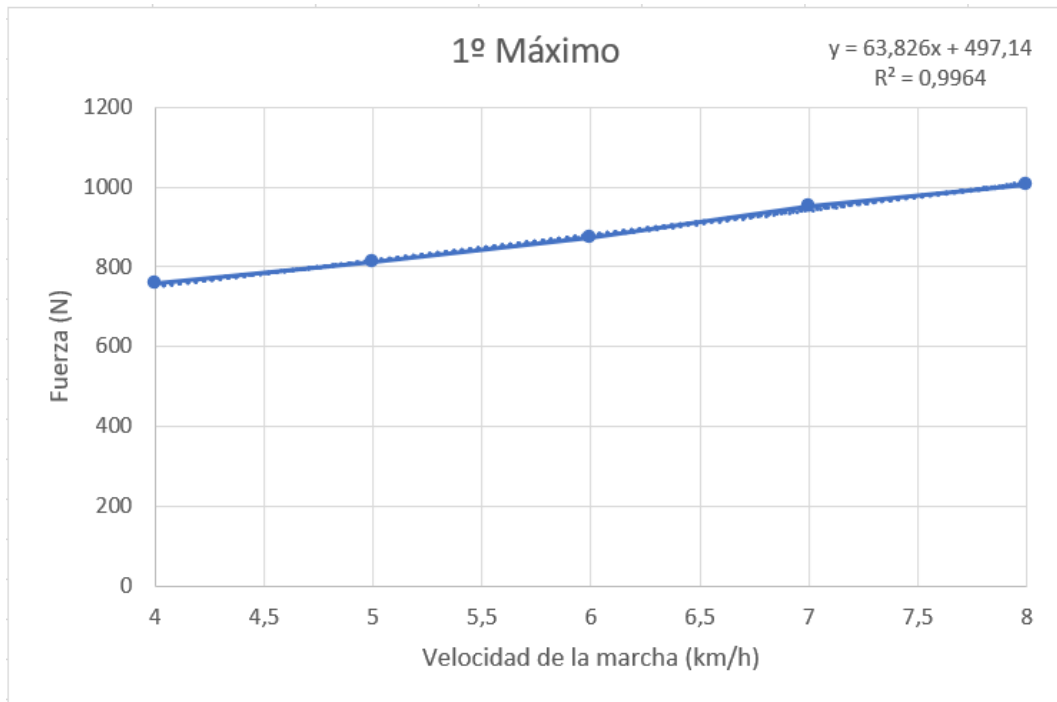


Figura 76: Evolución primer máximo andando

Realizando un ajuste por mínimos cuadrados con una línea de tendencia lineal, obtenemos un valor de R^2 de 0.996.

Como podemos observar, el primer máximo de la pisada aumenta a medida que aumenta la velocidad, y gracias a la ecuación obtenida, podemos aproximar el valor del primer máximo para una velocidad no estudiada, como por ejemplo 4.5 km/h.

También podríamos aproximar el valor del primer máximo para velocidades fuera de nuestro rango de estudio, pero la veracidad de esos datos ya no es tan cierta, ya que para otras velocidades aparecen otras variables e inestabilidades que hacen que la evolución no sea constante.

4.1.2 Análisis del MÍNIMO CENTRAL:

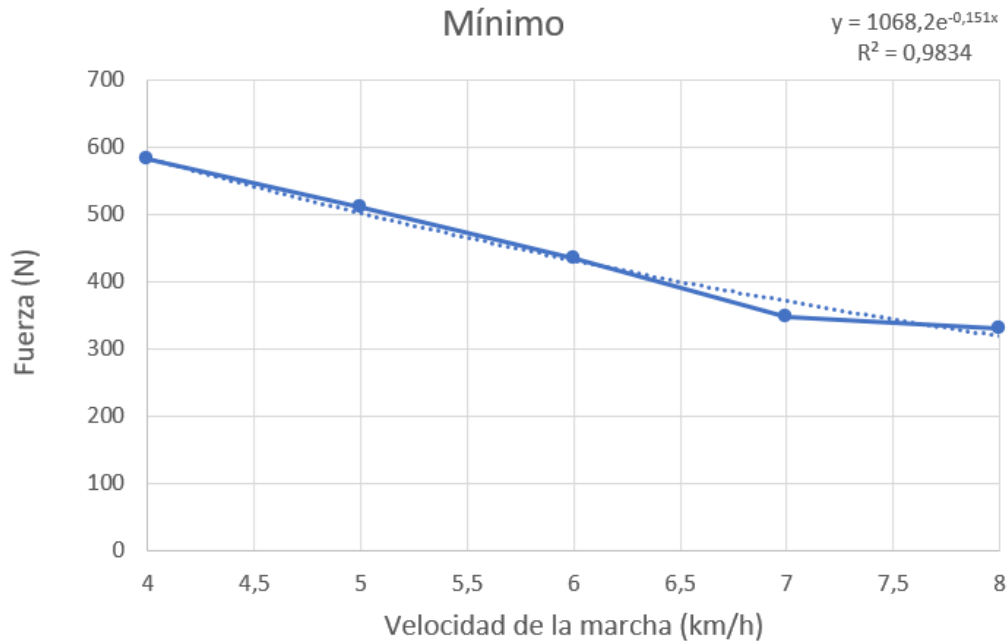


Figura 77: Evolución mínimo andando

Como podemos observar (Ver figura [77]), la fuerza aplicada en el mínimo central, es menor a medida que aumenta la velocidad, para obtener un buen ajuste, hemos realizado un ajuste exponencial, el cual consigue un factor de R^2 de 0.984.

Gracias a este ajuste, podremos aproximar el valor del mínimo para otras velocidades no analizadas.

4.1.3 Análisis del 2º Máximo:

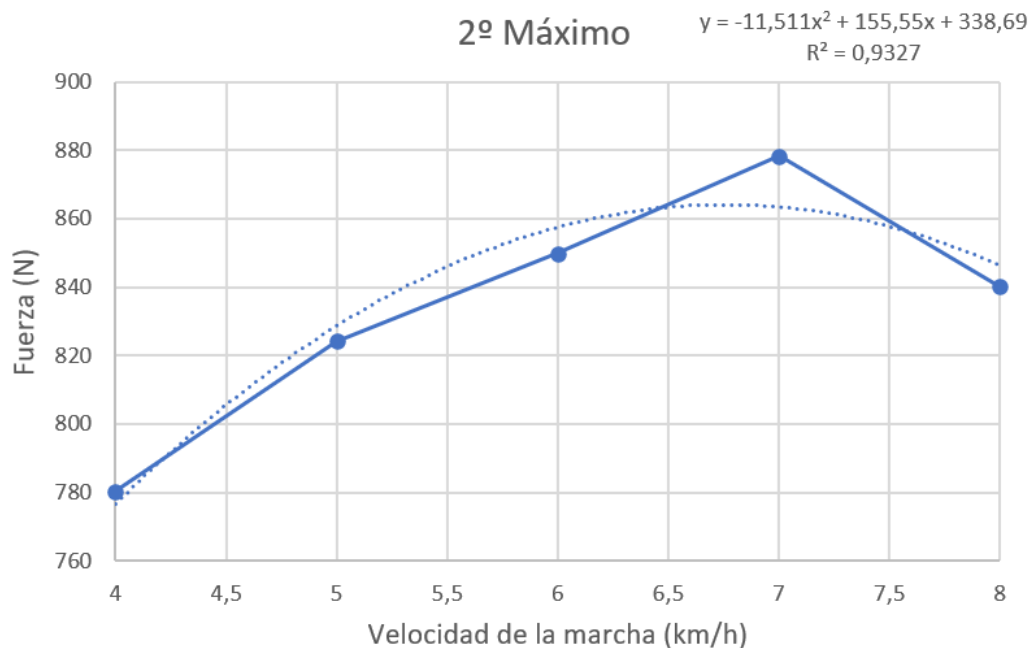


Figura 78: Evolución segundo máximo andando

Como podemos observar (Ver figura [78]), el segundo máximo de la pisada es mayor a medida que aumentamos la velocidad, hasta alcanzar un valor máximo correspondiente a la velocidad de 7 km/h, una velocidad bastante alta para mantener la marcha caminando, esto provoca que las pisadas cambien de tendencia, superando esta velocidad, el segundo máximo comienza a disminuir.

Para poder ajustarnos a esta gráfica, hemos tenido que utilizar un análisis polinómico, obteniendo un factor de R^2 de 0.9327.

En este caso, sería algo más inexacto aproximar el valor de la fuerza para otras velocidades no analizadas, ya que la forma polinómica complica el análisis.

Podemos deducir, que, con respecto a la pisada en carrera, el máximo que desaparece es el segundo, ya que es el que comienza a disminuir a partir de los 7 km/h.

Una vez analizados los 3 puntos más significativos de la pisada, hemos visto como es su evolución con respecto a la velocidad.

Otros datos interesantes a analizar pueden ser la duración del paso y la predominancia del primer máximo con respecto al segundo.

Para realizar este cálculo, obtendremos el coeficiente de predominancia, dividiendo el valor del primer máximo entre el valor del segundo máximo.

También vamos a analizar la predominancia del primer máximo con respecto al mínimo central (Ver figura [79]).

Velocidad	Duración	1º/2º	Max/min
4	0,73	0,97098923	1,299609267
5	0,64	0,98537988	1,587758807
6	0,57	1,02683423	2,002704913
7	0,52	1,08242163	2,724225651
8	0,47	1,19900643	3,035404044

Figura 79: Otros puntos de interés andando

4.1.4 Análisis de la duración:

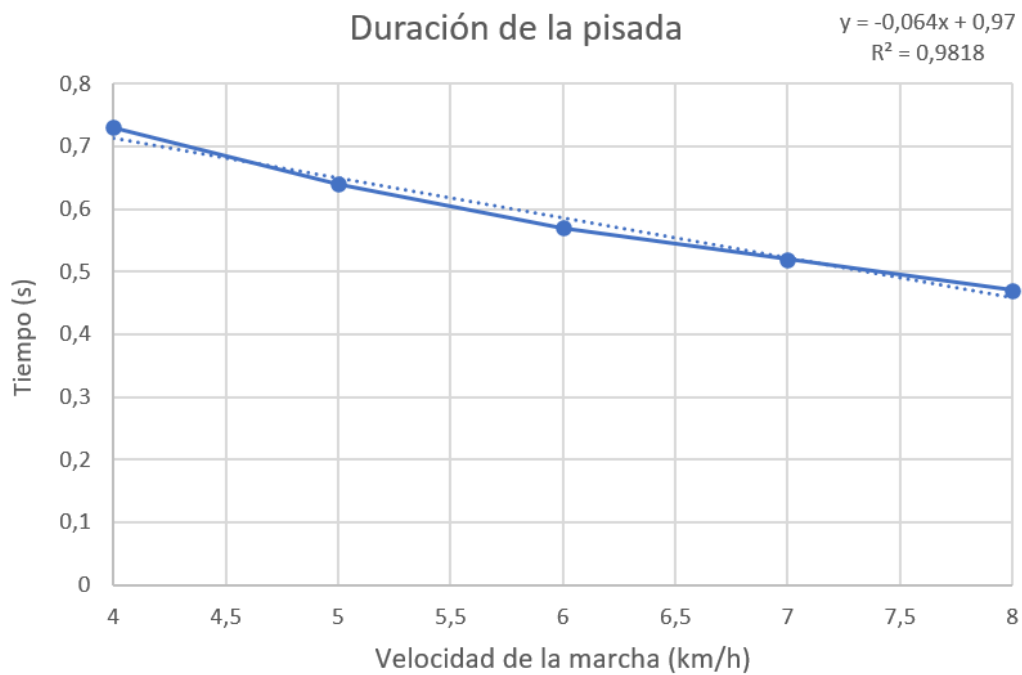


Figura 80: Evolución duración andando

En esta gráfica, podemos observar que la duración disminuye de una manera lineal, tal y como podemos ver en el ajuste, con una recta de pendiente -0.064 , obtenemos un factor de R^2 de 0.9818 (Ver figura [80]).

4.1.5 Análisis de la predominancia del primer máximo sobre el segundo:

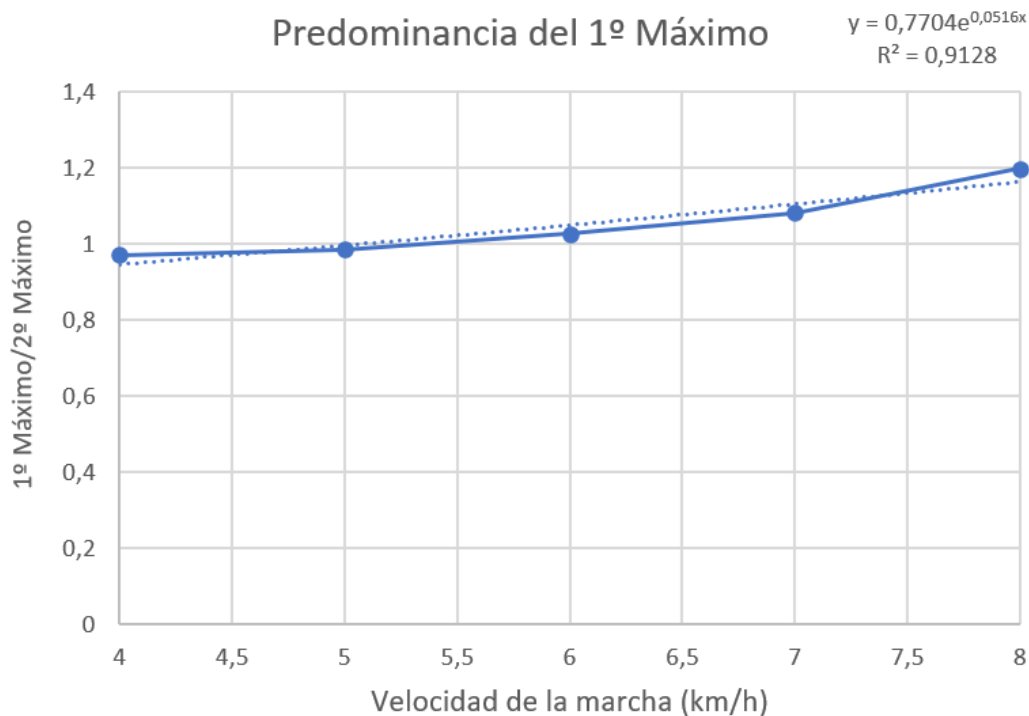


Figura 81: Evolución predominancia primer máximo andando

Como podemos observar (Ver figura [81]), la predominancia del primer máximo con respecto al segundo aumenta con la velocidad, como hemos visto anteriormente, el primer máximo aumentaba de manera progresiva, mientras que el segundo, comenzaba a disminuir a partir de los 7 km/h, esto nos permite deducir, que la predominancia del primer máximo tenderá a infinito a medida que aumente la velocidad, por eso hemos realizado un ajuste exponencial, obteniendo un factor de R^2 de 0.9128.

Un dato que cabe destacar es que para una velocidad inferior a 5 km/h el factor de predominancia es menor que 1, por lo que el segundo máximo es mayor que el primero, cosa que no ocurre a partir de los 5 km/h, donde el primer máximo domina en la predominancia, siendo más superior que el segundo a medida que aumenta la velocidad.

4.1.6 Análisis de la predominancia del primer máximo sobre el mínimo:

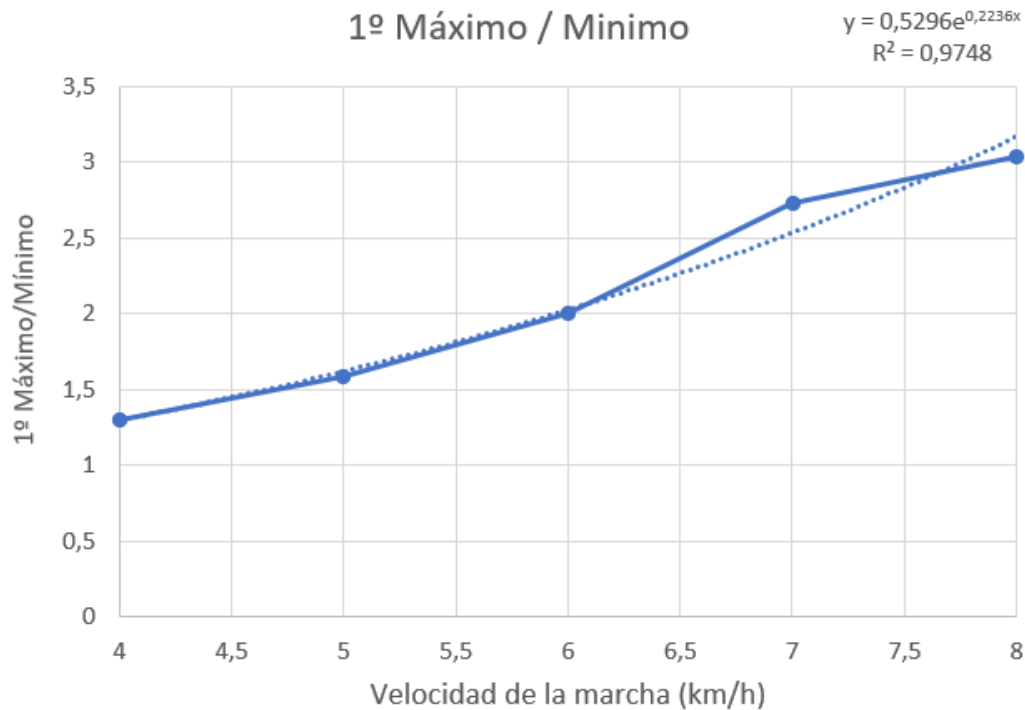


Figura 82: Evolución max/min andando

Al igual que en la gráfica anterior, podemos deducir que a medida que aumenta la velocidad, la gráfica tiende a infinito, ya que el primer máximo cada vez es mayor y el mínimo cada vez es menor, y viendo la forma de la pisada en carrera, también vemos que el mínimo desaparece, por lo que la gráfica tenderá a infinito.

Con un análisis exponencial, obtenemos un factor de R^2 de 0.9748 (Ver figura [82]).

4.2 Análisis final de los ensayos corriendo

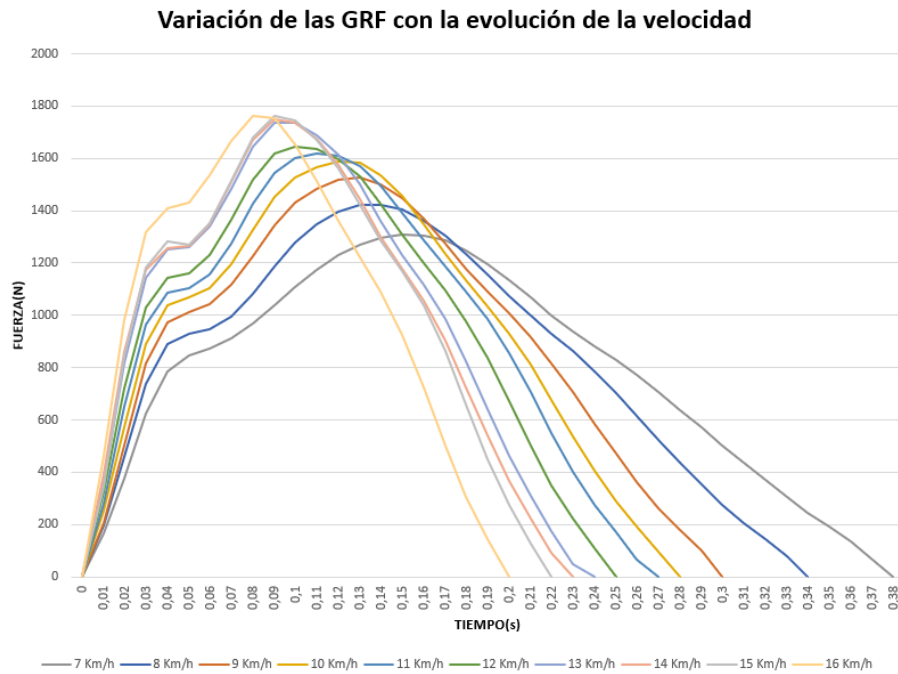


Figura 83: Variación GRF corriendo

En este caso, no tenemos tantos puntos de intereses como en la marcha caminando (Ver figura [83]), ya que aquí solo tenemos un máximo absoluto en torno a la mitad de la pisada, por lo que es el principal punto que vamos a analizar (Ver figura [84]) (Ver figura [85]).

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
1	T(s)	7 km/h	8 km/h	9 km/h	10 km/h	11 km/h	12 km/h	13 km/h	14 km/h	15 km/h	16 km/h
2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	0,01	164,7197	195,1662	207,1202	251,2696	279,2174	322,1742	359,2962	392,4388	346,8327	463,1414
4	0,02	374,5298	456,7317	503,8909	573,8048	648,0882	721,9352	817,0946	860,0143	844,2973	983,8927
5	0,03	624,7415	738,3406	816,8291	892,0606	963,4956	1029,782	1145,129	1171,826	1184,493	1317,907
6	0,04	785,696	888,0504	974,8536	1036,996	1086,686	1141,772	1253,149	1257,221	1284,932	1410,695
7	0,05	848,7663	929,3749	1014,349	1067,372	1104,673	1161,124	1262,897	1265,172	1271,664	1429,513
8	0,06	874,881	948,317	1043,694	1104,695	1157,639	1231,406	1338,085	1349,032	1354,502	1535,374
9	0,07	912,4403	996,0172	1115,124	1194,946	1275,027	1364,775	1484,338	1509,924	1514,584	1668,061
10	0,08	968,412	1081,925	1226,329	1326,028	1427,88	1517,269	1646,291	1669,61	1681,62	1762,64
11	0,09	1038,604	1186,423	1345,143	1451,174	1545,546	1617,534	1738,043	1751,361	1762,754	1755,086
12	0,1	1109,381	1278,977	1430,326	1526,325	1602,037	1645,259	1737,614	1738,631	1745,064	1655,654
13	0,11	1172,546	1348,156	1484,518	1568,021	1619,541	1635,286	1690,301	1674,942	1669,463	1514,316
14	0,12	1228,424	1397,975	1518,464	1590,426	1610,959	1599,024	1615,242	1576,56	1562,902	1361,069
15	0,13	1270,989	1422,981	1527,229	1581,864	1570,035	1529,899	1499,813	1442,517	1423,238	1220,968
16	0,14	1296,113	1423,477	1503,077	1534,866	1494,513	1428,71	1360,284	1300,98	1288,069	1089,043
17	0,15	1308,042	1403,618	1448,059	1455,426	1393,979	1310,796	1231,936	1177,669	1171,079	926,8703
18	0,16	1305,586	1362,26	1370,957	1350,357	1288,02	1200,621	1115,633	1054,14	1036,936	722,7108
19	0,17	1285,607	1304,27	1275,749	1237,061	1188,073	1095,873	985,7144	905,08	865,8618	502,8659
20	0,18	1248,517	1233,129	1180,108	1132,836	1092,033	978,3983	824,8449	726,4475	660,4264	306,7286
21	0,19	1195,93	1154,913	1091,883	1035,769	984,8434	835,785	642,6864	539,6507	451,3382	143,5318
22	0,2	1134,534	1075,336	1006,678	931,554	856,2316	671,085	462,8533	368,2555	272,9982	0
23	0,21	1067,254	999,5315	917,8028	810,7883	706,841	501,796	308,0805	221,7675	128,0182	
24	0,22	999,7342	930,9164	817,2202	675,7788	550,2568	349,1133	174,8354	91,13312	0	
25	0,23	939,8335	862,6357	705,0126	536,9302	403,365	221,7267	46,41298	0		
26	0,24	883,4302	787,2494	586,5328	405,8163	276,2352	108,1496	0			

Figura 84: Datos velocidades corriendo

4.2.1 Análisis del Máximo:

Velocidad	Maximos	Tiempo
7	1308,042	0,38
8	1423,47681	0,34
9	1527,22915	0,3
10	1590,42583	0,28
11	1619,541	0,27
12	1645,25885	0,25
13	1738,04308	0,24
14	1751,36075	0,23
15	1762,75364	0,22
16	1762,63973	0,2

Figura 85: Puntos de interés corriendo

Juntando todos los valores en una misma gráfica obtenemos lo siguiente (Ver figura [86]):

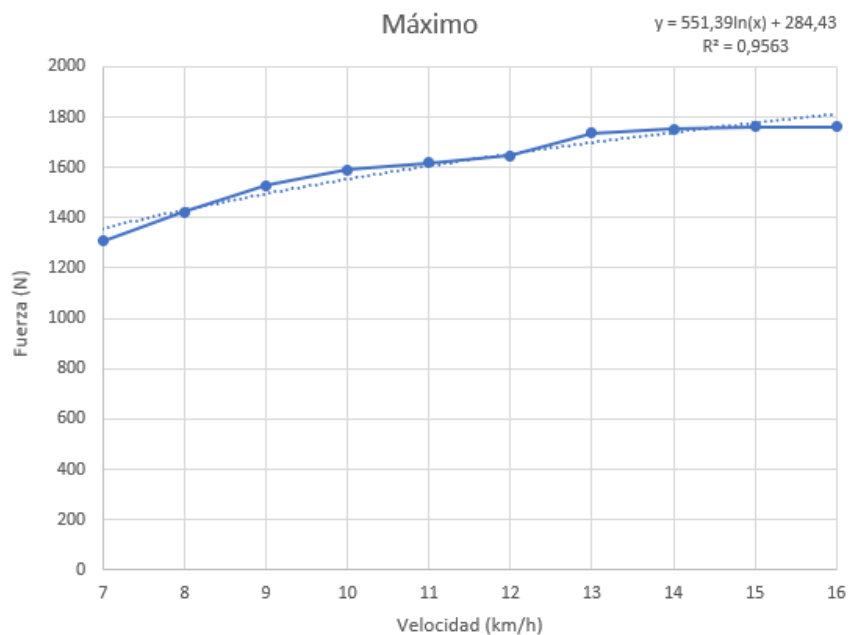


Figura 86: Evolución máximo corriendo

Como podemos ver, a medida que aumenta la velocidad aumenta la energía de la pisada, por lo que la fuerza aplicada en el máximo es mayor en cada ensayo, para realizar el ajuste hemos realizado un ajuste logarítmico, ya que como podemos observar llega una velocidad en la cual la fuerza máxima no aumenta, si no que se hace constante en torno a los 1800 N, con este ajuste logarítmico obtenemos un factor de R^2 de 0.9563.

4.2.2 Análisis de la duración:

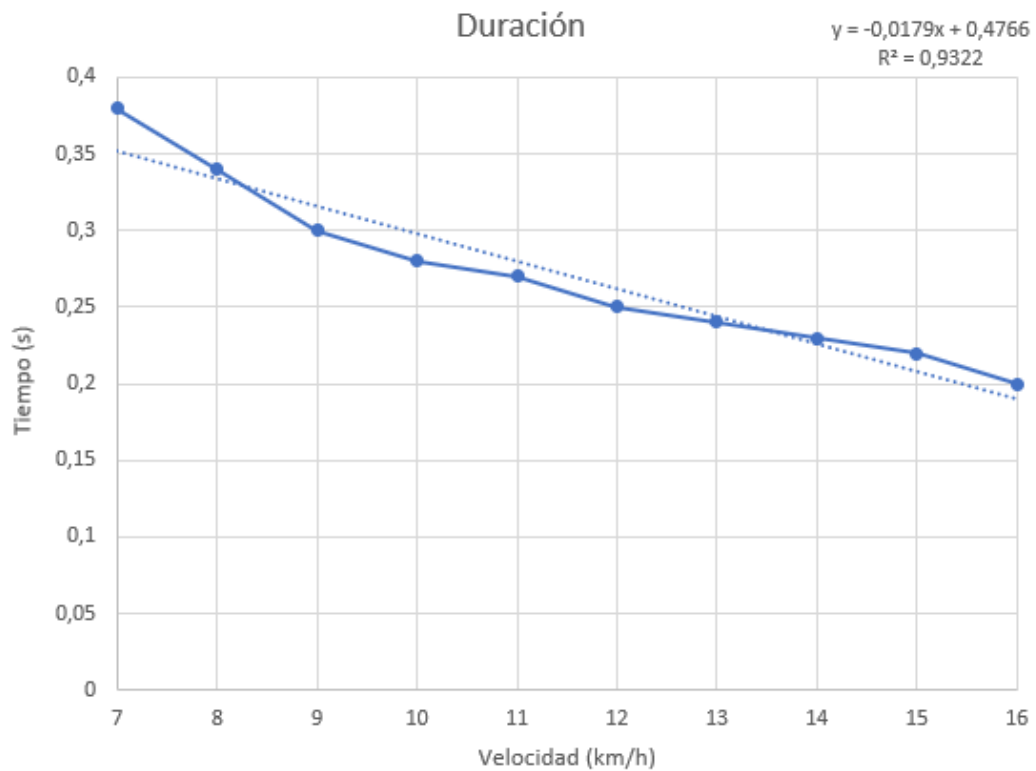


Figura 87: Evolución duración corriendo

En esta gráfica, podemos observar que la duración disminuye de una manera lineal, tal y como podemos ver en el ajuste, con una recta de pendiente -0.0179, obtenemos un factor de R^2 de 0.9322 (Ver figura [87]).

5. Conclusiones y líneas futuras

- Conclusiones

Llegando al final de este TFG, podemos decir que nuestro objetivo principal era estudiar la influencia de la velocidad en las GRFs para un individuo en concreto, nuestro estudio, ha sido satisfactorio, condensando todos sus resultados en unas graficas muy intuitivas, las cuales representan a la perfección la evolución de la forma de la pisada, así como la evolución de sus puntos de interés.

- Líneas futuras

Como continuación a nuestro estudio, sería interesante poder conocer y cuantificar la influencia de otras variables que intervienen en el acto de caminar y correr, como el peso del individuo o la frecuencia de paso, la cual, en este estudio no hemos tenido en cuenta, ya que la frecuencia, era la frecuencia natural de esa velocidad, pero sería interesante analizar la influencia de la frecuencia del paso para una determinada velocidad.

- Consideraciones adicionales

Como información adicional, hubiera sido interesante, tener en cuenta la fase aérea en carrera, y ver la evolución de su duración a medida que aumentamos la velocidad, así como la relación de tiempo que el pie está en contacto con el suelo con respecto a cuando está en el aire.

6. BIBLIOGRAFÍA

- [1] V. Racic and J. M. W. Brownjohn, “Stochastic model of near-periodic vertical loads due to humans walking,” *Adv. Eng. Informatics*, vol. 25, no. 2, pp. 259–275, 2011, doi: 10.1016/j.aei.2010.07.004.
- [2] S. A. Dugan and K. P. Bhat, “Biomechanics and analysis of running gait,” *Phys. Med. Rehabil. Clin. N. Am.*, vol. 16, no. 3, pp. 603–621, 2005, doi: 10.1016/j.pmr.2005.02.007.
- [3] Kistler Group, “Force plates and accessories,” p. 32, 2016, [Online]. Available: www.kistler.com.
- [4] Kistler TM, “Multicomponent Force Plate,” *Ratio*, pp. 20–23, 2010, [Online]. Available: <https://www.kistler.com/en/>.
- [5] “Gait analysis | Kistler.” <https://www.kistler.com/en/solutions/research-and-development-testing/biomechanics-and-force-plate/gait-analysis/> (accessed Mar. 29, 2021).
- [6] “Instrumented Treadmills — Bertec.” <https://www.bertec.com/products/instrumented-treadmills> (accessed Mar. 29, 2021).
- [7] K. E. Renner, D. S. Blaise Williams, and R. M. Queen, “The reliability and validity of the Loadsol® under various walking and running conditions,” *Sensors (Switzerland)*, vol. 19, no. 2, pp. 1–14, 2019, doi: 10.3390/s19020265.
- [8] K. E. Renner, D. S. Blaise Williams, and R. M. Queen, “The reliability and validity of the Loadsol® under various walking and running conditions,” *Sensors (Switzerland)*, vol. 19, no. 2, pp. 1–14, 2019, doi: 10.3390/s19020265.
- [9] Ground reaction force (20 July 2021 12:49 UTC). Wikipedia, The Free Encyclopedia. 3 June 2022 12:49 UTC https://en.wikipedia.org/wiki/Ground_reaction_force

ANEXO

```
%% SOFTWARE CALCULO PASO MODELO

clear
clc
close all

file='Run/10r.txt';

%% IMPORTACIÓN

data=load(file, '-ascii');
t=data(:,1);
LF=data(:,2);
RF=data(:,4);

figure(1)

plot(t,LF,'r',t,RF,'b','LineWidth',2);

xlabel('Tiempo (s)')
ylabel('Fuerza (N)')

set(gcf,'color','#f8f8ff');
set(gca,'color','w');
set(gcf,'InvertHardcopy','off');
set(gca,'YColor','k');
set(gca,'XColor','k');
set(gca,'fontsize',20);

legend('Pie izquierdo','Pie derecho')

grid on
grid minor

%% AISLAMIENTO DE LOS PASOS
```



```

tmin=10;
tmax=60;

LF=LF(t>=tmin & t<=tmax);
RF=RF(t>=tmin & t<=tmax);
t=t(t>=tmin & t<=tmax);

Total=LF+RF;
LF=[t(:) LF(:)];
RF=[t(:) RF(:)];
Total=[t(:) Total(:)];

figure(2)
hold on
plot(LF(:,1),LF(:,2),'r',RF(:,1),RF(:,2),'b','LineWidth',3);

hold off

xlabel('Tiempo (s)')
ylabel('Fuerza (N)')

set(gcf,'color','#f8f8ff');
set(gca,'color','w');
set(gcf,'InvertHardcopy','off');
set(gca,'YColor','k');
set(gca,'XColor','k');
set(gca,'fontsize',40);

legend('Pie izquierdo','Pie derecho')

axis([10 60 0 1700])

grid on
grid minor

set(gcf,'units','normalized','outerposition',[0 0 1 1])
saveas(gcf,'TodosLosPasos.png')

Fmin=20;

% PIE IZQUIERDO

PasoLF=zeros(1,2);
k=1;
z=1;
bool=false;
for i=1:length(LF(:,1))
    if LF(i,2)>Fmin
        PasoLF(z:z,:)=LF(i,:);
        z=z+1;
        bool=true;
    end
    if LF(i,2)<Fmin && bool==true
        A{k}=PasoLF(1:end,:);
    end
end

```

```

        k=k+1;
        PasoLF=zeros(1,2);
        bool=false;
        z=1;
    end
end

% PIE DERECHO

PasoRF=zeros(1,2);
k=1;
z=1;
bool=false;
for i=1:length(RF(:,1))
    if RF(i,2)>Fmin
        PasoRF(z:z,:)=RF(i,:);
        z=z+1;
        bool=true;
    end
    if RF(i,2)<Fmin && bool==true
        B{k}=PasoRF(1:end,:);
        k=k+1;
        PasoRF=zeros(1,2);
        bool=false;
        z=1;
    end
end

%% CENTRADO

% PIE IZQUIERDO
for j=1:length(A)
    A{j}(1,2)=0;
    A{j}(end,2)=0;
end

% PIE DERECHO
for j=1:length(B)
    B{j}(1,2)=0;
    B{j}(end,2)=0;
end

% PIE IZQUIERDO
timeA=cell(1,length(A));
tgA=zeros(length(A),1);
FgA=zeros(length(A),1);
for j=1:length(A)
    tgA(j,1)=sum(A{j}(:,1)).*(A{j}(:,2))/sum(A{j}(:,2));
    FgA(j,1)=sum(A{j}(:,2)).*(A{j}(:,2))/sum(A{j}(:,2));
    timeA{j}=A{j}(:,1)-tgA(j,1);
end

% PIE DERECHO
timeB=cell(1,length(B));

```

```

tgB=zeros(length(B),1);
FgB=zeros(length(B),1);
for j=1:length(B)
    tgB(j,1)=sum((B{j}(:,1)).*(B{j}(:,2)))/sum(B{j}(:,2));
    FgB(j,1)=sum((B{j}(:,2)).*(B{j}(:,2)))/sum(B{j}(:,2));
    timeB{j}=B{j}(:,1)-tgB(j,1);
end

figure(3)
hold on
for j=1:length(timeA)
    plot(timeA{j},A{j}(:,2),'LineWidth',2)
end
hold off

xlabel('Tiempo (s)');
ylabel('Fuerza (N)');

set(gcf,'color','#f8f8ff');
set(gca,'color','w');
set(gcf,'InvertHardcopy','off');
set(gca,'YColor','k');
set(gca,'XColor','k');
set(gca,'fontsize',20);

grid on
grid minor

figure(4)
hold on
for j=1:length(timeB)
    plot(timeB{j},B{j}(:,2),'LineWidth',2)
end
hold off

xlabel('Tiempo (s)');
ylabel('Fuerza (N)');

set(gcf,'color','#f8f8ff');
set(gca,'color','w');
set(gcf,'InvertHardcopy','off');
set(gca,'YColor','k');
set(gca,'XColor','k');
set(gca,'fontsize',20);

grid on
grid minor

%% NORMALIZADO: REESCALADO PARA TENER LOS VALORES DEL TIEMPO ENTRE
0 Y 1

% PIE IZQUIERDO

```

```

tiempo_normalizado1=cell(1,length(A));
desnormalizado1=zeros(1,length(A));
paso_izq=cell(1,length(A));

for j=1:length(timeA)
    tiempo_normalizado1{j}=(timeA{j}-
min(timeA{j}))/ (max(timeA{j})-min(timeA{j}));
    desnormalizado1(j)=max(timeA{j})-min(timeA{j});
end

for j=1:length(tiempo_normalizado1)
    paso_izq{j}=[tiempo_normalizado1{j}(:,1),A{j}(:,2)];
end

% PIE DERECHO
tiempo_normalizado2=cell(1,length(B));
desnormalizado2=zeros(1,length(B));
paso_der=cell(1,length(B));

for j=1:length(timeB)
    tiempo_normalizado2{j}=(timeB{j}-
min(timeB{j}))/ (max(timeB{j})-min(timeB{j}));
    desnormalizado2(j)=max(timeB{j})-min(timeB{j});
end

for j=1:length(tiempo_normalizado2)
    paso_der{j}=[tiempo_normalizado2{j}(:,1),B{j}(:,2)];
end

figure(5)
hold on
for j=1:length(paso_izq)
    plot(paso_izq{j}(:,1),paso_izq{j}(:,2), 'LineWidth',2)
end
hold off

xlabel('Tiempo (s)');
ylabel('Fuerza (N)');

set(gcf, 'color', '#f8f8ff');
set(gca, 'color', 'w');
set(gcf, 'InvertHardcopy', 'off');
set(gca, 'YColor', 'k');
set(gca, 'XColor', 'k');
set(gca, 'fontsize', 20);

grid on
grid minor

figure(6)
hold on
for j=1:length(paso_der)

```

```

        plot(paso_der{j}(:,1),paso_der{j}(:,2), 'LineWidth',2)
    end
    hold off

    xlabel('Tiempo (s)');
    ylabel('Fuerza (N)');

    set(gcf, 'color', '#f8f8ff');
    set(gca, 'color', 'w');
    set(gcf, 'InvertHardcopy', 'off');
    set(gca, 'YColor', 'k');
    set(gca, 'XColor', 'k');
    set(gca, 'fontsize', 20);

    grid on
    grid minor

%% ELIMINAR VALORES ATÍPICOS

% PIE IZQUIERDO
bool=false;
c=0;
while bool==false
    for i=1:length(paso_izq)
        try
            [max,a]=findpeaks(paso_izq{i}(:,2));
            [min,b]=findpeaks((-1).*(paso_izq{i}(:,2)));
            if isempty(max)==1 || isempty(min)==1
                paso_izq(i)=[];
                continue
            end
            if length(max)==2 && length(min)==1
                if a(1)<b && a(2)>b
                    c=c+1;
                    continue
                else
                    paso_izq(i)=[];
                end
            else
                paso_izq(i)=[];
            end
        catch
            if i==length(paso_izq)
                break
            else
                continue
            end
        end
    end
    if c==length(paso_izq)
        bool=true;
    else
        bool=false;
        c=0;
    end
end

```

```

end

% PIE DERECHO
bool=false;
c=0;
while bool==false
    for i=1:length(paso_der)
        try
            [max,a]=findpeaks(paso_der{i}(:,2));
            [min,b]=findpeaks((-1).*(paso_der{i}(:,2)));
            if isempty(max)==1 || isempty(min)==1
                paso_der(i)=[];
                continue
            end
            if length(max)==2 && length(min)==1
                if a(1)<b && a(2)>b
                    c=c+1;
                    continue
                else
                    paso_der(i)=[];
                end
            else
                paso_der(i)=[];
            end
        catch
            if i==length(paso_der)
                break
            else
                continue
            end
        end
    end
    if c==length(paso_der)
        bool=true;
    else
        bool=false;
        c=0;
    end
end

figure(7)
hold on
for j=1:length(paso_izq)
    plot(paso_izq{j}(:,1),paso_izq{j}(:,2),'LineWidth',2)
end
hold off

xlabel('Tiempo (s)');
ylabel('Fuerza (N)');

set(gcf,'color','#f8f8ff');
set(gca,'color','w');
set(gcf,'InvertHardcopy','off');
set(gca,'YColor','k');

```

```

set(gca,'XColor','k');
set(gca,'fontsize',20);

grid on
grid minor

figure(8)
hold on
for j=1:length(paso_der)
    plot(paso_der{j}(:,1),paso_der{j}(:,2),'LineWidth',2)
end
hold off

xlabel('Tiempo (s)');
ylabel('Fuerza (N)');

set(gcf,'color','#f8f8ff');
set(gca,'color','w');
set(gcf,'InvertHardcopy','off');
set(gca,'YColor','k');
set(gca,'XColor','k');
set(gca,'fontsize',20);

grid on
grid minor

%% ELIMINACIÓN DE VALORES ATÍPICOS MEDIANTE EL MÉTODO TUCKEY

%
PIE IZQUIERDO

pts_max1=zeros(1,length(paso_izq));
pts_max2=zeros(1,length(paso_izq));
pts_min=zeros(1,length(paso_izq));

maxtime1=zeros(1,length(paso_izq));
maxtime2=zeros(1,length(paso_izq));
mintime=zeros(1,length(paso_izq));

figure(9)
hold on
for i=1:length(paso_izq)
    [max1,locs1]=findpeaks(paso_izq{i}(:,2));
    [min1,locs2]=findpeaks((-1).*(paso_izq{i}(:,2)));
    plot(locs1,max1,'.',locs2,min1*(-1),'.','MarkerSize',40)

    pts_max1(i)=max1(1);
    pts_max2(i)=max1(2);
    pts_min(i)=(-1)*min1;

    maxtime1(i)=locs1(1);
    maxtime2(i)=locs1(2);
    mintime(i)=locs2;
end

```

```

end
hold off

xlabel('Posiciones de tiempo')
ylabel('Fuerza (N)')

set(gcf, 'color', '#f8f8ff');
set(gca, 'color', 'w');
set(gcf, 'InvertHardcopy', 'off');
set(gca, 'YColor', 'k');
set(gca, 'XColor', 'k');
set(gca, 'fontsize', 40);

grid on
grid minor

RI1=iqr(pts_max1);
RI2=iqr(pts_max2);
RI3=iqr(pts_min);

U1=prctile(pts_max1,75)+1.5*RI1;
D1=prctile(pts_max1,25)-1.5*RI1;

U2=prctile(pts_max2,75)+1.5*RI2;
D2=prctile(pts_max2,25)-1.5*RI2;

U3=prctile(pts_min,75)+1.5*RI3;
D3=prctile(pts_min,25)-1.5*RI3;

RI1t1=iqr(maxtime1);
RI1t2=iqr(maxtime2);
RI1t3=iqr(mintime);

Ut1=prctile(maxtime1,75)+1.5*RI1t1;
Dt1=prctile(maxtime1,25)-1.5*RI1t1;

Ut2=prctile(maxtime2,75)+1.5*RI1t2;
Dt2=prctile(maxtime2,25)-1.5*RI1t2;

Ut3=prctile(mintime,75)+1.5*RI1t3;
Dt3=prctile(mintime,25)-1.5*RI1t3;

for i=1:length(paso_izq)
    try
        [pks1,time1]=findpeaks(paso_izq{i}(:,2));
        [pks2,time2]=findpeaks((-1).*paso_izq{i}(:,2));
        if (pks1(1) > U1 || pks1(1) < D1) || (pks1(2) > U2 ||
pks1(2) < D2) || ((pks2*(-1)) > U3 || (pks2*(-1)) < D3)
            paso_izq(i)=[];
        end
        if (time1(1) > Ut1 || time1(1) < Dt1) || (time1(2) > Ut2
|| time1(2) < Dt2) || (time2 > Ut3 || time2 < Dt3)
            paso_izq(i)=[];
        end
    end
end

```



```
    catch
        break
    end
end

%

%          PIE DERECHO

pts_max1=zeros(1,length(paso_der));
pts_max2=zeros(1,length(paso_der));
pts_min=zeros(1,length(paso_der));

maxtime1=zeros(1,length(paso_der));
maxtime2=zeros(1,length(paso_der));
mintime=zeros(1,length(paso_der));

figure(12)
hold on
for i=1:length(paso_der)
    [max1,locs1]=findpeaks(paso_der{i}(:,2));
    [min1,locs2]=findpeaks((-1).*(paso_der{i}(:,2)));
    plot(locs1,max1,'.',locs2,min1*(-1),'.','MarkerSize',20);

    pts_max1(i)=max1(1);
    pts_max2(i)=max1(2);
    pts_min(i)=(-1)*min1;

    maxtime1(i)=locs1(1);
    maxtime2(i)=locs1(2);
    mintime(i)=locs2;
end
hold off

xlabel('Tiempo (s)');
ylabel('Fuerza (N)');

set(gcf,'color','#f8f8ff');
set(gca,'color','w');
set(gcf,'InvertHardcopy','off');
set(gca,'YColor','k');
set(gca,'XColor','k');
set(gca,'fontsize',20);

grid on
grid minor

RI1=iqr(pts_max1);
RI2=iqr(pts_max2);
RI3=iqr(pts_min);
```

```

U1=prctile(pts_max1,75)+1.5*RI1;
D1=prctile(pts_max1,25)-1.5*RI1;

U2=prctile(pts_max2,75)+1.5*RI2;
D2=prctile(pts_max2,25)-1.5*RI2;

U3=prctile(pts_min,75)+1.5*RI3;
D3=prctile(pts_min,25)-1.5*RI3;

RIIt1=iqr(maxtime1);
RIIt2=iqr(maxtime2);
RIIt3=iqr(mintime);

Ut1=prctile(maxtime1,75)+1.5*RIIt1;
Dt1=prctile(maxtime1,25)-1.5*RIIt1;

Ut2=prctile(maxtime2,75)+1.5*RIIt2;
Dt2=prctile(maxtime2,25)-1.5*RIIt2;

Ut3=prctile(mintime,75)+1.5*RIIt3;
Dt3=prctile(mintime,25)-1.5*RIIt3;

for i=1:length(paso_der)
    try
        [pks1,time1]=findpeaks(paso_der{i}(:,2));
        [pks2,time2]=findpeaks((-1).*paso_der{i}(:,2));
        if (pks1(1) > U1 || pks1(1) < D1) || (pks1(2) > U2 ||
pks1(2) < D2) || ((pks2*(-1)) > U3 || (pks2*(-1)) < D3)
            paso_der(i)=[];
        end
        if (time1(1) > Ut1 || time1(1) < Dt1) || (time1(2) > Ut2
|| time1(2) < Dt2) || (time2 > Ut3 || time2 < Dt3)
            paso_der(i)=[];
        end
    catch
        break
    end
end

figure(15)
hold on
for j=1:length(paso_izq)
    plot(paso_izq{j}(:,1),paso_izq{j}(:,2),'LineWidth',2)
end
hold off

xlabel('Tiempo (s)');
ylabel('Fuerza (N)');

set(gcf,'color','#f8f8ff');
set(gca,'color','w');
set(gcf,'InvertHardcopy','off');
set(gca,'YColor','k');

```

```

set(gca,'XColor','k');
set(gca,'fontsize',20);

grid on
grid minor

figure(16)
hold on
for j=1:length(paso_der)
    plot(paso_der{j}(:,1),paso_der{j}(:,2),'LineWidth',2)
end
hold off

xlabel('Tiempo (s)');
ylabel('Fuerza (N)');

set(gcf,'color','#f8f8ff');
set(gca,'color','w');
set(gcf,'InvertHardcopy','off');
set(gca,'YColor','k');
set(gca,'XColor','k');
set(gca,'fontsize',20);

grid on
grid minor

%% RESAMPLEADO

% PIE IZQUIERDO
t_nuevo=0:0.01:1;
Pasos_izq=zeros(length(t_nuevo),length(paso_izq));
for i=1:length(paso_izq)

    gI_izq=griddedInterpolant(paso_izq{i}(:,1),paso_izq{i}(:,2),'spline');

    F_nuevo_izq=gI_izq(t_nuevo);

    Pasos_izq(:,i)=F_nuevo_izq;
end

% PIE DERECHO
Pasos_der=zeros(length(t_nuevo),length(paso_der));
for i=1:length(paso_der)

    gI_der=griddedInterpolant(paso_der{i}(:,1),paso_der{i}(:,2),'spline');

```

```

    F_nuevo_der=gI_der(t_nuevo);

    Pasos_der(:,i)=F_nuevo_der;
end

figure(17)
hold on
[~,n]=size(Pasos_izq);
for j=1:n
    plot(t_nuevo,Pasos_izq(:,j),'LineWidth',2)
end
hold off

xlabel('Tiempo (s)');
ylabel('Fuerza (N)');

set(gcf,'color','#f8f8ff');
set(gca,'color','w');
set(gcf,'InvertHardcopy','off');
set(gca,'YColor','k');
set(gca,'XColor','k');
set(gca,'fontsize',20);

axis([0 1 0 1200]);

grid on
grid minor

figure(18)
hold on
[~,n]=size(Pasos_der);
for j=1:n
    plot(t_nuevo,Pasos_der(:,j),'LineWidth',2)
end
hold off

xlabel('Tiempo (s)');
ylabel('Fuerza (N)');

set(gcf,'color','#f8f8ff');
set(gca,'color','w');
set(gcf,'InvertHardcopy','off');
set(gca,'YColor','k');
set(gca,'XColor','k');
set(gca,'fontsize',20);

axis([0 1 0 1200]);

grid on
grid minor

```

```

%% CARACTERIZACIÓN DEL PASO

% Paso Izquierdo
media_izq=mean(Pasos_izq,2);
desv_izq=std(Pasos_izq,0,2);
Eu_izq=media_izq + 3*std(Pasos_izq,0,2);
Ed_izq=media_izq - 3*std(Pasos_izq,0,2);

% Paso Derecho
media_der=mean(Pasos_der,2);
desv_der=std(Pasos_der,0,2);
Eu_der=media_der + 3*std(Pasos_der,0,2);
Ed_der=media_der - 3*std(Pasos_der,0,2);

% Pie izquierdo
figure(19)
hold on
[~,n]=size(Pasos_izq);
for j=1:n
    plot(t_nuevo,Pasos_izq(:,j), 'LineWidth',2)
end

plot(t_nuevo,media_izq, 'color', '#adff2f', 'LineWidth',4)
plot(t_nuevo,Eu_izq, '--', 'color', '#228b22', 'LineWidth',3)
plot(t_nuevo,Ed_izq, '--', 'color', '#228b22', 'LineWidth',3)

hold off

xlabel('Tiempo (s)');
ylabel('Fuerza (N)');

set(gcf, 'color', '#f8f8ff');
set(gca, 'color', 'w');
set(gcf, 'InvertHardcopy', 'off');
set(gca, 'YColor', 'k');
set(gca, 'XColor', 'k');
set(gca, 'fontsize',20);

axis([0 1 0 1200]);

grid on
grid minor

% Pie derecho
figure(20)
hold on
[~,n]=size(Pasos_der);
for j=1:n
    plot(t_nuevo,Pasos_der(:,j), 'LineWidth',2)
end

```

```
plot(t_nuevo,media_der,'color','#adff2f','LineWidth',4)
plot(t_nuevo,Eu_der,'--','color','#228b22','LineWidth',3)
plot(t_nuevo,Ed_der,'--','color','#228b22','LineWidth',3)

hold off

xlabel('Tiempo (s)');
ylabel('Fuerza (N)');

set(gcf,'color','#f8f8ff');
set(gca,'color','w');
set(gcf,'InvertHardcopy','off');
set(gca,'YColor','k');
set(gca,'XColor','k');
set(gca,'fontsize',20);

axis([0 1 0 1200]);

grid on
grid minor
```