



UNIVERSIDAD
DE MÁLAGA



ESCUELA DE INGENIERÍAS INDUSTRIALES

Departamento de Ingeniería Mecánica, Térmica y de Fluidos

Área de Ingeniería Mecánica

TRABAJO FIN DE GRADO

**DESARROLLO DE UNA HERRAMIENTA PARA EL ANÁLISIS Y
AJUSTE DE DATOS EXPERIMENTALES DE NEUMÁTICOS**

Grado en

Ingeniería Mecánica

Autor: MANUEL RINCÓN PERALTA

Tutor: JAVIER PÉREZ FERNÁNDEZ

Cotutor: MANUEL GONZALO ALCÁZAR VARGAS

MÁLAGA, Junio de 2025

Resumen

El Área de Ingeniería Mecánica de la Universidad de Málaga cuenta con un largo recorrido en el desarrollo de herramientas que permiten caracterizar el comportamiento de los neumáticos y su interacción con el asfalto, incluyendo la construcción de un banco de neumáticos y de vehículos para realizar pruebas en condiciones reales de trabajo.

Toda esta atención en los neumáticos se justifica por su importante papel en la dinámica de los vehículos, ya que son el único punto de contacto con el suelo, por lo que son los responsables de transmitir todos los esfuerzos de aceleración, frenada y fuerzas laterales en las curvas. Si se quiere estimar el comportamiento del vehículo a través de simulaciones, es fundamental tener un modelo preciso de ellos.

Este Trabajo de Fin de Grado se centra en el desarrollo de una herramienta que pueda facilitar el análisis de los datos experimentales obtenidos de un banco de ensayos de neumáticos, la selección de los puntos necesarios para realizar un ajuste de ellos, la utilización de un método de optimización basado en algoritmos genéticos para el ajuste del modelo y la exportación de archivos *TYDEX* y TIR, que son los tipos de archivos estandarizados para la distribución de datos de ensayos y modelos de neumáticos.

El objetivo principal es la reducción considerable del tiempo requerido para el filtrado de los datos obtenidos del banco, la generación de archivos *TYDEX*, el ajuste del modelo y la generación del TIR, que contiene el modelo del neumático ensayado.

Palabras clave

Neumáticos, *Magic Formula*, algoritmos genéticos, modelado de neumáticos, banco de ensayos de neumáticos, MATLAB, *TYDEX* y TIR.

Abstract

The Mechanical Engineering Department of the University of Malaga has a long history in the development of tools to characterise the behaviour of tyres and their interaction with asphalt, including the construction of a tyre test bench and vehicles for testing under real working conditions.

All this attention to tyres is justified by their important role in vehicle dynamics, as they are the only point of contact with the ground and are responsible for transmitting all acceleration, braking and lateral forces during cornering. If we want to estimate the behaviour of the vehicle through simulations, it is required to have an accurate model of them.

This Final Degree Project focuses on the development of a tool that can ease the analysis of the experimental data obtained from a tyre test bench, the selection of the necessary points to make an adjustment of them, the use of an optimisation method based on genetic algorithms for the adjustment of the model and the export of TYDEX and TIR files, which are the standardised file types for the distribution of test data and tyre models.

The main objective is the considerable reduction of the time required for the filtering of the data obtained from the bench, and the generation of TYDEX files, the model fitting and the generation of the TIR file, which contains the tyre model of the tested tyre.

Keywords

Tyres, *Magic Formula*, genetic algorithms, tyre modelling, tyre test bench, MATLAB, TYDEX and TIR.

Tabla de contenido

1. Objeto.....	6
2. Modelos y comportamiento de los neumáticos	7
2.1. Modelos empíricos y semiempíricos.....	7
2.1.1. Modelos empíricos y semiempíricos simples	8
2.1.2. Modelos empíricos y semiempíricos avanzados: <i>Magic Formula</i>	9
2.2. Modelos físicos.....	12
2.2.1. Modelos físicos simples.....	13
2.2.2. Modelos físicos avanzados.....	13
2.3. Comportamiento de los neumáticos	14
2.3.1. Longitudinal Puro.....	14
2.3.2. Lateral Puro.....	15
2.3.3. Combinado	17
3. Banco de ensayos de neumáticos	18
3.1. Formato de archivos de transferencia de datos: TDMS, TYDEX y TIR.....	19
4. Desarrollo de app: “ <i>TDMS to TYDEX</i> ”	23
4.1. Importación de archivos	27
4.2. Organización y visualización de archivos	28
4.3. Discretización de los ensayos	28
4.4. Exportación de archivos	34
5. Métodos de ajuste: Algoritmos genéticos.....	35
5.1. Funciones de coste	35
5.2. Algoritmos de minimización del error.....	36
5.3. <i>Differential Evolution</i>	41
6. Desarrollo de app “ <i>TYDEX to TIR</i> ”.....	46
6.1. Importación de datos.....	49
6.2. Ajuste de curvas.....	49
6.3. Exportación del modelo.....	54

7. Conclusiones	55
7.1. Trabajo futuro	55
Referencias	56
Anexo I. <i>Magic Formula</i> para PAC-MC	59
Anexo II. <i>Magic Formula</i> para PAC-2002	64
Anexo III. Ejemplo de <i>TYDEX</i>	69
Anexo IV. Códigos de MATLAB	72
Anexo V. Ejemplo de TIR	80

Índice de figuras

Figura 1.- Clasificación de los distintos tipos de modelos de neumático según su complejidad	7
Figura 2.- Curva de Fx frente a deslizamiento longitudinal típica del modelo de Dugoff 8	
Figura 3.- Curva de Fx frente a deslizamiento longitudinal típica del modelo MF	9
Figura 4.- Significado de los parámetros de la <i>Magic Formula</i> . Fuente: [2]	10
Figura 5.- Distintas formas de la curva variando solo el parámetro mostrado	12
Figura 6.- Modelo de neumático <i>Rigid Ring</i>	13
Figura 7.- Datos sin filtrar obtenidos de un ensayo de frenada y la simetría para fuerzas de aceleración	15
Figura 8.- Datos sin filtrar obtenidos de un ensayo de Fy puro con $\gamma=15^\circ$	16
Figura 9.- Elipse de fricción obtenida con ensayos experimentales sin filtrar con $\alpha=10^\circ$ y $\gamma=0^\circ$	17
Figura 10.- Banco de ensayo de neumáticos	18
Figura 11.- Sistema de coordenadas C-Axis. Fuente: [2]	20
Figura 12.- Sistema de coordenadas W-Axis. Fuente: [2]	21
Figura 13.- Esquema general de transformación de archivos hasta la obtención del modelo.....	22
Figura 14.- Aplicación <i>TDMS to TDX</i>	26
Figura 15.- Organización de ensayos combinados	28
Figura 16.- Elección de puntos del ensayo lateral puro con detalle de la división por tramos	29
Figura 17.- Selección de puntos de un ensayo longitudinal puro con el método descrito	31
Figura 18.- Corrección de medición en ensayo longitudinal	32
Figura 19.- Aplicación <i>TDMS to TYDEX</i> en funcionamiento	33
Figura 20.- Apartado 'Datos del ensayo' de la aplicación <i>TDMS to TDX</i>	34
Figura 21.- Representación visual del método de descenso de gradiente.....	38
Figura 22.- Método de Nelder-Mead. Fuente: [8]	39

Figura 23.- Fundamentos de los algoritmos genéticos	40
Figura 24.- Método de búsqueda de mejores miembros	40
Figura 25.- Rápida convergencia debido a una buena semilla	42
Figura 26.- Aplicación <i>TYDEX to TIR</i>	48
Figura 27.- Demostración de convergencia con los parámetros predeterminados	49
Figura 28.- Parámetros necesarios para el ajuste y cuadro de selección del tipo de curva	50
Figura 29.- Pantalla de carga durante el ajuste	51
Figura 30.- Terminal de muestra del error del modelo	51
Figura 31.- Demostración de ajuste de una curva $F_x-\kappa$ con la app	52
Figura 32.- Demostración de ajuste de una curva $F_y-\alpha$ con la app	52
Figura 33.- Aplicación <i>TYDEX to TIR</i> en funcionamiento	53
Figura 34.- Bloque de neumático de <i>Simscape Multibody</i> . Fuente: [12]	54

1. Objeto

El presente Trabajo de Fin de Grado tiene como objetivo principal el desarrollo de una herramienta para facilitar la obtención de archivos de simulación de formato .tir, los cuales contienen el modelo matemático de neumáticos generado a partir de datos experimentales obtenidos en un banco de ensayos.

La herramienta será programada íntegramente en MATLAB y deberá contar con una interfaz gráfica intuitiva que permita al usuario cargar los datos obtenidos en el banco de ensayos, procesarlos y finalmente obtener el modelo del neumático ensayado. De esta manera, se busca reducir significativamente el tiempo y la complejidad del proceso, haciendo más eficiente el análisis y ajuste de datos.

El modelo generado será el descrito por Pacejka en la *Magic Formula* (MF) y contará con 2 variantes: PAC-2002, orientado a neumáticos de automóviles y PAC-MC, específico para neumáticos de motocicleta

2. Modelos y comportamiento de los neumáticos

El neumático representa el único punto de contacto de un vehículo con el suelo, condicionando el funcionamiento del resto de partes del vehículo. Esto hace que su estudio sea fundamental para conocer el comportamiento de un vehículo.

Cuanto mayor sea la fidelidad del modelo respecto a la realidad, más fiables serán los resultados obtenidos al estudiar el comportamiento del vehículo en diferentes situaciones. Sin embargo, es igualmente importante tener en cuenta el coste computacional que tendrá el modelo ya que, si este es elevado, conllevará varias limitaciones a la hora de utilizar el modelo, como grandes tiempos de simulación o necesidad de más recursos de hardware.

Es por ello por lo que se han desarrollado diversos modelos de neumáticos, cada uno útil en un ámbito diferente.

Según la Figura 1, nos encontramos con 2 grandes tipos de modelos de neumáticos, clasificados según la complejidad de ellos.

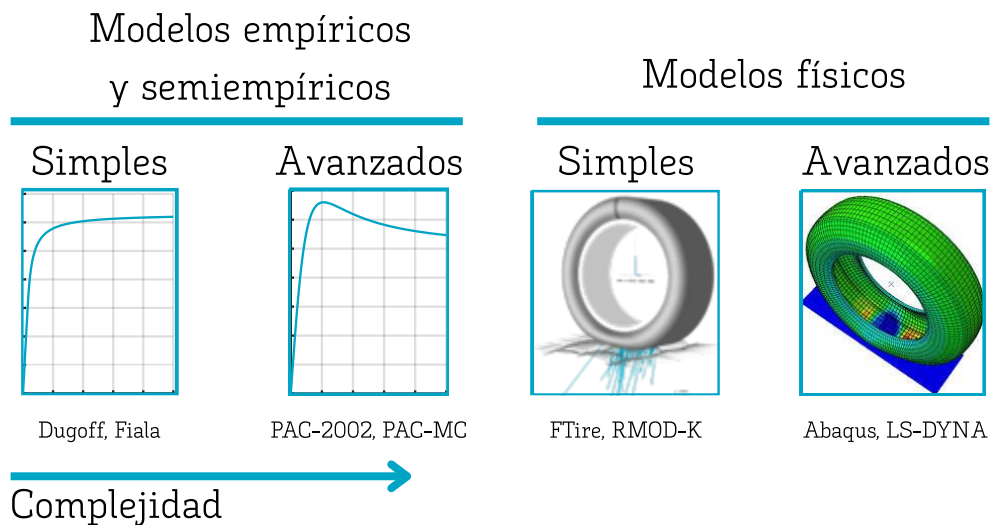


Figura 1.- Clasificación de los distintos tipos de modelos de neumático según su complejidad

2.1. Modelos empíricos y semiempíricos

Los modelos empíricos se basan en el ajuste de funciones matemáticas a datos experimentales. No describen los fenómenos físicos internos del neumático, sino realizan una aproximación al comportamiento global de este de una forma computacionalmente más eficiente. Dentro de los modelos empíricos, la complejidad y

cantidad de ecuaciones usadas para determinar el comportamiento del neumático determinará el grado de precisión que se puede alcanzar con ese modelo.

2.1.1. Modelos empíricos y semiempíricos simples

Se trata de modelos de bajo coste computacional y que se calibran con pocos parámetros, sacrificando así la fidelidad de los modelos con la realidad. Para lograr esto, se deben asumir ciertas simplificaciones que hacen que el modelo sea tan solo válido para bajas frecuencias de trabajo y bajos índices de deslizamiento [1]. En el caso de los modelos semiempíricos, estas ecuaciones se basan en leyes físicas, que con ciertas asunciones permiten calcular las fuerzas longitudinales y laterales.

Un ejemplo puede ser el modelo de Dugoff (Figura 2) o el de Fiala, en el que, entre otras cosas, se asume que el ángulo de caída no tiene efecto en las fuerzas del neumático [2].

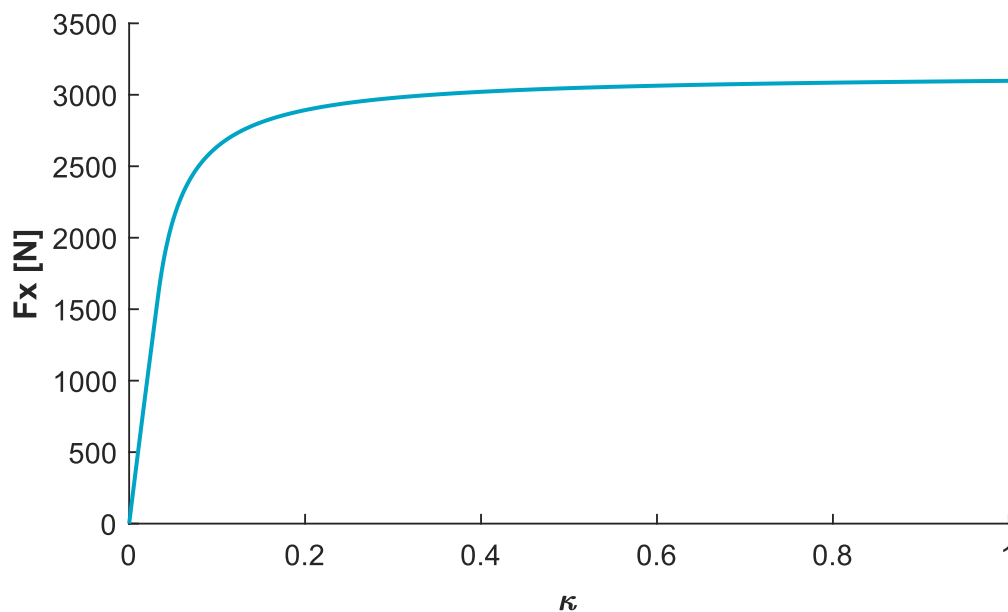


Figura 2.- Curva de F_x frente a deslizamiento longitudinal típica del modelo de Dugoff

Tiene aplicación en situaciones donde interese centrarse en la zona lineal del neumático, es decir pequeños deslizamientos longitudinales y ángulos de deriva reducidos (Figura 2), por ejemplo, en el control de vehículos o simulaciones a tiempo real [1], donde son necesarios los cálculos rápidos.

2.1.2. Modelos empíricos y semiempíricos avanzados: *Magic Formula*

Son modelos con un coste computacional medio y con mayor número de parámetros que los modelos empíricos simples, ajustándose mejor al comportamiento real del neumático en cuanto a las fuerzas de adherencia que se generan, sin llegar a entrar en su comportamiento interno. Su principal utilidad es la simulación de vehículos completos, para el análisis de su comportamiento o desarrollo de estos, aunque también son utilizados en simuladores.

El más conocido es la *Magic Formula* (MF) de Pacejka [3] [4], que cuenta con algunas variaciones que cubren una gran cantidad de usos, como por ejemplo el PAC-MC, adaptado a neumáticos de motocicleta.

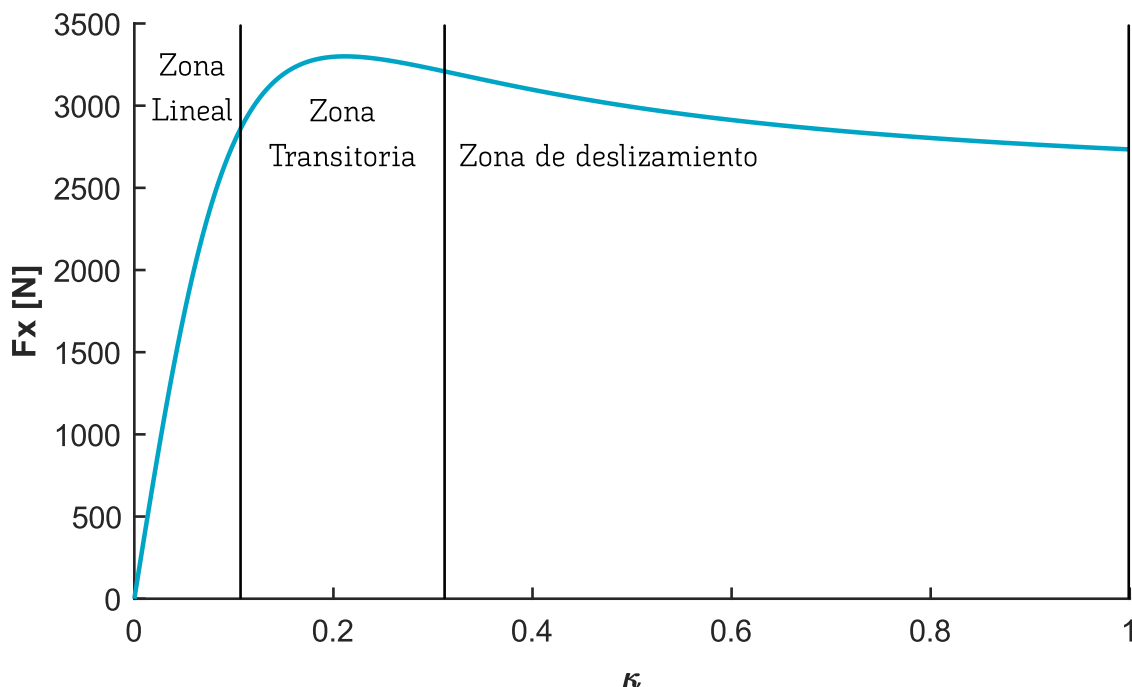


Figura 3.- Curva de F_x frente a deslizamiento longitudinal típica del modelo MF

Como se puede observar en la Figura 3, el comportamiento del neumático se puede dividir en 3 zonas:

- **Zona lineal**, que representa la rigidez del neumático ante determinadas fuerzas.
- **Zona transitoria**, en la que el neumático presenta la mayor fuerza, y representa su límite de agarre. Esta zona es la más complicada de modelar.
- **Zona de deslizamiento**, donde el neumático ofrece una adherencia casi constante, pero con un gran deslizamiento. A esta zona se llega con grandes

ángulos de deriva en el caso de curvas $F_y-\alpha$ o con grandes deslizamientos longitudinales (el neumático comienza a patinar) en el caso de curvas $F_x-\kappa$.

La ecuación en la que se basa la *Magic Formula* es:

$$F(x) = D * \sin [C * \arctan \{B * x - E(B * x - \arctan (B * x))\}] \quad (1)$$

Donde $F(x)$ podrá ser F_x con x siendo el deslizamiento longitudinal (κ), o F_y con x siendo el deslizamiento lateral (α).

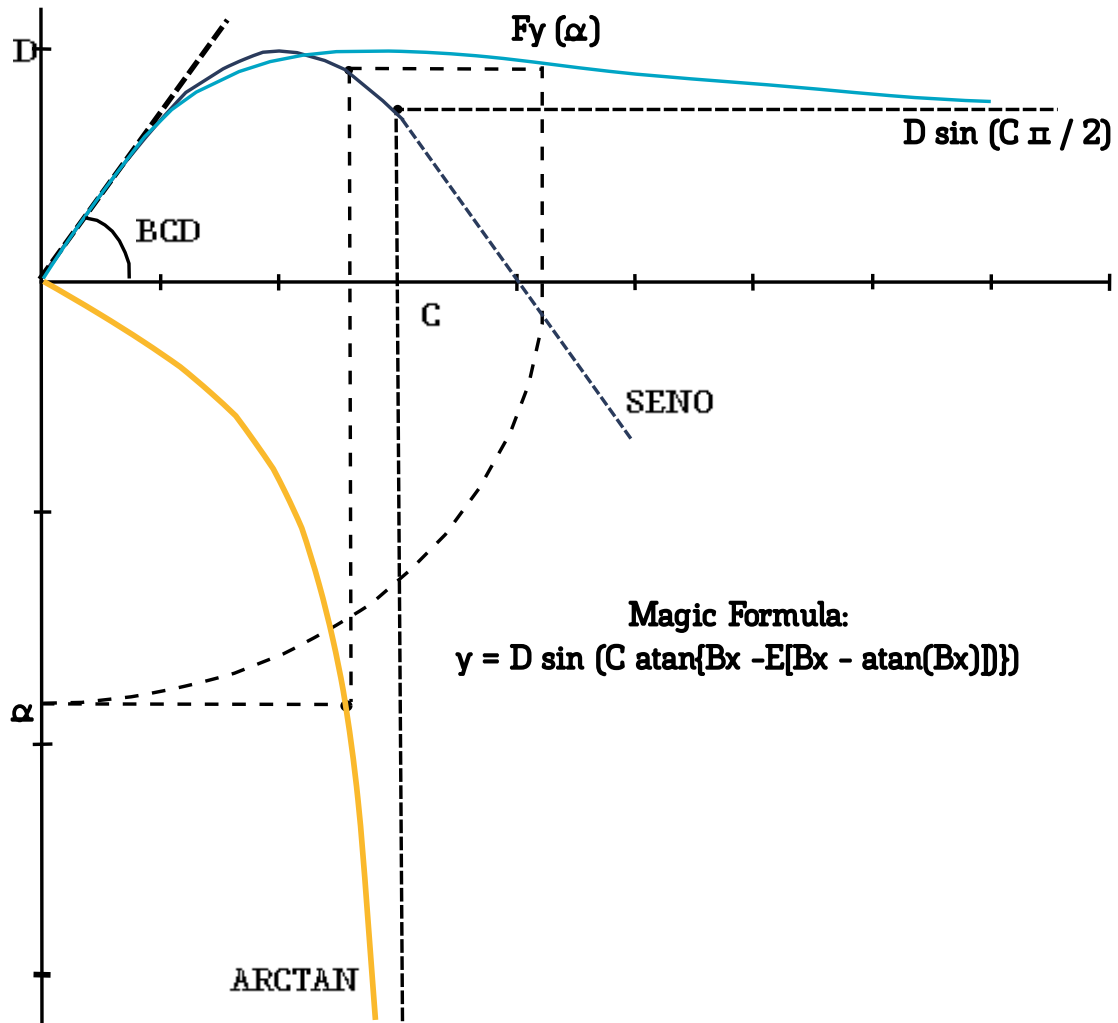


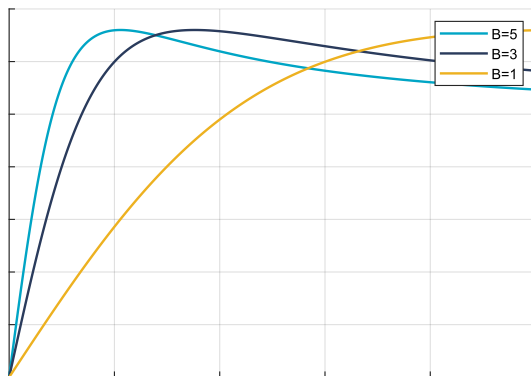
Figura 4.- Significado de los parámetros de la *Magic Formula*. Fuente: [2]

Como se ve en la Figura 4, cada uno de estos parámetros tiene un significado específico en la curva:

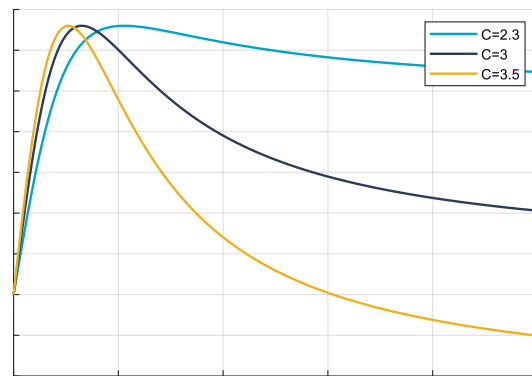
- **Factor de rigidez (B).** Es el único factor que multiplica directamente a κ o α . Modifica la rigidez de la zona lineal del neumático.

2. Modelos y comportamiento de los neumáticos

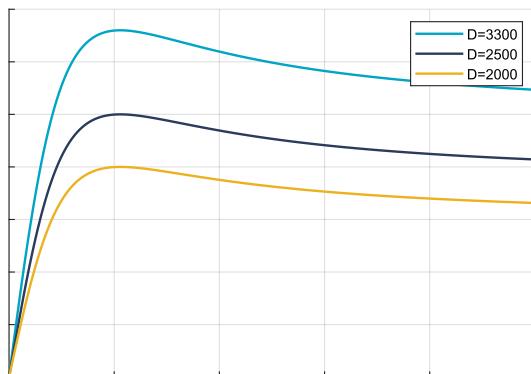
- **Factor de forma (C).** Define la forma que tendrá la curva en su zona transitoria, haciéndola más suave con valores de C bajos y haciéndose más notorio el valor máximo cuando C es mayor.
- **Valor pico (D).** Representa donde se encontrará el mayor valor de la curva.
- **Factor de curvatura (E).** Se corresponde con la curvatura de la zona de deslizamiento, siendo más curva con valores bajos de E. Para este parámetro se toma un valor máximo de 1, ya que con valores mayores la curva pierde sentido y no se corresponde con la fuerza que pueda hacer ningún neumático, según indica Pacejka [4].
- **Slip stiffness (BCD).** Representa la rigidez de la zona lineal, es decir, la inclinación que tendrá la curva en su inicio.



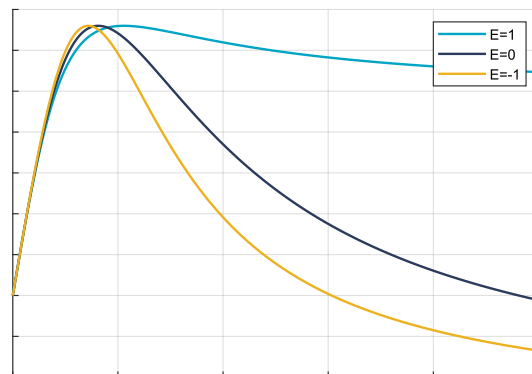
(a) Variación de la curva con distintos valores de B



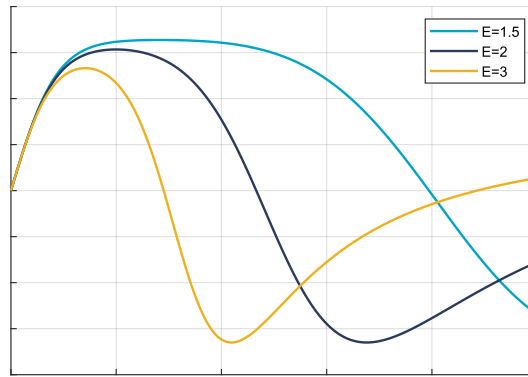
(b) Variación de la curva con distintos valores de C



(c) Variación de la curva con distintos valores de D



(d) Variación de la curva con distintos valores de E



(e) Variación de la curva con valores de E mayores a 1

Figura 5.- Distintas formas de la curva variando solo el parámetro mostrado

Los parámetros B, C, D y E son a su vez funciones del deslizamiento longitudinal, lateral, del ángulo de caída o la carga vertical en el neumático (F_z), adaptando la curva a cada situación específica. Estas otras funciones cuentan a su vez con otros parámetros, que son constantes, por lo que serán estos los que debemos ajustar para obtener el modelo del neumático.

Para la herramienta de modelado de neumáticos, se emplearán 2 versiones de la *Magic Formula*, ambas desarrolladas por Adams [2]: PAC-2002, que se utilizará cuando el neumático sea de automóvil y PAC-MC, en el caso de los neumáticos de motocicleta. Se han elegido estos modelos debido a su uso extendido en la industria y a la relación entre fidelidad y dificultad del modelado del neumático. Las ecuaciones específicas de cada modelo están incluidas en el Anexo I. *Magic Formula* para PAC-MC y Anexo II. *Magic Formula* para PAC-2002.

2.2. Modelos físicos

Los modelos físicos se basan en la representación de los fenómenos mecánicos y estructurales que ocurren en el neumático cuando este interactúa con el terreno. A diferencia de los empíricos, estos no buscan ajustar una función matemática a datos experimentales, sino reproducir el comportamiento del neumático a partir de leyes físicas, para lo que es necesario conocer algunas propiedades intrínsecas del neumático. Con ello se consigue representar la respuesta del neumático ante altas frecuencias de trabajo o en estado transitorio, pudiendo realizar análisis NVH (*Noise, Vibration and Harshness*), estudios de confort o de desgaste.

2.2.1. Modelos físicos simples

Se trata de modelos que representan el comportamiento del neumático mediante el posicionamiento de masas, muelles y amortiguadores en puntos discretos del neumático [5].

Están basados en los principios del *Rigid Ring Model* (Figura 6), y muchos de ellos implementan ciertas modificaciones para conseguir más realismo, haciendo que el anillo no sea rígido, sino flexible y permitir así visualizar la deformación del neumático [5], siendo así muy fieles a la realidad.

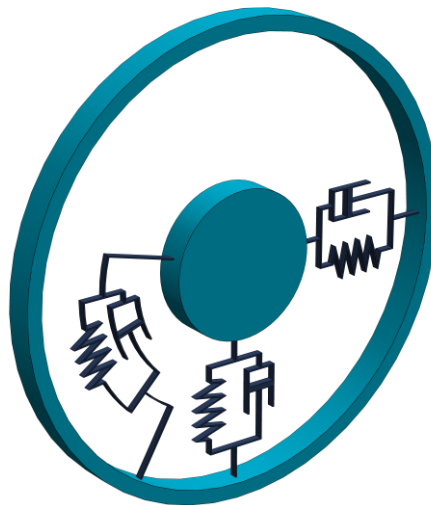


Figura 6.- Modelo de neumático *Rigid Ring*

Algunos ejemplos de este tipo de modelo son el RMOD-K, FTire o CDTire, siendo estos 2 últimos los más potentes actualmente, sin llegar a simular el neumático por elementos finitos.

2.2.2. Modelos físicos avanzados

Estos modelos son los que más se asemejan a la realidad, por lo que conllevan un altísimo coste computacional. Son análisis por elementos finitos (FEM) del neumático, donde se puede dividir el modelo 3D del neumático en las diferentes capas de las que está compuesto y hacer una malla a cada una de ellas [6].

Con todo ello se pueden visualizar entre otros, los distintos modos de vibración del neumático, la deformación en diferentes situaciones, como por ejemplo ante un bache y el efecto que tendrán las diferentes presiones de inflado que se le den al neumático.

Este tipo de modelo se utiliza en el proceso de diseño de los neumáticos, donde interesa saber en detalle el comportamiento de cada parte del neumático.

Algunos ejemplos son el LS-DYNA de Ansys o el de Abaqus, desarrollado por Dassault Systems.

2.3. Comportamiento de los neumáticos

Para obtener el modelo del neumático, se deberán realizar numerosos ensayos para poder apreciar las fuerzas ejercidas por el neumático en tantos casos diferentes como sea posible. Las fuerzas y momentos del neumático sobre el suelo son:

- Fuerza longitudinal (F_x). Es la asociada a la tracción o la frenada. Se genera cuando existe un deslizamiento entre el neumático y el suelo en la dirección de avance.
- Fuerza lateral (F_y). Aparece cuando el vehículo gira, por lo que los neumáticos cuentan con un cierto ángulo entre su plano longitudinal y el movimiento del vehículo llamado ángulo de deriva, α . Esta fuerza es la responsable de que el vehículo pueda cambiar de dirección.
- Fuerza vertical (F_z). Representa la carga vertical que soporta el neumático. No interviene de forma directa en el movimiento del neumático, pero influye en la capacidad del neumático para generar fuerzas longitudinales y laterales.
- Momento de vuelco (M_x). Este momento trata de tumbar o levantar al neumático respecto al suelo, por lo que tienen gran influencia en neumáticos de motocicleta.
- Momento de resistencia a la rodadura (M_y). Tal y como indica su nombre, se trata de una resistencia al movimiento que ejerce el neumático debido a su deformación al rodar sobre el suelo.
- Momento de alineación (M_z). Actúa alrededor del eje vertical del neumático y tiende a alinear al neumático con su dirección de avance.

La dirección de cada una de las fuerzas y momentos se puede apreciar en la Figura 11.

Hay tres casos de utilización de los neumáticos: deslizamiento longitudinal puro, lateral puro y combinado, y realizaremos ensayos en cada uno de estos casos.

2.3.1. Longitudinal Puro

Este tipo de ensayo tiene como objetivo caracterizar el neumático en condiciones de aceleración y frenada sin desviaciones laterales, es decir, con ángulo de deriva nulo, aunque se podrán realizar otros ensayos con diferentes cargas verticales o ángulos de caída, siendo estos últimos especialmente relevantes en los neumáticos de motocicleta debido a los altos ángulos de inclinación que pueden alcanzar estos vehículos durante la conducción.

En el ensayo se produce un deslizamiento relativo entre el neumático y la superficie de rodadura, que se consigue frenando el neumático mientras se mantiene una velocidad constante en la banda del banco de ensayos. A medida que se incrementa la fuerza de frenado, el índice de deslizamiento longitudinal κ también aumenta. Cuando el neumático llega a su fuerza máxima de adherencia, el neumático comenzará a saturar y con pequeños incrementos en la fuerza de frenado provocan un rápido aumento del deslizamiento, como se puede observar en la Figura 7, por lo que deberemos tener una alta tasa de muestreo.

Este índice de deslizamiento longitudinal, κ , es la relación entre la velocidad de desplazamiento lineal del neumático y su velocidad de giro. Se puede calcular siguiendo la siguiente ecuación:

$$\kappa = \frac{V_x - \omega * R_e}{V_x} \quad (2)$$

Gracias a la simetría diagonal que presentan los neumáticos en la frenada y aceleración, con tan solo hacer el ensayo de frenada podemos obtener también las fuerzas en aceleración, siendo estas de igual magnitud, pero sentido inverso.

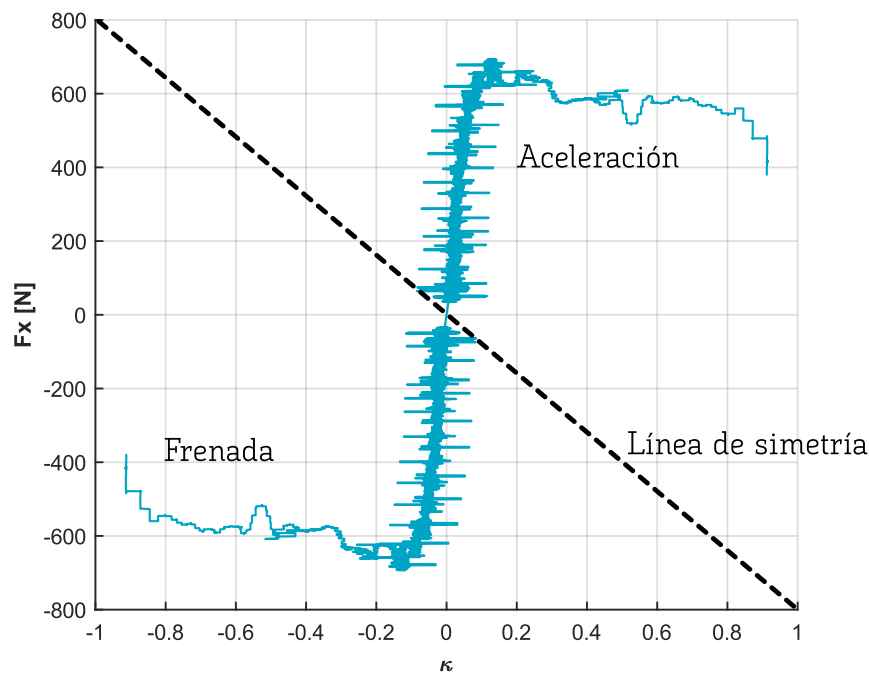


Figura 7.- Datos sin filtrar obtenidos de un ensayo de frenada y la simetría para fuerzas de aceleración

2.3.2. Lateral Puro

El ensayo de deslizamiento lateral puro, de forma contraria al longitudinal puro, se emplea para describir el comportamiento del neumático frente a cargas laterales, sin

que se produzcan esfuerzos longitudinales, es decir, el índice de deslizamiento longitudinal κ es nulo, aunque al igual que en el ensayo descrito previamente, se pueden realizar más ensayos variando las cargas verticales o ángulos de caída. En este tipo de ensayos también se aprecia el momento de alineación (M_z) que ejerce el neumático dependiendo del ángulo de deriva impuesto.

El ensayo consiste en la realización de un barrido de ángulos de deriva, α . Para ello, mientras la banda se mueve a velocidad constante, hacemos girar al neumático hasta alcanzar un límite de α , y cuando llega a este, vuelve a hacer el recorrido hasta alcanzar el otro límite. Los ensayos laterales puros no presentan simetría si son girados en un sentido u otro (Figura 8), debido principalmente a la fuerza lateral inducida por grandes ángulos de caída, como es el caso de los neumáticos de motocicletas y a los fenómenos de conicidad y *ply-steer*, dados por la construcción no simétrica del neumático que resulta en la deformación de la huella de contacto. Por ello, es imprescindible realizar el giro en ambos sentidos.

A diferencia del ensayo longitudinal, en estas pruebas se puede controlar de mejor forma la saturación del neumático, dado a que esta saturación es más progresiva, por lo que la curva suele ser más suave que la de los ensayos longitudinales puros.

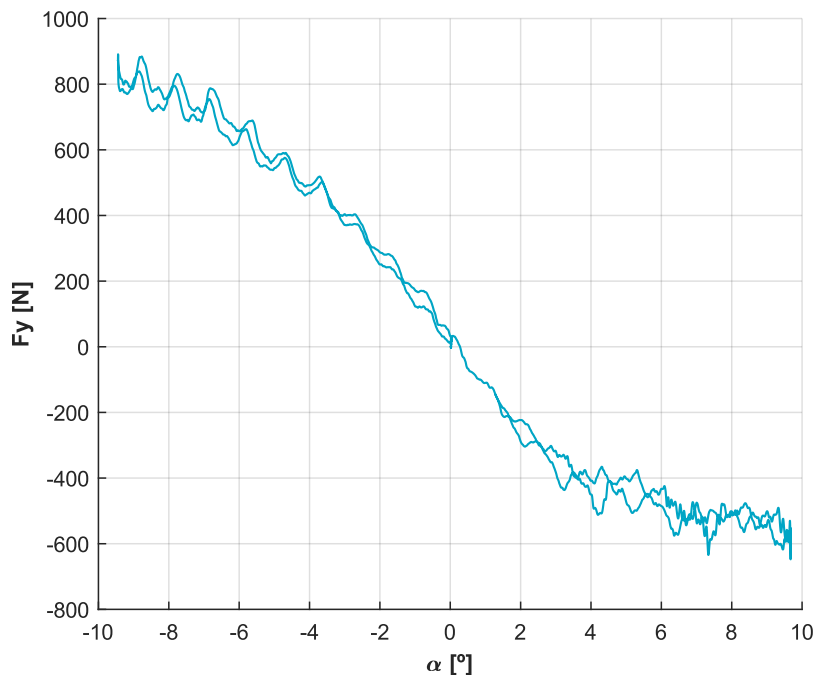


Figura 8.- Datos sin filtrar obtenidos de un ensayo de F_y puro con $\gamma=15^\circ$

2.3.3. Combinado

Una vez conocido el desempeño del neumático ante deslizamientos puros, se requiere conocer su respuesta con esfuerzos laterales y longitudinales actuando al mismo tiempo. Estas condiciones se acercan más a la realidad y algunos casos en los que se dan fuerzas combinadas pueden ser en maniobras evasivas o en salida de curvas, donde se acelera con un leve ángulo de giro.

Estos ensayos se realizarán con el mismo método que los longitudinales puros, a diferencia de que se establecerá un determinado ángulo de giro al neumático, además del ángulo de caída y carga vertical. Al tener 3 variables a la que se le pueden dar valores diferentes, se incrementan los números de ensayos que se pueden realizar.

Relacionando las fuerzas longitudinales y laterales que se producen en estos ensayos, podemos obtener las elipses de fricción del neumático, que muestra los límites de la adherencia del neumático en cada caso combinado. Los coeficientes de fricción se calculan de acuerdo con las siguientes ecuaciones:

$$\mu_x = \frac{F_x}{F_z} \quad (3)$$

$$\mu_y = \frac{F_y}{F_z} \quad (4)$$

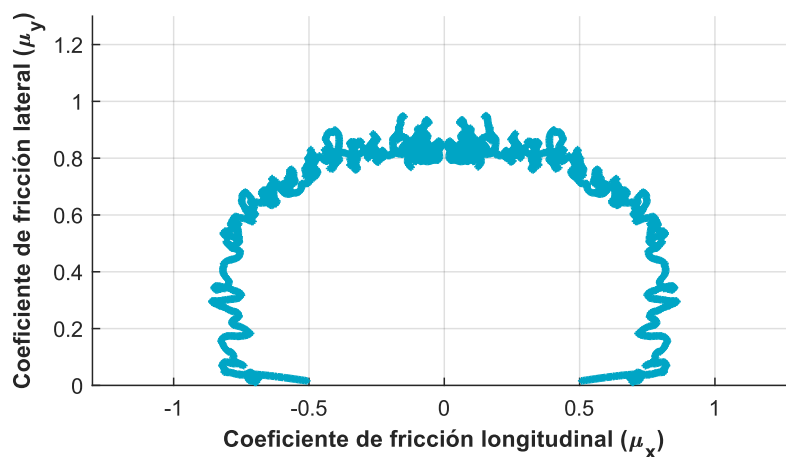
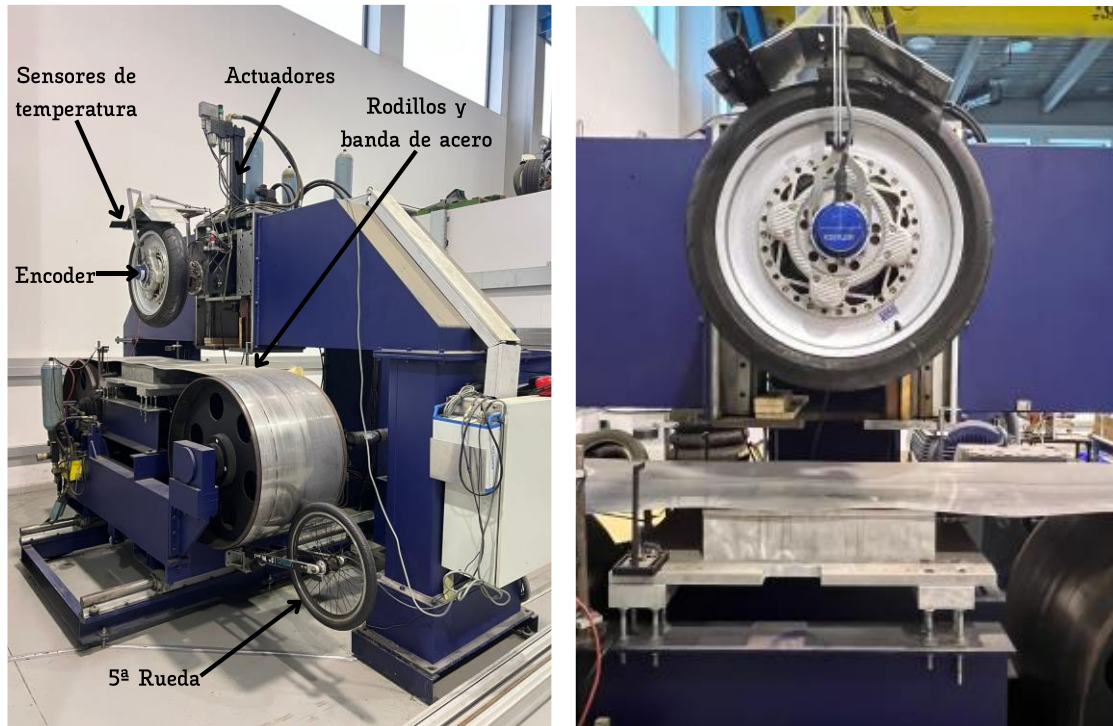


Figura 9.- Elipse de fricción obtenida con ensayos experimentales sin filtrar con $\alpha=10^\circ$ y $\gamma=0^\circ$

3. Banco de ensayos de neumáticos

El Área de Ingeniería Mecánica de la Universidad de Málaga cuenta con un banco de ensayos de neumáticos, en el que se pueden obtener los datos necesarios para la realización del modelo.



(a) Partes del banco de ensayo de neumáticos

(b) Llanta dinamométrica

Figura 10.- Banco de ensayo de neumáticos

Como se puede apreciar en la Figura 10, el banco cuenta con estos elementos:

- **Banda de acero**, cumpliendo con lo que indican las normas de ensayos de neumáticos, como la SAE J1987 o la ISO 18164:2005.
- **Rodillos**, que hacen girar a la banda de acero. En este caso se cuenta con 2 rodillos, lo que hace que la superficie de apoyo del neumático sea plana, haciendo que los ensayos sean más realistas que con 1 solo rodillo, ya que el neumático apoyaría en la superficie curva de este.
- **Actuadores**, para ejercer la carga vertical y poner en la posición deseada al neumático, pudiendo establecer tanto ángulo de deriva, como ángulo de caída.
- **Llanta dinamométrica**, para medir las fuerzas y momentos.

- **Encoder**, para medir la velocidad de la rueda del ensayo. Al compararla con la velocidad de la banda de acero, se puede determinar el deslizamiento longitudinal del neumático a ensayar.
- **Sensores de temperatura**, para poder medir la temperatura del neumático en el ensayo.
- **Quinta rueda**, con la que se mide la velocidad de la banda de acero.

Para cada ensayo en el banco de neumáticos, se les indica a los rodillos una velocidad de giro determinada, controlada por la quinta rueda, que hace que la banda de acero se mueva a una velocidad lineal constante. Tras ello, se realizan los ensayos correspondientes con los procedimientos indicados en 2.3 Comportamiento de los neumáticos.

3.1. Formato de archivos de transferencia de datos: TDMS, TYDEX y TIR

Todo el software del banco de ensayos está realizado con el programa LabView. Este software, desarrollado por *National Instruments*, tiene un formato predeterminado de exportación de archivos llamado TDMS (*Technical Data Management Streaming*), por lo que es necesario que la obtención de los datos sin filtrar se realice con este mismo formato de archivo.

Al igual que existen normas para la realización de los ensayos, de forma que todos se realicen con unas mismas características para que los datos de los distintos neumáticos puedan compararse, también existe un formato de archivo específico para compartir los datos obtenidos de un neumático siguiendo un estándar.

Se trata del formato *TYDEX* (*Tyre Data Exchange Format*) [7], cuya extensión de archivo es .TDX. Por cada ensayo que hagamos podremos obtener un *TYDEX*, por lo que necesitaremos varios de ellos para poder hacer el modelo, que se guarda en el formato de archivo TIR.

Este tipo de archivo, representado en Anexo III. Ejemplo de *TYDEX*, da los siguientes datos acerca del neumático:

- Medidas del neumático
- Material y condición de la superficie de apoyo del neumático, normalmente acero y seco
- Presión de inflado en el ensayo

3. Banco de ensayos de neumáticos

- Velocidad de la superficie de apoyo del neumático, en nuestro caso de la banda de acero
- Carga vertical nominal del neumático
- Fuerzas, momentos, deslizamiento longitudinal y lateral y ángulo de inclinación del neumático
- Sistema de referencia de los datos del ensayo.

Para los TYDEX se definen 3 sistemas de coordenadas que pueden ser usados:

C-Axis System

El sistema de coordenadas *C-Axis* (*Centre Axis System*), usado por los modelos STI (*Standard Tire Interface*), tiene su origen en el centro del neumático, y con el eje Y perpendicular al plano de la rueda.

Este sistema de coordenadas es el que emplean los datos que obtenemos directamente del banco de ensayos de neumáticos, ya que se corresponde con la disposición de la llanta dinamométrica, encargada de realizar todas las mediciones.

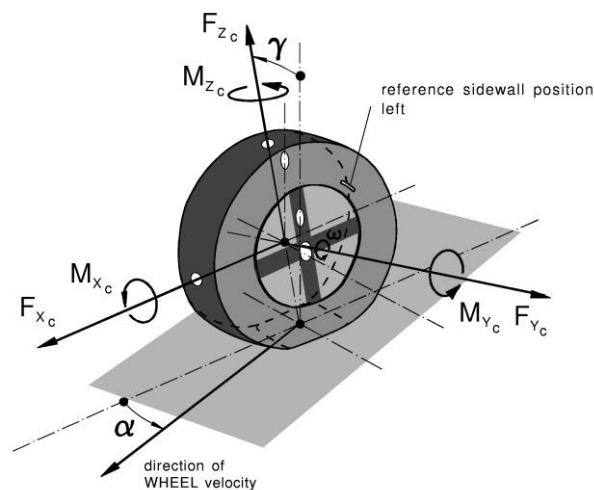


Figura 11.- Sistema de coordenadas C-Axis. Fuente: [2]

H-Axis System

El sistema de coordenadas *H-Axis* (*Horizontal Axis System*) tiene su origen en el centro de la rueda, al igual que el *C-Axis*, pero con la diferencia de que el plano X-Y se mantiene paralelo al suelo a pesar del ángulo de caída que tenga el neumático.

El momento en el eje Y no tiene sentido que sea medido, debido a que no es el eje de rotación de la rueda. Es el sistema de coordenadas menos utilizado.

W-Axis System

El sistema de coordenadas *W-Axis* (*Wheel Axis System*) es usado por los modelos CPI (*Contact Point Interface*) y tiene su origen en el punto de contacto del neumático con el suelo y el eje Z es perpendicular al plano del suelo.

Este sistema de coordenadas es muy usado ya que representa las fuerzas y momentos donde se generan, en el contacto del neumático con el suelo, por lo que es el más realista para realizar esta representación.

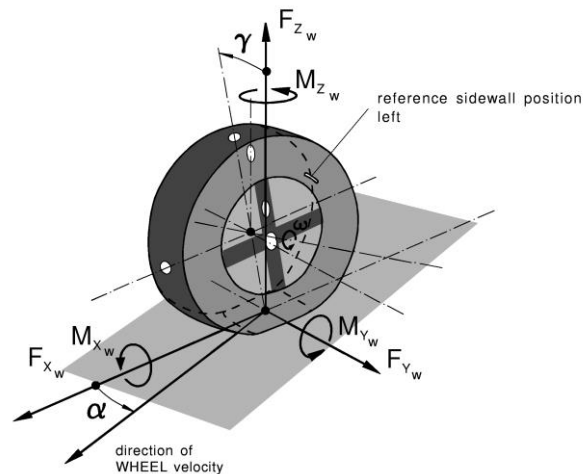


Figura 12.- Sistema de coordenadas W-Axis. Fuente: [2]

De una forma similar al *TYDEX*, también existe un formato de archivo estandarizado para la distribución de modelos de neumáticos. Se trata del TIR que, además de todos los parámetros del modelo de neumático realizado, contiene más información necesaria para su uso:

- Tipo del modelo (Versión de la *Magic Formula*, versión del archivo *TIR*, formato del archivo)
- Dimensiones del neumático
- Inercia, masa y rigideces del neumático
- Rangos de valores entre los que es válida la utilización del modelo

Para realizar los modelos de neumáticos se han desarrollado 2 aplicaciones por separado. Una de ellas se encarga de transformar los archivos TDMS en *TYDEX*, para permitir transferir los datos de los ensayos si es necesario, y debido a que en la aplicación para obtener el TIR se deben introducir archivos *TYDEX*.

3. Banco de ensayos de neumáticos

La segunda aplicación transformará estos *TYDEX* en *TIR*, por lo que será posible realizar modelos de neumáticos con los ensayos realizados tanto en el banco de neumáticos disponible en la Universidad de Málaga, como con otros bancos de neumáticos, siempre que los archivos se distribuyan en formato estándar.

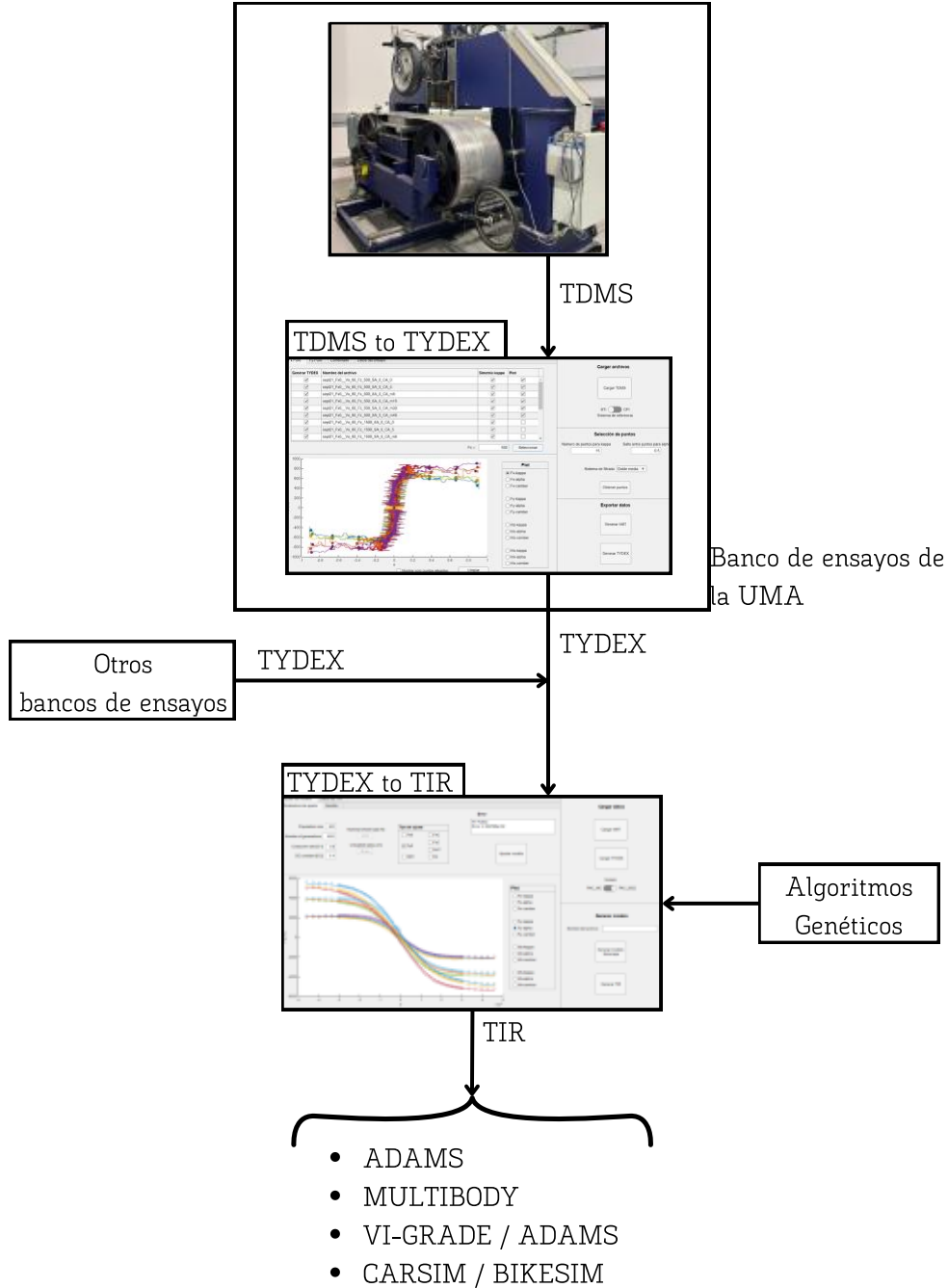


Figura 13.- Esquema general de transformación de archivos hasta la obtención del modelo

4. Desarrollo de app: “*TDMS to TYDEX*”

Como hemos visto previamente, los datos que obtendremos del software de control del banco tras realizar los ensayos los tendremos que convertir al formato *TYDEX* para seguir el estándar.

Debido al elevado número de puntos registrados en cada curva, como resultado de una tasa de muestreo elevada, es necesario llevar a cabo una selección de los datos, ya que, además de ser computacionalmente muy costoso realizar un ajuste a tal cantidad de datos, también resulta innecesario para obtener una caracterización precisa del neumático.

Sabiendo esto, se pueden definir unos objetivos que debe cumplir la aplicación:

- Ser capaz de leer y almacenar los datos contenidos en los archivos TDMS de los distintos ensayos de una manera eficiente para evitar largos tiempos de espera. Como los datos de los TDMS se encuentran completamente en ‘crudo’, se deberán realizar las operaciones necesarias para que los datos se encuentren en las unidades correspondientes.
- Cambiar de sistemas de coordenadas. Como los más comunes son C-Axis y W-Axis, bastará con tener tan solo estos dos.
- Poder elegir si se quiere o no realizar la simetría en las pruebas de frenada para representar también las fuerzas en tracción, para los ensayos longitudinales y combinados.
- Poder filtrar los datos y seleccionar una cantidad de puntos requerida por el usuario. Además, se debe implementar un selector del método de filtrado para garantizar mayor flexibilidad, permitiendo también introducir futuras mejoras a la aplicación en esta área.
- Mostrar las curvas definidas por los datos medidos y los filtrados. Con el fin de poder detectar fallos en la medición, los ensayos se agruparán según su carga nominal, ángulo de deriva y ángulo de caída, haciendo que se puedan mostrar los datos por pantalla según el grupo seleccionado.
- Poder introducir los datos adicionales que requieren los *TYDEX*, tanto el *Header*, como las Constantes y los Parámetros de Modelo.
- Exportar los ensayos introducidos en formato *TYDEX*, para poder compartir los datos en caso de ser necesario. Además, se dispondrá de la opción de exportar los datos en formato .mat, pues es más fácil y eficiente trabajar con ellos si tan

solo se utiliza el software MATLAB, como es el caso de las dos aplicaciones que se desarrollarán.

- La aplicación debe ser intuitiva y fácil de usar, evitando que ocurran errores cuando el usuario se encuentre utilizándola y empleando diferentes métodos para solventar los errores que se puedan dar, con el fin de que nunca se paralice la aplicación por la aparición de un error.

Una vez vistos los requisitos, se define el procedimiento que deberá seguir el usuario para poder utilizar la app de manera correcta:

1. Cargar los archivos TDMS en la app y seleccionar el sistema de coordenadas requerido para mostrar y exportar los datos
2. Visualizar los ensayos y comprobación de la grabación correcta de ellos
3. Seleccionar la cantidad de puntos requeridos para poder realizar el ajuste de ellos. En el caso de los ensayos laterales puros deberemos seleccionar la distancia en el eje x entre puntos
4. Revisar que la selección realizada automáticamente es correcta
5. Rellenar los datos adicionales que se deben introducir en los archivos *TYDEX*.
6. Exportación de los datos en el formato deseado. Si posteriormente se utilizará la aplicación *TYDEX to TIR* o MATLAB, se recomienda la exportación de los datos en formato MAT

El desarrollo completo del software se ha realizado en MATLAB, que con su módulo *App Designer*, donde se pueden hacer tanto el *frontend* como el *backend* de la aplicación de una forma sencilla.

Posicionamiento de componentes

Para incluir elementos en la interfaz de usuario se deberá arrastrar el elemento desde la Librería de Componentes y posicionarlo donde se requiera. Para posicionarlo, *App Designer* cuenta con varias herramientas que podemos encontrar en la pestaña *Canvas*, que nos pueden servir de ayuda para alinear, agrupar o equiespaciación componentes.

Callbacks de los elementos

Cada elemento añadido tiene al menos una *callback*. Una *callback* es una función que está asociada a un componente de la aplicación. Para que el componente añadido realice la función que deseamos, tendremos que definir una *callback* y escribir el código que deseamos ejecutar en la pestaña *Code View*. Aunque recientemente, MATLAB ha estado implementando numerosas mejoras en *App Designer*, no es recomendable escribir *scripts* demasiado grandes en este módulo de MATLAB, pues a veces se

pueden experimentar errores, como que no podamos ver ni modificar la *callback* de un elemento. Para introducir una gran cantidad de líneas de código es más recomendable realizar las funciones en un archivo .m por separado y luego implementar estas funciones en el código de la app. Para ello, lo único que se deberá hacer es incluir en la función el argumento 'app', para acceder a las variables y sus propiedades en el espacio de trabajo de la aplicación. Ejemplo:

Tenemos un archivo de una función de MATLAB:

Archivo importTDMS.m

```
function importTDMS(app)
%% Función para importar los TDMS del banco de neumáticos a la App
TDMSfolder = uigetdir(pwd, 'Seleccione la carpeta de TDMS');

if TDMSfolder ~= 0
    % Añade carpeta al path y se cambia el directorio para poder leer los
    TDMS
    addpath(TDMSfolder);
    cd(TDMSfolder)
    ...
    ...
    ...
    uialert(app.UIFigure, 'Carpeta no añadida', 'No has añadido ninguna
    carpeta. ');
end
end
```

Y en la aplicación contamos con el siguiente código:

App Designer

```
% Button pushed function: CargarTDMSButton
function CargarTDMSButtonPushed(app, event)
    importTDMS(app);
end
```

Otras opciones de *App Designer*

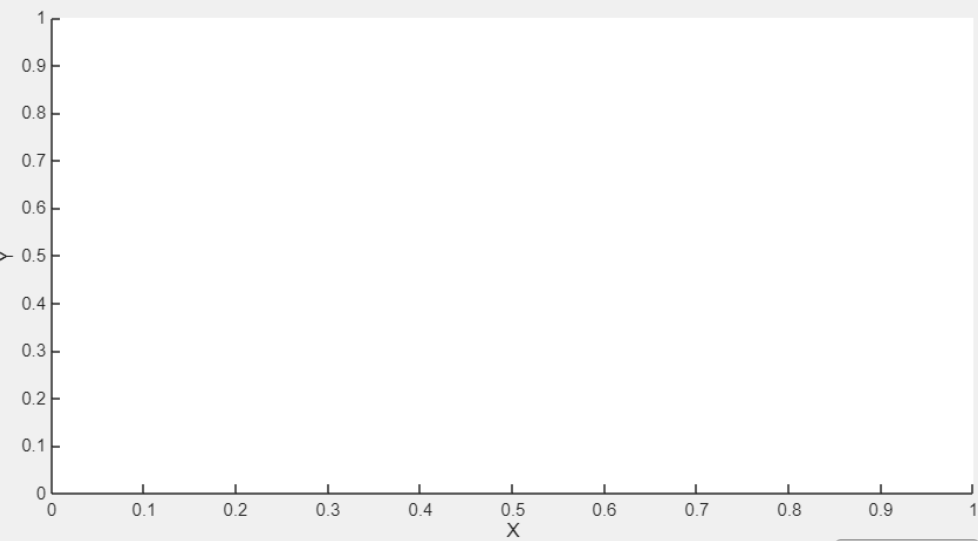
App Designer también da otras opciones de personalización a parte de todas las propiedades modificables de los elementos en el *Component Browser* de la parte derecha. Estas otras opciones son más generales de la aplicación como, por ejemplo, cambiar el nombre o logo a la app, haciendo que aparezcan en la zona del superior en la ventana abierta, o ejecutar una determinada *callback* con el inicio de la aplicación, que en este caso se ha empleado para añadir la ruta de las funciones para las *callbacks* a las rutas en las que busca MATLAB las funciones que aparecen en un código.

4. Desarrollo de app: "TDMS to TYDEX"

Fx Puro | Fy Puro | Combinado | Datos del ensayo

Generar TYDEX	Nombre del archivo	Simetría kappa	Plot

Fz =



Plot

- Fx-kappa
- Fx-alpha
- Fx-camber

- Fy-kappa
- Fy-alpha
- Fy-camber

- Mz-kappa
- Mz-alpha
- Mz-camber

- Mx-kappa
- Mx-alpha
- Mx-camber

Mostrar solo puntos elegidos

Cargar archivos

STI CPI
Sistema de referencia

Selección de puntos

Número de puntos para kappa Salto entre puntos para alpha

Sistema de filtrado

Exportar datos

Figura 14.- Aplicación TDMS to TDX

4.1. Importación de archivos

El primer paso tras iniciar la aplicación consiste en cargar los datos obtenidos del banco de ensayos. Estos archivos estarán agrupados en una misma carpeta y se importarán de manera automática y conjunta. Dado que los datos están en crudo, es necesario que aplicarle el offset y ganancia correspondiente de cada sensor. Este proceso permite convertir las señales leídas a sus unidades físicas reales, indispensable para poder trabajar con los datos de forma coherente.

Las ganancias y *offsets* asociados a cada señal se han agrupado en un único archivo .mat, lo que permite simplificar el proceso de conversión de datos y facilita que puedan ser modificados fácilmente en el caso de que se cambien los sensores utilizados. Para automatizar esta tarea se ha desarrollado un código en MATLAB (Anexo IV. Códigos de MATLAB), que se encarga de las siguientes funciones:

- Leer el archivo TDMS, para lo que se emplea la función predefinida por MATLAB: *tdmsread()*
- Dividir la lista de datos para identificar cada señal y asociarla al instante de tiempo correspondiente
- Aplicar a cada canal su ganancia y offset específicos, definidos en el archivo .mat que contiene todas las constantes de los sensores del banco de ensayos.
- Reducir el ruido de alta frecuencia y suavizar las señales, aplicando para ello un filtro de Savitzky-Golay
- Dar como resultado una variable de formato tabla con los datos requeridos, debido así su posterior manejo y eficiencia computacional, ya que es el tipo de variable más eficiente para almacenar grandes cantidades de datos de un mismo tipo en columnas

En cuanto al cambio del sistema de coordenadas, para cambiar de C-Axis a W-Axis deberemos realizar una rotación respecto al eje X con el ángulo de caída que tenga el neumático y un desplazamiento en el sentido negativo del eje Z para lograr que el sistema de referencia pase a estar en el punto de contacto con el suelo.

Para realizar la rotación, se multiplicarán las fuerzas en los 3 ejes y luego los momentos por la matriz de rotación:

$$R_x = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\gamma) & -\sin(\gamma) \\ 0 & \sin(\gamma) & \cos(\gamma) \end{pmatrix} \quad (5)$$

4.2. Organización y visualización de archivos

Una vez importados los datos, estos se organizan según el nombre de identificación que estos tengan. Estos nombres tienen el siguiente formato:

fecha_tipo-de-ensayo__Vx_velocidad-de-la-banda_Fz_carga-vertical_SA_α_CA γ

Ej: sept21_Fx0__Vx_60_Fz_500_SA_0_CA_m15

Según el tipo de ensayo se dividen los archivos en 3 pestañas diferentes como se puede observar en la parte superior izquierda de la Figura 14, de forma que se puedan visualizar cada tipo de ensayo rápidamente en una tabla. Cada apartado de esta tabla tiene 3 *CheckBox*, para poder elegir si deseamos mostrar los datos en la gráfica de la aplicación, si queremos exportar el TDX de ese ensayo o si deseamos hacer la simetría en los ensayos longitudinales, estando estos dos últimos seleccionados de forma predeterminada.

Generar TYDEX	Nombre del archivo	Simetría kappa	Plot
<input checked="" type="checkbox"/>	sept21_Combi__Vx_60_Fz_1500_SA_m2_CA_m15	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
<input checked="" type="checkbox"/>	sept21_Combi__Vx_60_Fz_1500_SA_m2_CA_m30	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
<input checked="" type="checkbox"/>	sept21_Combi__Vx_60_Fz_1500_SA_m5_CA_0	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
<input checked="" type="checkbox"/>	sept21_Combi__Vx_60_Fz_1500_SA_m5_CA_5	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
<input checked="" type="checkbox"/>	sept21_Combi__Vx_60_Fz_1500_SA_m5_CA_m5	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
<input checked="" type="checkbox"/>	sept21_Combi__Vx_60_Fz_1500_SA_m5_CA_m15	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
<input checked="" type="checkbox"/>	sept21_Combi__Vx_60_Fz_1500_SA_m5_CA_m30	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
<input checked="" type="checkbox"/>	sept21_Combi__Vx_60_Fz_1500_SA_10_CA_0	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
<input checked="" type="checkbox"/>	sept21_Combi__Vx_60_Fz_1500_SA_10_CA_5	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
<input checked="" type="checkbox"/>	sept21_Combi__Vx_60_Fz_1500_SA_10_CA_m5	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Figura 15.- Organización de ensayos combinados

Para facilitar la selección de varios ensayos de forma simultánea para compararlos y detectar si algún ensayo no se encuentra bien grabado, hay un selector de F_z con el que se podrán filtrar rápidamente los ensayos. En el caso de los ensayos combinados se podrá filtrar también seleccionando los ensayos con un mismo ángulo de deriva o de caída.

4.3. Discretización de los ensayos

Los archivos TDMS generados por los ensayos realizados contienen una gran cantidad de datos que, dependiendo de su duración, estos pueden llegar a superar los 200.000 datos. Intentar ajustar los parámetros del modelo *Magic Formula* directamente sobre

este volumen de datos no es viable, tanto por el tiempo de computación requerido como por la dificultad que supone ajustar datos con ruido.

Por este motivo, es necesario seleccionar tan solo algunos puntos, que permita reducir el número de datos sin comprometer la calidad del modelo que obtengamos. No obstante, esta selección debe hacerse con especial cuidado ya que una mala elección de los puntos puede dar lugar a ajustes erróneos o en la no convergencia del modelo.

Se ha decidido proceder de manera diferente para los datos de los ensayos laterales puros y para los longitudinales puros y combinados.

Laterales puros

Dada la forma característica que presentan este tipo de curvas, se ha optado por un método de selección de puntos basado en la división del conjunto de datos en tramos equiespaciados, sobre los que se calcula la media de los valores contenidos en cada tramo.

Esta selección se realizará de manera automática y el usuario tan solo deberá introducir el salto entre puntos que desea obtener. De esta forma conseguimos elegir los puntos de forma precisa, tal y como se muestra en la Figura 16, donde el salto introducido es de 1° de ángulo de deriva.

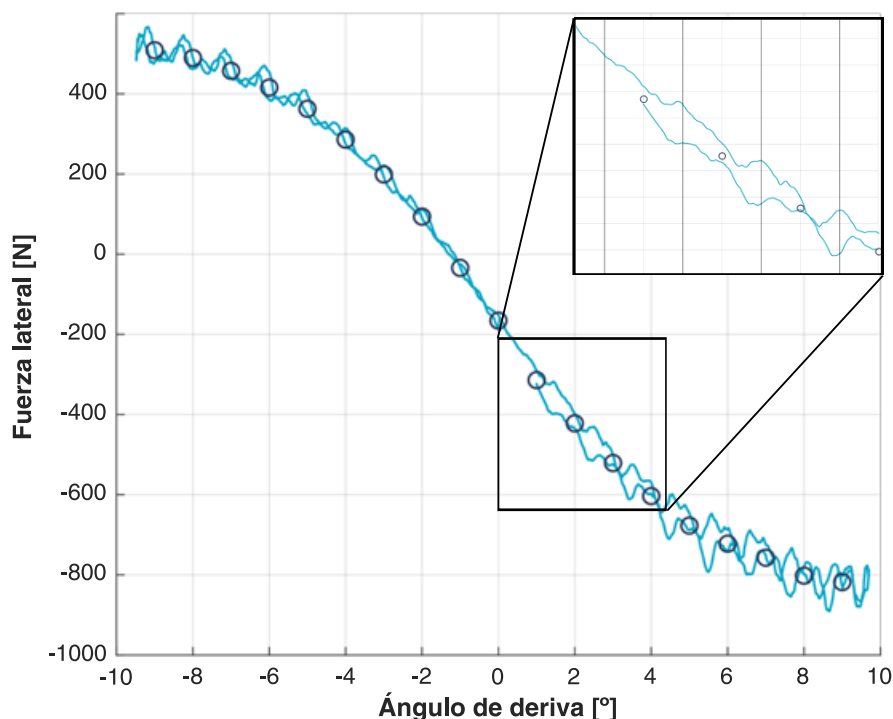


Figura 16.- Elección de puntos del ensayo lateral puro con detalle de la división por tramos

Longitudinales puros y combinados

Para estos ensayos se ha optado por la elección de otros métodos, debido a la forma que presentan las curvas y la importancia de cada una de sus regiones.

A diferencia de los ensayos laterales puros, los longitudinales presentan menos recorrido en el eje X en la zona lineal, alcanzando la saturación con mayor rapidez. Esta región es especialmente relevante de modelar, pues es en ella donde el neumático opera la mayor parte del tiempo en condiciones reales de aceleración o frenado.

Una vez superado el pico de fuerza, el neumático entrará en régimen de bloqueo o patinaje, alcanzando rápidamente el índice de deslizamiento de -1 o 1, respectivamente., por lo que resulta más interesante modelar de forma más precisa la zona lineal y transitoria de la curva.

Para ello, se le solicita al usuario el número de puntos que contendrá la curva. Este número de puntos se dividirá en 2, para que la parte de frenada y de aceleración tengan el mismo número de ellos. Luego, el número de puntos de cada parte se dividirá en 2, haciendo que la mitad de esos puntos estén contenidos en valores de κ de 0 a 0.1 y la otra mitad en el resto de la curva, consiguiendo con esto introducir una mayor cantidad de puntos en la zona lineal del ensayo (Figura 17).

El método de selección de puntos es similar al anterior, ya que se crearán regiones y se realizará una media a los valores dentro de estas, aunque a diferencia de los ensayos laterales, es estos se realizará la media al índice de deslizamiento longitudinal, κ para lograr una mayor precisión en la selección de los datos.

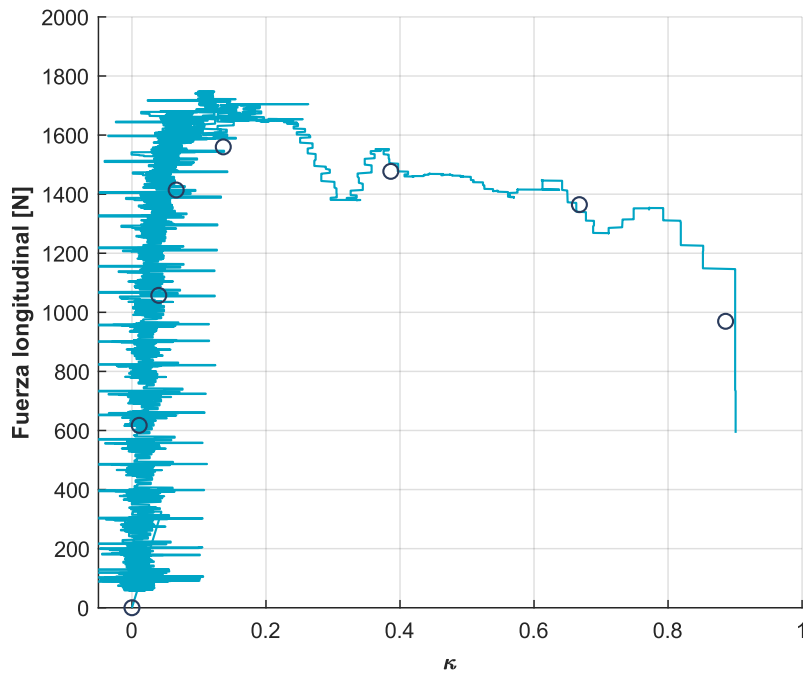


Figura 17.- Selección de puntos de un ensayo longitudinal puro con el método descrito

Además de la necesidad de conservar una mayor densidad de puntos en determinadas zonas clave de la curva, es importante tener en cuenta la posible presencia de errores en los datos medidos debido al ruido de la señal y el pequeño rango de deslizamiento presentado en la región lineal, corremos el riesgo de establecer un punto con índice de deslizamiento negativo ($\kappa < 1$) y fuerza longitudinal positiva ($F_x > 0$), lo cual es incompatible con el comportamiento real del neumático.

Por ello, una parte de la función de MATLAB encargada de la elección de puntos, se encarga de comprobar si hay algún valor fuera del rango posible y de corregirlo en caso de ser necesario. Si esto no se hiciera podría resultar en errores o dificultad del ajuste del modelo

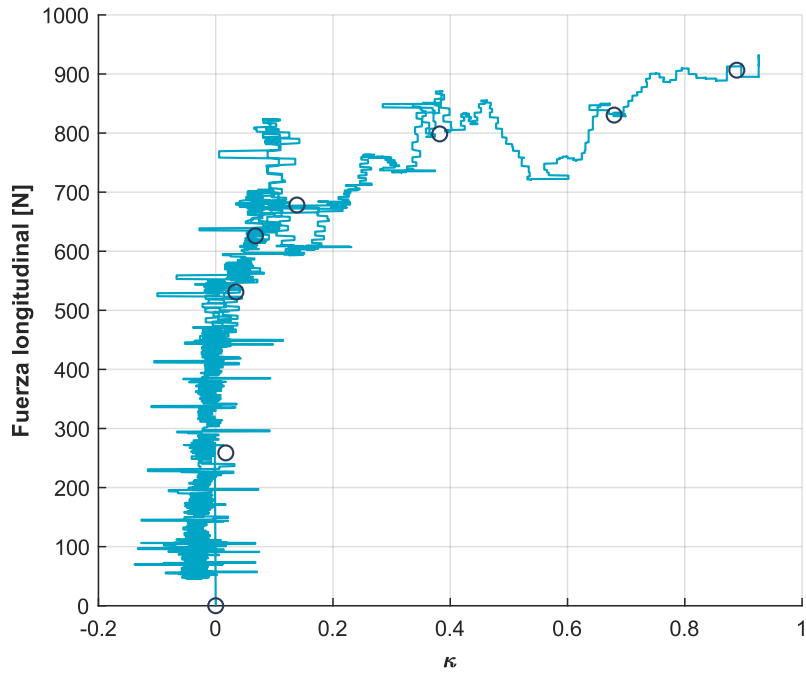


Figura 18.- Corrección de medición en ensayo longitudinal

Por último, es importante destacar que uno de los puntos que deben tener todos los ensayos longitudinales es el de deslizamiento longitudinal nulo ($\kappa=0$) y fuerza longitudinal nula ($F_x=0$), pues por definición todos los ensayos longitudinales de neumáticos pasan por dicho punto.

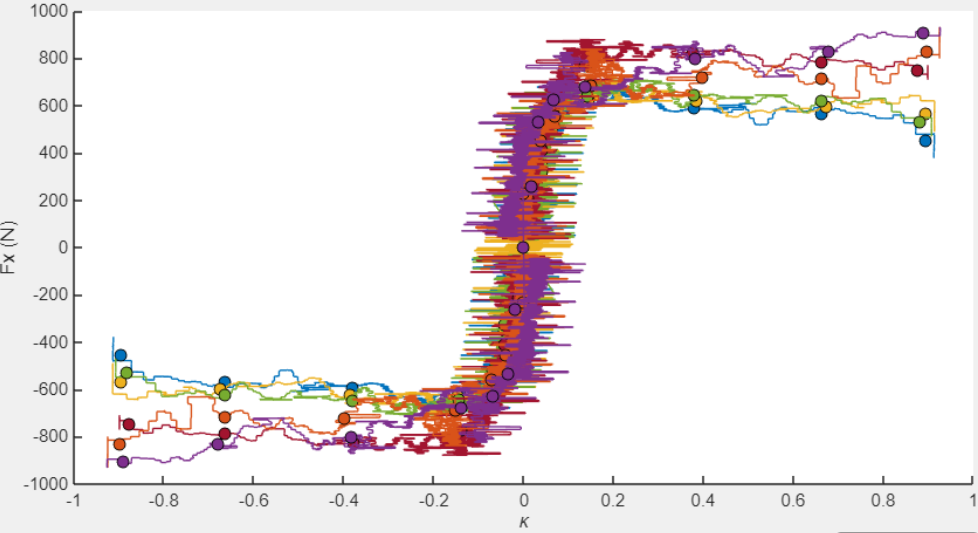
Así es como se ve la selección de puntos en la aplicación, en este caso con todos los ensayos realizados seleccionados y con una carga vertical de 500N:

4. Desarrollo de app: "TDMS TO TYDEX"

Fx Puro
Fy Puro
Combinado
Datos del ensayo

Generar TYDEX	Nombre del archivo	Simetría kappa	Plot
<input checked="" type="checkbox"/>	sept21_Fx0__Vx_60_Fz_500_SA_0_CA_0	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
<input checked="" type="checkbox"/>	sept21_Fx0__Vx_60_Fz_500_SA_0_CA_5	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
<input checked="" type="checkbox"/>	sept21_Fx0__Vx_60_Fz_500_SA_0_CA_m5	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
<input checked="" type="checkbox"/>	sept21_Fx0__Vx_60_Fz_500_SA_0_CA_m15	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
<input checked="" type="checkbox"/>	sept21_Fx0__Vx_60_Fz_500_SA_0_CA_m30	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
<input checked="" type="checkbox"/>	sept21_Fx0__Vx_60_Fz_500_SA_0_CA_m45	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
<input checked="" type="checkbox"/>	sept21_Fx0__Vx_60_Fz_1500_SA_0_CA_0	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
<input checked="" type="checkbox"/>	sept21_Fx0__Vx_60_Fz_1500_SA_0_CA_5	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
<input checked="" type="checkbox"/>	sept21_Fx0__Vx_60_Fz_1500_SA_0_CA_m5	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Fz =



Plot

- Fx-kappa
- Fx-alpha
- Fx-camber
-
- Fy-kappa
- Fy-alpha
- Fy-camber
-
- Mz-kappa
- Mz-alpha
- Mz-camber
-
- Mx-kappa
- Mx-alpha
- Mx-camber

Mostrar solo puntos elegidos

Cargar archivos

Cargar TDMS

STI CPI

Sistema de referencia

Selección de puntos

Número de puntos para kappa Salto entre puntos para alpha

Sistema de filtrado Doble media ▼

Exportar datos

Figura 19.- Aplicación TDMS to TYDEX en funcionamiento

4.4. Exportación de archivos

Una vez seleccionados los puntos con los que realizaremos el ajuste posteriormente, se exportan los datos en un archivo de formato *TYDEX* (Anexo III. Ejemplo de *TYDEX*). Para ello es necesario cumplimentar los cuadros de texto que se encuentran en la pestaña 'Datos del ensayo'. Estas *TextBox* tienen que ser rellenadas con información relevante acerca del neumático como sus dimensiones y peso además de aportar datos relativos a la realización del ensayo, como velocidad de la banda o material y condiciones (seco, mojado...) de esta.

Fx Puro	Fy Puro	Combinado	Datos del ensayo	+
Manufacturer		Bridgestone		
Nominal width of tire (mm)		120		
Nominal aspect ratio (%)		70		
Nominal rim diameter (inch)		17		
Rim width (inch)		3.5		
Tyre mass (kg)		9.3		
Unloaded radius (m)		0.29		
Identity		120/70 ZR17 M/C		
Date		27-APR-2025		
Ej: 120/70 ZR17 M/C		Clock time		13:57
Inflation pressure (bar)		2.53		
Surface of track		steel		
Condition of track surface		dry		
Trajectory velocity (m/s)		16		
Nombre de la carpeta para guardar los TYDEX				TYDEX

Figura 20.- Apartado 'Datos del ensayo' de la aplicación *TDMS to TDX*

Por último, tras introducir el nombre de la carpeta en la que se exportarán todos los TDX, se puede pulsar 'Exportar TDX', en la parte inferior derecha de la pantalla para generar dicha carpeta.

En el caso de que se quieran generar los archivos MAT también, bastará con rellenar los cuadros de texto mencionados y pulsar 'Exportar MAT' al igual que con los *TYDEX*, aunque en este caso los datos relacionados con el neumático ensayado y con las condiciones del ensayo, se exportará en otro MAT por separado.

5. Métodos de ajuste: Algoritmos genéticos

Una vez seleccionados los puntos representativos del ensayo, se tienen que determinar los parámetros del modelo que permiten reproducir con precisión las curvas características del neumático. Para ello, podríamos ir ajustándolos manualmente, pero debido al elevado número de parámetros involucrados que hay que ajustar no resulta viable. Otra alternativa consiste en aplicar un enfoque de búsqueda por ‘fuerza bruta’, donde un ordenador evalúa numerosas combinaciones aleatorias de parámetros del modelo hasta encontrar uno que se ajuste adecuadamente a los datos experimentales, aunque este método es altamente ineficiente ya que requiere un gran número de evaluaciones del modelo y puede prolongar significativamente el tiempo de cálculo. Para disminuir este tiempo se emplean los algoritmos de optimización, que también prueban con combinaciones de parámetros, pero no son generadas de forma totalmente aleatoria.

Estos algoritmos mejoran este proceso de búsqueda de parámetros y reduce significativamente el tiempo de cálculo.

5.1. Funciones de coste

Para realizar un ajuste de las curvas, se emplean estos métodos de optimización, adaptados para poder realizar el ajuste de las curvas de nuestro modelo y basados en la minimización de una variable. Como realizar optimizaciones y lograr minimizar una variable es una cosa recurrente en problemas de ingeniería, existen numerosos métodos que logran hacerlo.

En nuestro caso, la variable objetivo que minimizaremos durante el proceso de ajuste es el error, el cual se calcula con una expresión que compara los resultados obtenidos gracias al modelo con los datos experimentales. Esta expresión, llamada función de coste o función de pérdida, puede definirse de diversas formas, permitiendo mayorar o aminorar el error obtenido en casos concretos donde por culpa de una variable no podamos realizar un ajuste preciso, haciendo así que el algoritmo pueda penalizar más estos casos. Un ejemplo de una función de coste común es haciendo la suma de errores al cuadrado (Ecuación 6):

$$error = \sum_{i=1}^n (y_i - y'_i)^2 \quad (6)$$

En esta ecuación se penaliza de forma cuadrática la suma de todos los errores que tiene cada punto del modelo comparado con el punto experimental correspondiente.

Un caso que se suele dar al realizar ajustes de datos experimentales de neumáticos de motocicleta es que el modelo se ajusta bien para ángulos de caída bajos, pero es complicado de ajustar cuando estos son elevados. En este caso, nos convendría penalizar el error teniendo en cuenta el ángulo de caída del caso en el que nos encontremos. Para ello, una solución puede ser multiplicar el valor absoluto del ángulo de caída por el error, haciendo así que este crezca más aún al tener ángulo de caída. Por ejemplo:

$$error = |\gamma| * \sum_{i=1}^n (y_i - y'_i)^2 \quad (7)$$

De esta forma, se tiene un error mayor cuando el ángulo de caída crece, haciendo así que los parámetros del modelo que modifican el comportamiento de este con la variación del ángulo de caída sean más sensibles a los cambios, apreciando más los mejores parámetros.

Para realizar el cálculo del error en nuestro caso, se emplean las mismas ecuaciones que definen el modelo y se compara la fuerza medida con la estimada por el modelo. Estas ecuaciones vienen definidas en los Anexo I. *Magic Formula* para PAC-MC y Anexo II. *Magic Formula* para PAC-2002.

5.2. Algoritmos de minimización del error

Una vez obtenido el error podemos orientar la dirección de búsqueda e incluso restringir el campo de estudio, evitando que algunos parámetros tomen valores que no sean realistas. Un ejemplo de ello puede ser restringir el valor de la variable E de la *Magic Formula*, ya que como hemos visto en la Figura 5, dicha variable no puede ser mayor a 1, pues genera curvas de fuerza que no se pueden dar en la realidad. Esto se haría detectando si la variable E es mayor a uno y si es el caso, aplicando un error grande, dando a entender que esa elección de parámetros es errónea.

Como se ha comentado previamente, lograr minimizar este error y seleccionar mejores parámetros es un problema recurrente en la ingeniería y para ello se han desarrollado numerosos métodos como, por ejemplo:

Descenso de gradiente

Este método de optimización, ampliamente utilizado en el entrenamiento de inteligencias artificiales, calcula la dirección de mayor decrecimiento del error y modifica los parámetros del modelo para moverse en la dirección adecuada.

Para comprender fácilmente el funcionamiento de este método, se hace una simplificación con un caso en el que tenemos 2 parámetros en el modelo, capaces de formar una superficie en la que vemos el error de la función de coste en el eje Z para combinación de valores de estos parámetros, representados en los eje X e Y (Figura 21).

Este método calcula el gradiente de la función de coste. Sabiendo que el gradiente de una función en un punto es un vector que apunta en la dirección de máximo crecimiento, es posible moverse en la dirección de máximo descenso, siendo esta la dirección opuesta al gradiente como se puede observar en la fórmula para el descenso de gradiente:

$$\theta = \theta - \eta \nabla_{\theta} f(\theta) \quad (8)$$

Donde θ es el vector que contiene todos los parámetros del modelo, $\nabla_{\theta} f(\theta)$ es el gradiente de función de coste respecto a θ y η es una constante para determinar el avance que se realiza en la dirección especificada.

En la Figura 21, se puede observar el funcionamiento de este método, donde el punto inicial es el azul oscuro y el siguiente es el punto azul claro, tras haber calculado los nuevos parámetros.

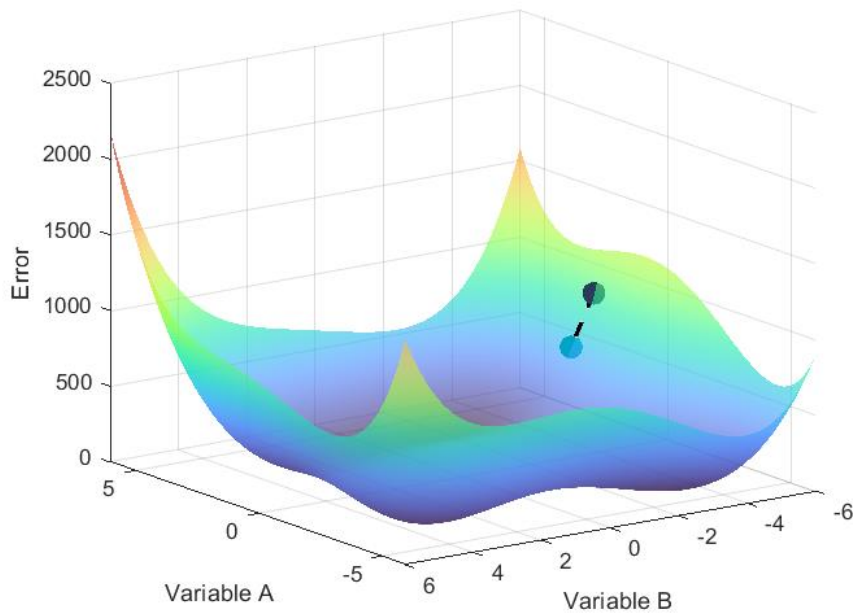


Figura 21.- Representación visual del método de descenso de gradiente

Hay algunas variantes de este método que mejoran la calidad del ajuste, evitando caer en mínimos locales, como el descenso de gradiente estocástico (SGD).

Método de Nelder-Mead

Este método toma $n+1$ vectores posibles con los parámetros del modelo, siendo n el número de parámetros del modelo. Con estos puntos se construye un polígono, que tras cada iteración se mueve y transforma buscando el mínimo error [8].

Los pasos que da en cada iteración son:

1. Ordenación de los puntos en función del error de cada uno de ellos.
2. Cálculo del centroide del polígono formado por los mejores n puntos, excluyendo así al peor punto.
3. Creación de un nuevo punto reflejado respecto al peor punto.
4. Evaluación del nuevo punto creado.

En el caso de que el nuevo punto sea el mejor, se intenta expandir más esa distancia. Si el error aumenta debido a ello, se elegirá el punto previo.

Si el punto reflejado es aun así peor que el punto n (el segundo peor), se realiza una contracción, exterior si el punto reflejado es mejor que el anterior o interior

si el punto reflejado es peor. Si el nuevo punto determinado es mejor que el reflejado, lo sustituye.

Si esta contracción no consigue mejorar ningún punto, se realiza una reducción, acercando todos los puntos al mejor de ellos.

Al igual que con el método anterior, se hace una simplificación a una función de 2 parámetros para poder visualizar el comportamiento de este método en la Figura 22, donde p_1 es el punto con peores parámetros.

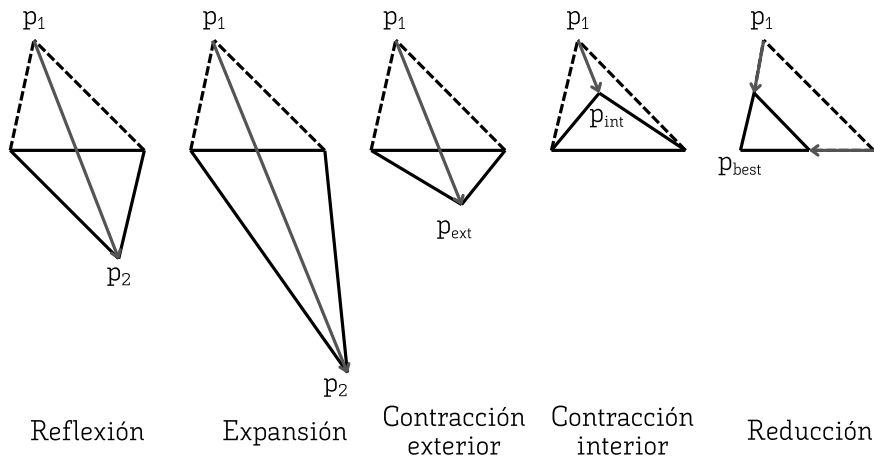


Figura 22.- Método de Nelder-Mead. Fuente: [8]

Algoritmos genéticos

Este método está inspirado en la evolución biológica como estrategia de búsqueda de mejores parámetros.

Para comenzar, se debe definir un número determinado de vectores con los parámetros a optimizar. A estos vectores se les denomina población, y cada uno de ellos por separado es un miembro de la población, también denominados cromosomas. Los parámetros de cada miembro o cromosoma son los genes y cada iteración de búsqueda de nuevos miembros se denomina generación, representando así una similitud total del algoritmo con lo que ocurre en la naturaleza.

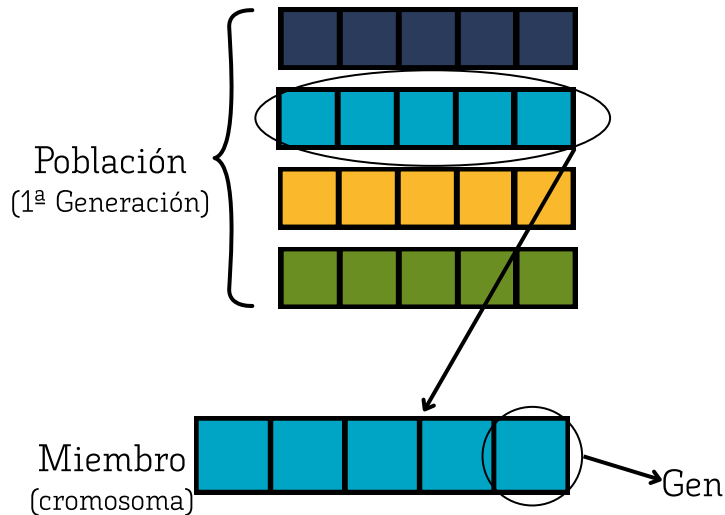


Figura 23.- Fundamentos de los algoritmos genéticos

Los miembros de la población se evalúan y se establecen los mejores miembros de la población. Estos miembros serán los progenitores para la siguiente generación. Estos progenitores intercambian sus genes con otros miembros, es decir, mezclan sus parámetros generando nuevas combinaciones y buscando así mejores soluciones. A esto se le denomina cruce.

Para mantener la diversidad en la población y explorar nuevos puntos, se establecen algunos parámetros aleatorios en algunos miembros. En este proceso se dice que los miembros sufren mutaciones.

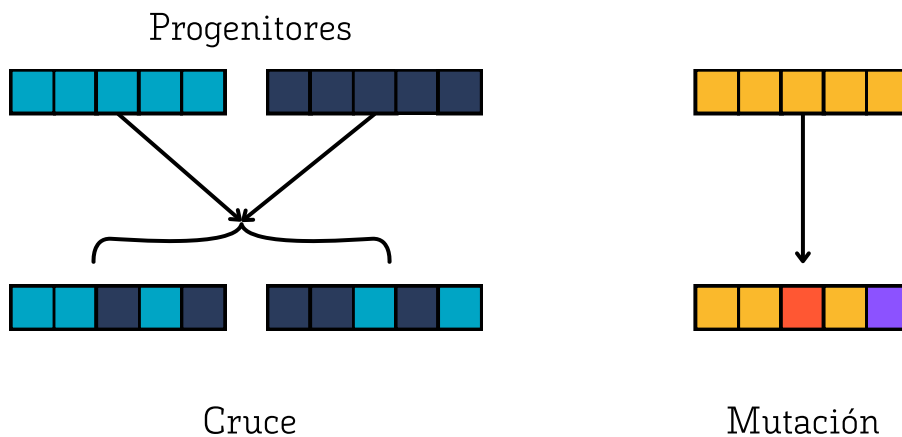


Figura 24.- Método de búsqueda de mejores miembros

Tras estos cambios, se evalúan los nuevos miembros y se comparan con los anteriores con lo que, si un descendiente es peor que el individuo anterior, el descendiente no pasará a la nueva generación y se mantendrá el miembro anterior.

En algunos casos se considera incluir el elitismo en este tipo de algoritmo. Los individuos élite que son los que mejor resultado presentan y por ello, pasan directamente a la siguiente generación de individuos. Si se emplea el elitismo en un algoritmo genético, no se pueden establecer demasiados miembros élite, pues se retrasaría la optimización al producirse pocos cambios en los parámetros.

Este tipo de algoritmo es altamente modificable debido a la cantidad de variables que presentan. Es por esto por lo que se han realizado numerosas modificaciones a los algoritmos genéticos entre las que destacan las estrategias evolutivas (ES) como por ejemplo la *Covariance Matrix Adaptation Evolution Strategy* (CMA-ES) o la *Differential Evolution* (DE) [9]. Esta última modificación será la empleada como método de ajuste de los parámetros de la *Magic Formula*, ya que se ha demostrado su funcionamiento, los resultados son buenos, el tiempo de cálculo es reducido y no requiere cálculos de derivadas como por ejemplo sí lo requieren otros métodos como el descenso de gradiente [9] [10].

5.3. *Differential Evolution*

En todos los algoritmos de optimización descritos, es necesario proporcionar un valor inicial para los parámetros a ajustar, los cuales suelen elegirse de manera aleatoria. Si este valor inicial es relativamente cercano al óptimo, el proceso de ajuste será más eficiente, reduciendo el tiempo de computación y alcanzando una solución final con un error más bajo.

La elección de estos valores iniciales tiene por tanto un impacto significativo en el rendimiento del algoritmo (Figura 25). Debido a esto, el valor inicial, llamado semilla, suele ser algún modelo previamente ajustado perteneciente a otro neumático. Como se utiliza una estrategia de optimización basada en algoritmos genéticos, se tienen que definir varios miembros para obtener la población inicial y cada uno de ellos debe ser diferente. Por ello, partiendo de una misma semilla, se les da un valor aleatorio a los parámetros de cada miembro, restringiendo los valores que se pueden tomar, los cuales están en un $\pm 20\%$ respecto al valor de la semilla.

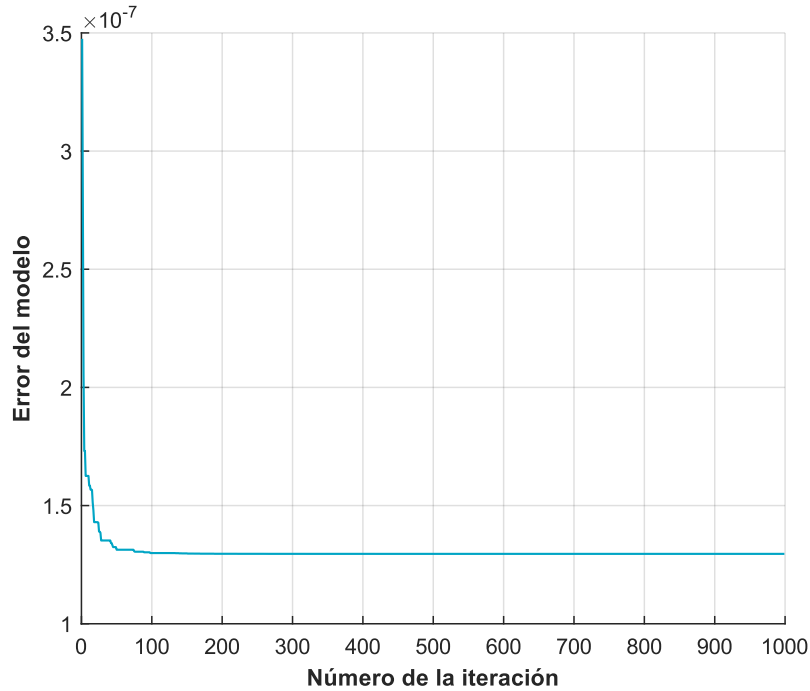


Figura 25.- Rápida convergencia debido a una buena semilla

El cálculo de los parámetros iniciales se calcula según las siguientes ecuaciones:

$$L_{low} = 0.8 * S$$

$$L_{high} = 1.2 * S \tag{9}$$

$$P_1 = L_{low} + rng * (L_{low} - L_{high})$$

Siendo L_{low} y L_{high} los límites inferior y superior respectivamente, S la semilla utilizada, P_1 un miembro de la población y rng un número generado aleatoriamente.

Debido a la imposibilidad de generar números completamente aleatorios en un ordenador, se debe usar algún método de generación de números pseudoaleatorios. El método elegido es el *Mersenne Twister* ([11]), ya que es el recomendado por MATLAB para la generación de números pseudoaleatorios, dándole como semilla la hora del momento en el que se ejecute la función.

Con la inicialización de la población realizada, se procede al cálculo de los errores de la primera población. Para ello, se calcula las fuerzas que dan las ecuaciones el modelo a partir de unos valores de deslizamiento obtenidos en los datos experimentales. Estas fuerzas se comparan con las obtenidas en los ensayos y se calcula el error del modelo.

La función de coste definida para los modelos de neumáticos de automóviles es la siguiente:

$$error = \frac{\| (F_{MF} - F) / F_z \|}{n_{puntos}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N \left| \left(\frac{F_{MF} - F}{F_z} \right)_i \right|^2}{n_{puntos}}} \quad (10)$$

Y en el caso de los neumáticos de motocicleta se empleará también la norma euclidiana, pero con una modificación en la entrada, pues se quiere mayorar el error con valores altos de ángulo de caída:

$$error = \frac{\| \gamma * (F_{MF} - F) / F_z \|}{n_{puntos}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N \left| \left(\gamma * \frac{F_{MF} - F}{F_z} \right)_i \right|^2}{n_{puntos}}} \quad (11)$$

Siendo F_{MF} el valor de la fuerza o el momento calculados con las ecuaciones de la *Magic Formula*, F el valor de la fuerza medida en el ensayo, F_z la carga vertical medida en el ensayo, usada también para los cálculos del modelo y n_{puntos} el número de puntos del ensayo introducidos en el ajuste del modelo.

Sabiendo los errores de la primera generación, se procede al cálculo de los miembros pertenecientes a la siguiente generación.

Los algoritmos de *Differential Evolution* comunes, a diferencia de los algoritmos genéticos clásicos, realizan una transformación inicial a los parámetros de los miembros con una estrategia llamada *differential variation* o *differential mutation*, que consiste en lo siguiente:

$$v_i = x_1 + F * (x_2 - x_3) \quad (12)$$

Siendo v_i el nuevo miembro mutado, x_1 , x_2 y x_3 miembros de la población anterior y F la constante de la *Differential Evolution*.

Según los miembros que se seleccionen para ocupar los puestos de x_1 , x_2 y x_3 , se adopta una u otra estrategia. Las estrategias se distinguen según su nomenclatura:

DE / x / y / z

Donde 'x' es el vector base que se usa:

- rand: Si se trata de un vector aleatorio
- best: Si es el mejor miembro de la población
- current: Si es el miembro de la población anterior que ocupaba ese lugar

'y' es el número de diferencias de vectores que se suman. En el caso de la Ecuación 12 es 1 y en la Ecuación 13 es de 2:

$$v_i = x_1 + F * (x_2 - x_3 + x_4 - x_5) \quad (13)$$

'z' es el tipo de cruce (*crossover*) usado y puede ser *bin* si se utiliza el binomial, que suele ser el más habitual y por ello no se suele incluir este término o *exp* si se emplea el exponencial.

Sabiendo esta nomenclatura se pueden construir estrategias muy diversas para la *differential variation* como, por ejemplo:

DE / rand / 1

$$v_i = x_{r1} + F * (x_{r2} - x_{r3}) \quad (14)$$

Que tiene buena exploración y evita caer en mínimos locales.

DE / best / 1

$$v_i = x_{best} + F * (x_{r1} - x_{r2}) \quad (15)$$

Utilizando al mejor individuo como base, mejorando así la convergencia, aunque se corre el riesgo de estancarse prematuramente.

DE / current to best / 1

$$v_i = x_i + F * (x_{best} - x_i + x_{r1} - x_{r2}) \quad (16)$$

Que interpola entre el individuo actual y el mejor de la población, mejorando la convergencia local.

Tras esta primera mutación se procede de igual forma que en los algoritmos genéticos clásicos, realizando un cruce, normalmente binomial. Esto quiere decir que se mezclará la generación anterior con los miembros mutados, en función de la variable *CR*. Esta

variable indica la probabilidad de que se dé el cruce de un gen del miembro mutado en el individuo de la población anterior.

El algoritmo *Differential Evolution* clásico finaliza aquí, pero con el fin de mejorar la exploración de nuevos posibles parámetros del modelo, se puede introducir una mutación al igual que se hace en los algoritmos genéticos convencionales, donde también hay una variable (*MR*) que controla la probabilidad de que se dé la mutación en los miembros.

Tras obtener los nuevos miembros, se evalúan, al igual que se hace en los algoritmos genéticos y se seleccionan los miembros que realicen un mejor a la curva de fuerzas o momentos.

Cabe destacar que los parámetros del algoritmo son muy sensibles a los cambios y una mala selección de ellos puede dar lugar un mal ajuste debido a estancamientos en mínimos locales o a que este no converja en una solución válida.

6. Desarrollo de app “TYDEX to TIR”

Teniendo los archivos *TYDEX* de los ensayos, podemos obtener el modelo del neumático ajustando correctamente las curvas de fuerzas y momentos. Para ello emplearemos el algoritmo de ajuste *Differential Evolution* [9] [11], tal y como se ha descrito en 5. Métodos de ajuste: Algoritmos genéticos.

Los objetivos que debe cumplir esta aplicación son.

- Ser capaz de leer y almacenar los datos contenidos en los archivos *TYDEX* o los exportados en formato *MAT* desde la otra aplicación, haciéndolo de una manera eficiente para evitar largos tiempos de espera. Debe ser capaz de identificar el tipo de ensayo para asociar los datos experimentales al ajuste de la curva correspondiente
- Poder inicializar la primera generación del algoritmo genético a partir de una semilla introducida por el usuario y, en caso de que ninguna sea introducida, tener una semilla válida.
- Permitir la modificación de los parámetros del algoritmo *DE*, como son la constante *F*, el ratio de cruce *CR* o el número de iteraciones.
- Ser capaz de realizar el ajuste de cada curva y evaluar los parámetros para visualizar el ajuste realizado junto con los datos experimentales, mostrando el error de cada ajuste.
- Poder introducir los datos adicionales que requieren los *TIR*, algunos de ellos provenientes de los *TYDEX*, como las dimensiones del neumático, y otros introducidos manualmente, como el tipo de modelo, las inercias del neumático, rigideces, rangos de operación o coeficientes de escala (λ).
- Exportar el modelo generado en formato *TIR*. Además, se dispondrá de la opción de exportar los datos en formato *.mat*, donde se encuentre una variable de tipo estructura que pueda ser introducida en el bloque de *Simulink* ‘*Magic Formula Tire Force and Torque*’ pues es el bloque del neumático utilizado en los modelos multicuerpo de vehículos que se hacen en *Simulink*. Actualmente este bloque no soporta el modelo de neumáticos de motocicleta debido a la complejidad aumentada que estos tienen, pero será introducido en próximas versiones.
- Al igual que la app “*TDMS to TYDEX*”, esta aplicación debe ser intuitiva y fácil de usar, evitando que ocurran errores cuando el usuario se encuentre utilizándola y empleando diferentes métodos para solventar los errores que se

puedan dar, con el fin de que nunca se paralice la aplicación por la aparición de un error.

De igual forma que se ha hecho con la anterior aplicación, se define el procedimiento que deberá seguir el usuario para poder utilizar la app de manera correcta:

1. Cargar los archivos *TYDEX* en la app.
2. Introducir una semilla si se desea. En el caso que ninguna semilla sea introducida, la aplicación tomará los valores de un archivo TIR previamente ajustado.
3. Modificar los parámetros del algoritmo de ajuste si se desea. Se ha comprobado la efectividad de los datos iniciales, para que no sea necesario modificarlos.
4. Seleccionar la curva para realizar el ajuste, visualizar el error final del modelo y comprobar del ajuste con la curva mostrada en el gráfico.
5. Repetir el paso 3 con todas las curvas que se deben ajustar.
6. Rellenar los datos adicionales requeridos para la generación del TIR.
7. Exportar el modelo ajustado en el formato deseado, pudiendo elegir entre TIR y la estructura para el bloque '*Magic Formula Tire Force and Torque*' de *Simulink*.

6. Desarrollo de app: "TYDEX to TIR"

The application interface is divided into several sections:

- Ajuste del modelo / Datos del TIR:** Contains adjustment parameters and data input fields.
 - Parámetros de ajuste:** Population size (300), Number of generations (1000), Crossover rate [0-1] (0.6), DE constant [0-2] (0.4).
 - Datos del TIR:** Nominal wheel load (N) (1500), Unloaded radius (m) (R (m)).
 - Tipo de ajuste:** A grid of checkboxes for Fx0, FxC, Fy0, FyC, Mz0, MzC, and Mx.
 - Error:** A message box stating "No se han añadido datos para realizar el ajuste." and an "Ajustar modelo" button.
- Plot:** A 2D plot with X and Y axes ranging from 0 to 1. A legend on the right lists various adjustment types with radio buttons: Fx-kappa (selected), Fx-alpha, Fx-camber, Fy-kappa, Fy-alpha, Fy-camber, Mz-kappa, Mz-alpha, Mz-camber, Mx-kappa, Mx-alpha, and Mx-camber.
- Cargar datos:** Buttons for "Cargar MAT" and "Cargar TYDEX". A "Modelo" section with a toggle switch between "PAC_MC" and "PAC_2002".
- Generar modelo:** A text input field for "Nombre del archivo" and buttons for "Generar modelo Simscape" and "Generar TIR".

Figura 26.- Aplicación TYDEX to TIR

6.1. Importación de datos

El primer paso tras iniciar la aplicación consiste en cargar los archivos *TYDEX* que se deseen ajustar. Se ha programado un *script* en MATLAB capaz de leer los datos contenidos en estos archivos pudiendo identificar el tipo de curva que se puede ajustar con esos datos gracias al nombre del archivo. Si se ha utilizado la aplicación anterior para obtener los puntos sobre los que realizar el ajuste, se podrá seleccionar la carpeta que contiene todos los archivos MAT, cargándolos de una forma más eficiente en el programa. Esta función está mostrada en Anexo IV. Códigos de MATLAB.

6.2. Ajuste de curvas

Para realizar el ajuste de las curvas, el primer paso será la elección adecuada de los parámetros del algoritmo genético [10]. Se han establecido unos valores predeterminados con una capacidad de ajuste comprobada, y son los siguientes:

- Tamaño de la población: 300
- Número de generaciones: 1000
- *Crossover rate* (CR): 0.6
- *DE constant* (F): 0.4

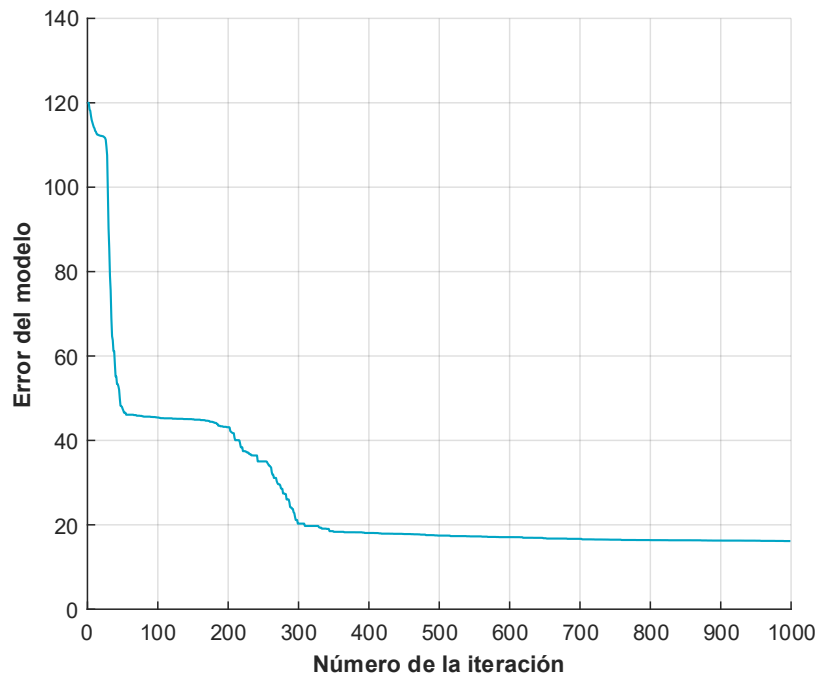


Figura 27.- Demostración de convergencia con los parámetros predeterminados

En la Figura 27, podemos apreciar que se reduce el error y se converge a una solución válida si se utilizan los parámetros predeterminados. El error tiene una escala diferente que la Figura 25 debido a que la función de coste empleada para obtener cada una de las curvas es diferente.

Además, se deben introducir ciertos parámetros necesarios para el ajuste del modelo como son la carga nominal del neumático (F_z), o el radio del neumático sin carga vertical aplicada (R_0).

Tras ello, se selecciona el tipo de curva que se desea ajustar. Debido a que hay curvas del modelo que requieren haber modelado correctamente otro tipo de curvas previamente, como se puede apreciar en los Anexo I. *Magic Formula* para PAC-MC y Anexo II. *Magic Formula* para PAC-2002. Por ello, se deberá seguir un orden en el ajuste:

1. Fuerza longitudinal pura (F_{x0})
2. Fuerza lateral pura (F_{y0})
3. Momento de alineación con deslizamiento lateral puro (M_{z0})
4. Fuerza longitudinal combinada (F_{xC})
5. Fuerza lateral combinada (F_{yC})
6. Momento de alineación con deslizamiento combinado (M_{zC})
7. Momento de vuelco con deslizamiento combinado (M_x)

Parámetros de ajuste		Semilla	+
Population size	<input type="text" value="300"/>	Nominal wheel load (N)	<input type="text" value="1500"/>
Number of generations	<input type="text" value="1000"/>	Unloaded radius (m)	<input type="text" value="R (m)"/>
Crossover rate [0-1]	<input type="text" value="0.6"/>	Tipo de ajuste	
DE constant [0-2]	<input type="text" value="0.4"/>	<input checked="" type="checkbox"/> Fx0	<input type="checkbox"/> FxC
		<input type="checkbox"/> Fy0	<input type="checkbox"/> FyC
		<input type="checkbox"/> Mz0	<input type="checkbox"/> MzC
			<input type="checkbox"/> Mx

Figura 28.- Parámetros necesarios para el ajuste y cuadro de selección del tipo de curva

Tras la selección del tipo de ajuste requerido, el usuario será capaz de visualizar el error del mejor miembro de la población en cada iteración, permitiendo así que el usuario

pueda comprobar que el algoritmo se encuentra trabajando correctamente y el error se está reduciendo (Figura 29).

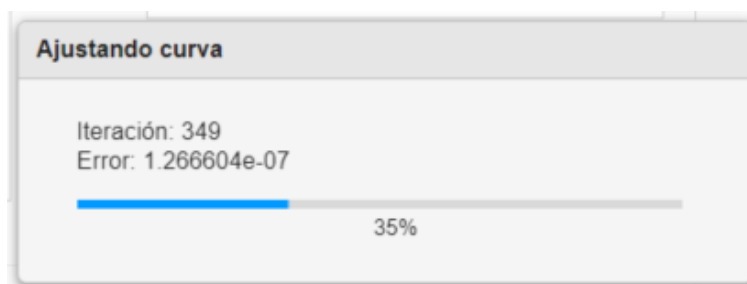


Figura 29.- Pantalla de carga durante el ajuste

Una vez hayan terminado todas las iteraciones del algoritmo de ajuste, la pantalla de carga llegará al 100% y desaparecerá. Seguirá siendo posible visualizar el error dado por la función de coste del algoritmo para la curva que acabemos de ajustar en el *TextArea* dedicado a ello (Figura 30)

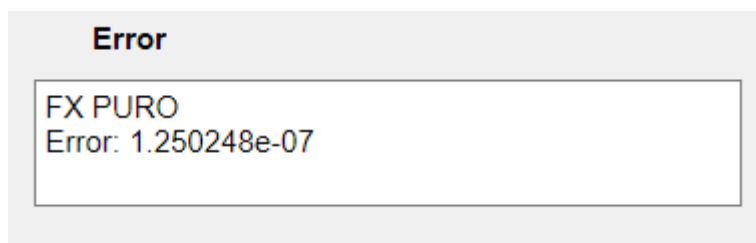


Figura 30.- Terminal de muestra del error del modelo

Finalmente se puede verificar que la curvas se ajustan correctamente a los datos experimentales (Figura 31 y Figura 32). También es posible visualizar las curvas ajustadas previamente si se selecciona dicha curva en el cuadro 'Tipo de ajuste' (Figura 28)

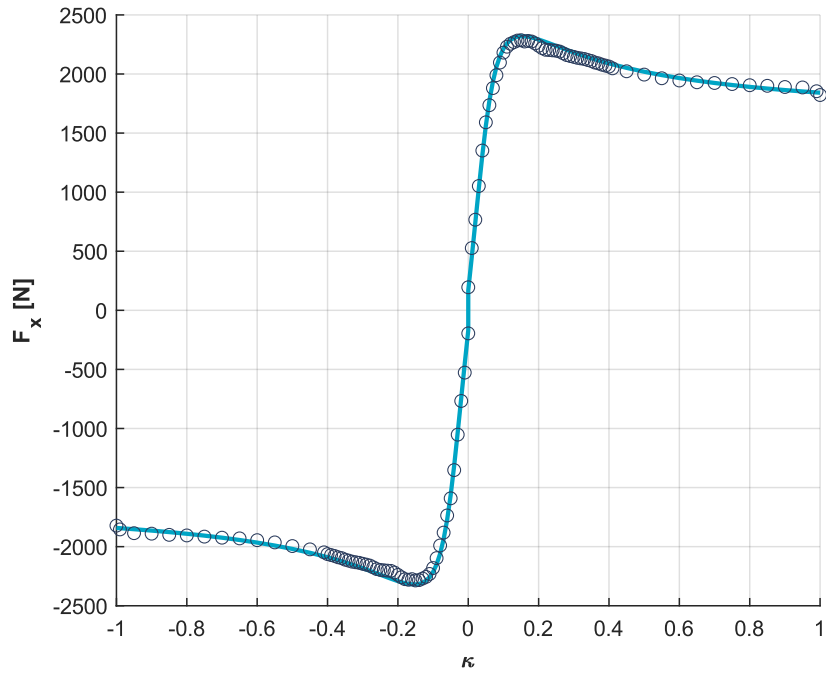


Figura 31.- Demostración de ajuste de una curva $F_x-\kappa$ con la app

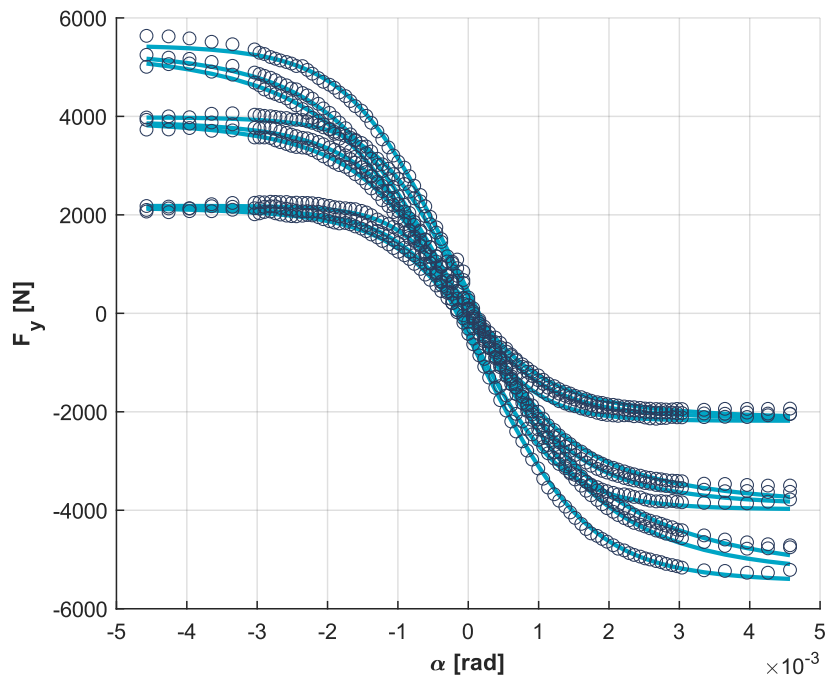


Figura 32.- Demostración de ajuste de una curva $F_y-\alpha$ con la app

Y así es como se ve la aplicación una vez ajustada la curva:

6. Desarrollo de app: "TYDEX to TIR"

Ajuste del modelo | **Datos del TIR**

Parámetros de ajuste | **Semilla**

Population size:

Number of generations:

Crossover rate [0-1]:

DE constant [0-2]:

Nominal wheel load (N):

Unloaded radius (m):

Tipo de ajuste

Fx0 FxC

Fy0 FyC

Mz0 MxC

Mx

Error

FY PURO

Error: 2.384796e+02

Cargar datos

Modelo

PAC_MC PAC_2002

Generar modelo

Nombre del archivo:

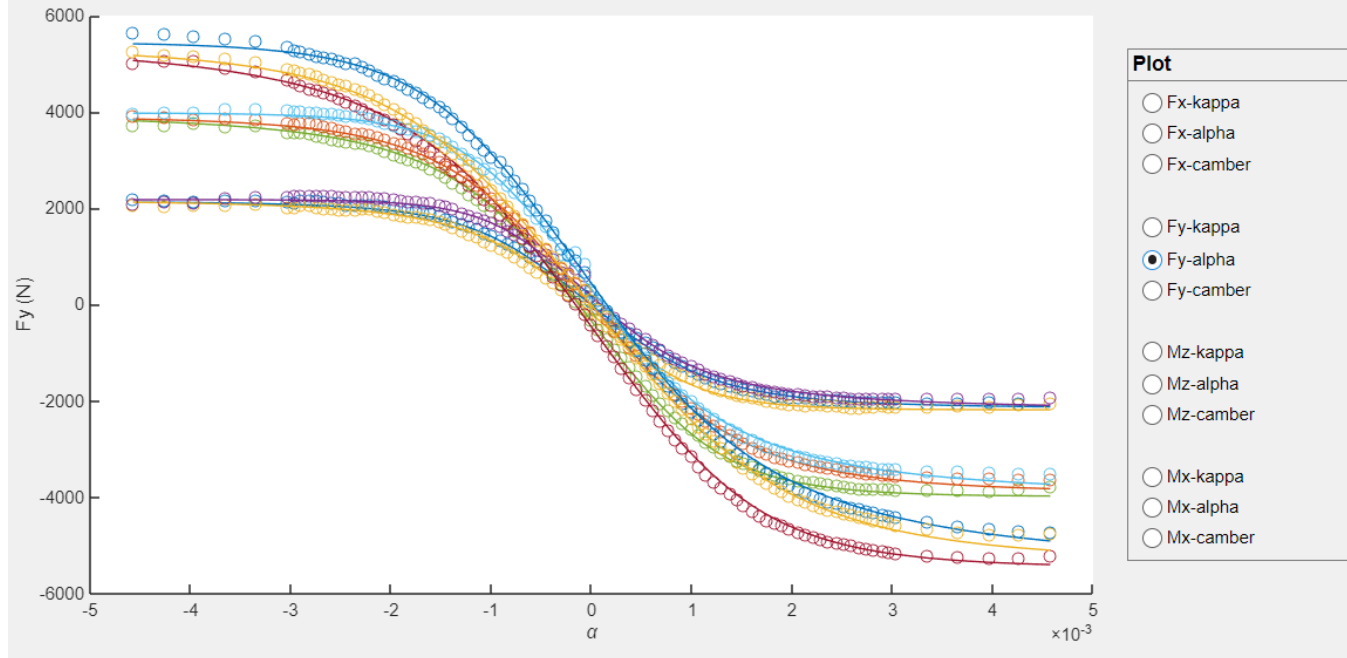


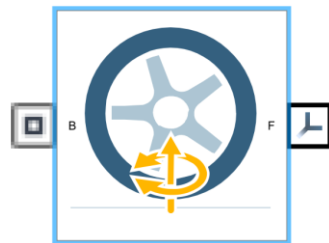
Figura 33.- Aplicación TYDEX to TIR en funcionamiento

6.3. Exportación del modelo

Una vez ajustadas todas las curvas del modelo, se deben rellenar todos los parámetros adicionales relacionados con el neumático que se deben introducir en el TIR. Estos parámetros son los descritos en 3.1 Formato de archivos de transferencia de datos: TDMS, TYDEX y TIR.

Con todos estos datos introducidos, podemos exportar el modelo en un archivo TIR, con el formato mostrado en el Anexo V. Ejemplo de TIR.

También se puede optar por exportar el modelo para su utilización en modelos multicuerpo de vehículos modelados en *Simscape Multibody*. Esta opción exporta un MAT con una variable tipo estructura, definida por MATLAB para poder importar los parámetros del modelo en el bloque de *Simulink*.



Magic Formula Tire Force and Torque

Figura 34.- Bloque de neumático de *Simscape Multibody*. Fuente: [12]

7. Conclusiones

Se han cumplido todos los objetivos propuestos en este Trabajo de Fin de Grado, como se presenta a continuación.

Se ha desarrollado una herramienta con interfaz gráfica que facilite la visualización de los archivos TDMS obtenidos directamente del banco de ensayos de neumáticos (Figura 19). Podemos seleccionar los puntos deseados de las curvas para poder distribuir esos ensayos, exportando los datos en archivos TYDEX (Figura 16 y Figura 20). La herramienta está basada en MATLAB, por lo que permite manipular los datos obtenidos a partir de la aplicación fácilmente.

También se ha desarrollado otra aplicación que se encarga de ajustar los parámetros del modelo *Magic Formula* (Figura 33), con la posibilidad de personalizar el algoritmo de ajuste (Figura 28), que está basado en algoritmos genéticos [10], quedando demostrado que el ajuste es preciso (Figura 31). El modelo puede ser exportado como archivo TIR o como variable de MATLAB, permitiendo incluir el modelo en el bloque de *Simscape Multibody, Magic Formula Tire Force and Torque*.

Ambas aplicaciones reducen considerablemente el tiempo de preparación de datos y su tiempo de ajuste, sin sacrificar la precisión con la que estos se pueden hacer.

7.1. Trabajo futuro

Las herramientas se mejorarán con el tiempo, solucionando los problemas que vayan surgiendo, pues a pesar de haber sido probadas, pueden aparecer nuevos errores que antes no se hubieran dado.

A parte de la solución de errores, se podrán ajustar nuevos modelos, más complejos y fieles a la realidad, dando la opción de elegir el modelo deseado. También se pueden implementar opciones para cambiar la función de coste utilizada en cada curva, incluso siendo posible importarla de algún modo.

Y por último, enfocándonos en el método de ajuste, se podrán implementar otros algoritmos de ajuste, dando la posibilidad de elegir el método de ajuste deseado.

Referencias

- [1] M. Bian, L. Chen, Y. Luo y K. Li, «A Dynamic Model for Tire/Road Friction Estimation under Combined Longitudinal/Lateral Slip Situation,» *SAE Technical Papers*, 2014.
- [2] M. S. «Adams Tire User's Guide,» 2021.
- [3] H. B. Pacejka y I. Besselink, *Tire and Vehicle Dynamics*, Elsevier, 2012.
- [4] H. B. Pacejka, *Tyre and Vehicle Dynamics*, Rotterdam: Elsevier, 2006.
- [5] c. s. s. «FTire - Flexible Structure Tire Model,» 2022.
- [6] C. Bastien y H. Guo, «A detailed aircraft tyre finite element model for hard landing safety assessment,» 2013.
- [7] H.-J. Unrau y J. Zamow, «TYDEX-Format: description and Reference Manual. Release 1.3,» 1997.
- [8] M. H. Wright, «Nelder, Mead, and the other Simplex Method,» *Documenta Mathematica*, pp. 271-276, 2010.
- [9] R. Storn y K. Price, «Differential Evolution - A simple and efficient adaptive scheme for global optimization over continuous spaces,» *Journal of Global Optimization*, vol. 11, pp. 341-359, 1997.
- [10] J. C. A. Ortiz, E. C. y A. S. , «An Alternative Method to Determine the Magic Tyre Model Parameters Using Genetic Algorithms,» *Taylor & Francis*, vol. 41, nº 2, pp. 109-127, 2010.
- [11] M. Matsumoto y T. Nishimura, «Mersenne twister: a 623-dimensionally equidistributed uniform pseudo-random number generator,» *ACM Transactions on Modeling and Computer Simulation*, vol. 8, nº 1, pp. 3-30, 1998.
- [12] MathWorks, «Simscape Multibody User's Guide,» 2024.
- [13] MathWorks, «MATLAB App Building,» 2024.

- [14] M. Alcázar Vargas, J. Pérez Fernández, I. Sánchez Andrades, J. A. Cabrera Carrillo y J. J. Castillo Aguilar, «Modeling of the Influence of Operational Parameters on Tire Lateral Dynamics,» *Sensors*, nº 17, 2022.
- [15] J. A. Cabrera, J. J. Castillo, J. Pérez, J. M. Velasco, A. J. Guerra y P. Hernández, «A Procedure for Determining Tire-Road Friction Characteristics Using a Modification of the Magic Formula Based on Experimental Results,» *Sensors*, nº 3, 2018.
- [16] H. Dugoff, P. Fancher y L. Segel, «An Analysis of Tire Traction Properties and their Influence on Vehicle Dynamic Performance,» *SAE Technical Paper*, nº 700377, 1970.

Anexo I. *Magic Formula* para PAC-MC

Fórmulas para la Fuerza Longitudinal (Fx) con Deslizamiento Puro

$$F_x = F_{x0}(\kappa, F_z, \gamma) \quad (17)$$

$$F_{x0} = D_x \sin[C_x \arctan\{B_x \kappa_x - E_x (B_x \kappa_x - \arctan(B_x \kappa_x))\}] + S_{Vx} \quad (18)$$

$$\kappa_x = \kappa + S_{Hx} \quad (19)$$

$$\gamma_x = \gamma * \lambda_{\gamma x} \quad (20)$$

Cuyos coeficientes son:

$$C_x = p_{Cx1} * \lambda_{Cx} \quad (21)$$

$$D_x = \mu_x * F_z * \zeta_1 \quad (22)$$

$$\mu_x = (p_{Dx1} + p_{Dx2} df_z) (1 + p_{px3} dp_i + p_{px4} dp_i^2) * (1 - p_{Dx3} * \gamma^2) \lambda_{\mu_x} \quad (23)$$

$$E_x = (p_{Ex1} + p_{Ex2} df_z + p_{Ex3} df_z^2) * (1 - p_{Ex4} \operatorname{sgn}(\kappa_x)) * \lambda_{E_x} \quad (24)$$

$$K_x = F_z * (p_{Kx1} + p_{Kx2} df_z) * \exp(p_{Kx3} df_z) (1 + p_{px1} dp_i + p_{px2} dp_i^2) \lambda_{K_x} \quad (25)$$

$$K_x = B_x C_x D_x \quad (26)$$

$$B_x = K_x / (C_x D_x) \quad (27)$$

$$S_{Hx} = -(q_{sy1} F_z \lambda_{My} + S_{Vx}) / K_x \quad (28)$$

$$S_{Vx} = F_z * (p_{Vx1} + p_{Vx2} df_z) * \lambda_{V_x} * \lambda_{\mu_x} * \zeta_1 \quad (29)$$

Fórmulas para la Fuerza Lateral (Fy) con Deslizamiento Puro

$$F_y = F_{y0}(\alpha, F_z, \gamma) \quad (30)$$

$$F_{y0} = D_y \sin[C_y \arctan\{B_y \alpha_y - E_y (B_y \alpha_y - \arctan(B_y \alpha_y))\}] \quad (31)$$

$$+ C_\gamma \arctan\{B_\gamma \gamma_y - E_\gamma (B_\gamma \gamma_y - \arctan(B_\gamma \gamma_y))\}]$$

$$\alpha_y = \alpha + S_{Hy} \quad (C_y + C_\gamma < 2) \quad (32)$$

$$\gamma_y = \gamma * \lambda_{\gamma y} \quad (33)$$

Cuyos coeficientes son:

$$C_y = p_{Cy1} * \lambda_{Cy} \quad (34)$$

$$D_y = \mu_y * F_z * \zeta_2 \quad (35)$$

$$\mu_y = p_{Dy1} * \exp(p_{Dy2} df_z) (1 + p_{py3} dp_i + p_{py4} dp_i^2) (1 - p_{Dy3} * \gamma_y^2) \lambda_{\mu_y} \quad (36)$$

$$E_y = (p_{Ey1} + p_{Ey2} \gamma_y^2 + (p_{Ey3} + p_{Ey4} \gamma_y) * \text{sgn}(\alpha_y)) * \lambda_{E_y} \quad (37)$$

K_y

$$= p_{Ky1} (1 + p_{py1} dp_i) F_{z0} \sin[p_{Ky2} \arctg\left\{\frac{F_z}{(p_{Ky3} + p_{Ky4} \gamma_y^2) (1 + p_{py2} dp_i) F_{z0} \lambda_{z0}}}\right\}] \quad (38)$$

$$* (1 - p_{Ky5} \gamma_y^2) * \lambda_{Fz0} * \lambda_{Ky}$$

$$K_y = B_y C_y D_y \quad (39)$$

$$B_y = K_y / (C_y D_y) \quad (40)$$

$$S_{Hy} = p_{Hy1} * \lambda_{Hy} \quad (41)$$

$$C_y = p_{Cy2} * \lambda_{Cy} \quad (42)$$

$$K_y = (p_{Ky6} + p_{Ky7} df_z) (1 + p_{py5} dp_i) * F_z * \lambda_{Ky} \quad (43)$$

$$E_y = p_{Ey5} * \lambda_{E_y} \quad (44)$$

$$B_y = K_y / (C_y D_y) \quad (45)$$

Fórmulas para el Momento de Alineación (Mz) con Deslizamiento Puro

$$M_z = M_{z0}(\alpha, F_z, \gamma) \quad (46)$$

$$M_{z0} = -t * F_{y0, \gamma=0} + M_{zr} \quad (47)$$

$$\gamma_z = \gamma * \lambda_{\gamma z} \quad (48)$$

Con el *Pneumatic Trail*, t :

$$t(\alpha_t) = D_t \cos[C_t \arctan\{B_t \alpha_t - E_t (B_t \alpha_t - \arctan(B_t \alpha_t))\}] * \cos(\alpha) \quad (49)$$

$$\alpha_t = \alpha + S_{Ht} \quad (50)$$

Con el Momento Residual, M_{zr} :

$$M_{zr}(\alpha_r) = D_r \cos[C_r \arctan(B_r \alpha_r)] * \cos(\alpha) \quad (51)$$

$$\alpha_r = \alpha + S_{Hr} \quad (52)$$

Y con los coeficientes:

$$B_t = (q_{Bz1} + q_{Bz2} df_z + q_{Bz3} df_z^2) * \{1 + q_{Bz4} \gamma_z + q_{Bz5} |\gamma_z|\} * \lambda_{Ky} / \lambda_{\mu z} \quad (53)$$

$$C_t = q_{Cz1} \quad (54)$$

$$D_t = F_z * (q_{Dz1} + q_{Dz2} df_z) * (1 + q_{Dz3} |\gamma_z| + q_{Dz4} d\gamma_z^2) * (1 - q_{pz1} dp_i)(R_0 / F_{z0}) \lambda_t \quad (55)$$

$$E_t = (q_{Ez1} + q_{Ez2} df_z + q_{Ez3} df_z^2) * \left(1 + (q_{Ez4} + q_{Ez5} \gamma_z) * \left(\frac{2}{\pi}\right) * \arctan(B_t C_t \alpha_t)\right) \quad (56)$$

$$S_{Ht} = 0 \quad (57)$$

$$B_r = q_{Bz9} * \lambda_{Ky} / \lambda_{\mu y} \quad (58)$$

$$C_r = 1 \quad (59)$$

$$D_r = F_z * [(q_{Dz6} + q_{Dz7} df_z) \lambda_r + (q_{Dz8} + q_{Dz9} df_z) \gamma_z] \quad (60)$$

$$+ (q_{Dz10} + q_{Dz11} df_z) (1 + q_{pz2} dp_i) (\gamma_z * |\gamma_z|) R_0 \lambda_{\mu y}$$

$$S_{Hr} = q_{Hz1} + q_{Hz2} df_z + (q_{Hz3} + q_{Hz4} df_z) \gamma_z \quad (61)$$

$$K_z = -t * K_y \quad (62)$$

Fórmulas para la Fuerza Longitudinal (Fx) con Deslizamiento Combinado

$$F_x = F_{x0} G_{x\alpha}(\kappa, F_z, \alpha) \quad (63)$$

$$F_x = D_{x\alpha} \cos[C_{x\alpha} \arctan\{B_{x\alpha} \alpha_s - E_{x\alpha} (B_{x\alpha} \alpha_s - \arctan(B_{x\alpha} \alpha_s))\}] \quad (64)$$

$$\alpha_s = \alpha + S_{Hx\alpha} \quad (65)$$

Cuyos coeficientes son:

$$B_{x\alpha} = (r_{Bx1} + r_{Bx3}\gamma^2)\cos[\arctan\{r_{Bx2}\kappa\}]\lambda_{x\alpha} \quad (66)$$

$$C_{x\alpha} = r_{Cx1} \quad (67)$$

$$D_{x\alpha} = F_{x0}/\cos[C_{x\alpha}\arctan\{B_{x\alpha}S_{Hx\alpha} - E_{x\alpha}(B_{x\alpha}S_{Hx\alpha} - \arctan(B_{x\alpha}S_{Hx\alpha}))\}] \quad (68)$$

$$E_{x\alpha} = r_{Ex1} + r_{Ex2}df_z \quad (69)$$

$$S_{Hx\alpha} = r_{Hx1} \quad (70)$$

Siendo la función de pesos:

$$G_{x\alpha} = \frac{\cos[C_{x\alpha}\arctan\{B_{x\alpha}\alpha_s - E_{x\alpha}(B_{x\alpha}\alpha_s - \arctan(B_{x\alpha}\alpha_s))\}]}{\cos[C_{x\alpha}\arctan\{B_{x\alpha}S_{Hx\alpha} - E_{x\alpha}(B_{x\alpha}S_{Hx\alpha} - \arctan(B_{x\alpha}S_{Hx\alpha}))\}]} \quad (71)$$

Fórmulas para la Fuerza Lateral (Fy) con Deslizamiento Combinado

$$F_y = F_{y0}G_{y\kappa}(\kappa, F_z, \alpha, \gamma) + S_{Vy\kappa} \quad (72)$$

$$F_y = D_{y\kappa}\cos[C_{y\kappa}\arctan\{B_{y\kappa}\kappa_s - E_{y\kappa}(B_{y\kappa}\kappa_s - \arctan(B_{y\kappa}\kappa_s))\}] + S_{Vy\kappa} \quad (73)$$

$$\kappa_s = \kappa + S_{Hy\kappa} \quad (74)$$

Cuyos coeficientes son:

$$B_{y\kappa} = (r_{By1} + r_{By4}\gamma^2)\cos[\arctan\{r_{By2}(\alpha - r_{By3})\}]\lambda_{y\kappa} \quad (75)$$

$$C_{y\kappa} = r_{Cy1} \quad (76)$$

$$D_{y\kappa} = F_{y0}/\cos[C_{y\kappa}\arctan\{B_{y\kappa}S_{Hy\kappa} - E_{y\kappa}(B_{y\kappa}S_{Hy\kappa} - \arctan(B_{y\kappa}S_{Hy\kappa}))\}] \quad (77)$$

$$E_{y\kappa} = r_{Ey1} + r_{Ey2}df_z \quad (78)$$

$$S_{Hy\kappa} = r_{Hy1} + r_{Hy2}df_z \quad (79)$$

$$S_{Vy\kappa} = D_{Vy\kappa}\sin[r_{Vy5}\arctan(r_{Vy6}\kappa)]\lambda_{Vy\kappa} \quad (80)$$

$$D_{Vy\kappa} = \mu_y F_z * (r_{Vy1} + r_{Vy2}df_z + r_{Vy3}\gamma) * \cos[\arctan(r_{Vy4}\alpha)] \quad (81)$$

Siendo la función de pesos:

$$G_{x\alpha} = \frac{\cos[C_{y\kappa} \arctan\{B_{y\kappa} \kappa_S - E_{y\kappa} (B_{y\kappa} \kappa_S - \arctan(B_{y\kappa} \kappa_S))\}]}{\cos[C_{y\kappa} \arctan\{B_{y\kappa} S_{Hy\kappa} - E_{y\kappa} (B_{y\kappa} S_{Hy\kappa} - \arctan(B_{y\kappa} S_{Hy\kappa}))\}]} \quad (82)$$

Fórmulas para el Momento de Alineación (Mz) con Deslizamiento Combinado

$$M_z = -t * F_y' + M_{zr} + s * F_x \quad (83)$$

$$t(\alpha_{t,eq}) = D_t \cos[C_t \arctan\{B_t \alpha_{t,eq} - E_t (B_t \alpha_{t,eq} - \arctan(B_t \alpha_{t,eq}))\}] * \cos(\alpha) \quad (84)$$

$$F_y' = F_{y0,\gamma=0} - S_{Vy\kappa} \quad (85)$$

$$M_{zr} = M_{zr}(\alpha_{r,eq}) = D_r \cos[\arctan(B_r \alpha_{r,eq})] * \cos(\alpha) \quad (86)$$

$$s = \{s_{sz1} + s_{sz2}(F_y/F_{z0}) + (s_{sz3} + s_{sz4}df_z)\gamma\} * R_0 * \lambda_s \quad (87)$$

Con los siguientes argumentos:

$$\alpha_{t,eq} = \arctan \sqrt{\tan^2 \alpha_t + \left(\frac{K_x}{K_y}\right)^2 \kappa^2 * \text{sgn}(\alpha_t)} \quad (88)$$

$$\alpha_{r,eq} = \arctan \sqrt{\tan^2 \alpha_r + \left(\frac{K_x}{K_y}\right)^2 \kappa^2 * \text{sgn}(\alpha_r)} \quad (89)$$

Fórmula para el Momento de Vuelco (Mx) con Deslizamiento Combinado

$$\begin{aligned} M_x = & R_0 * F_z * \left\{ q_{sx3} * \frac{F_y}{F_{z0}'} \right. \\ & + q_{sx4} \cos[q_{sx5} \arctan\left(\left(q_{sx6} \frac{F_z}{F_{z0}'}\right)^2\right)] \sin[q_{sx7}\gamma + q_{sx8} \arctan\left(q_{sx9} \frac{F_y}{F_{z0}'}\right)] \\ & \left. + [q_{sx10} \arctan\left(q_{sx11} \frac{F_z}{F_{z0}'}\right) - q_{sx2}(1 + q_{px1} dp_i)]\gamma + q_{sx1} \lambda_{VMx} \right\} \lambda_{Mx} \end{aligned} \quad (90)$$

Anexo II. *Magic Formula* para PAC-2002

Fórmulas para la Fuerza Longitudinal (Fx) con Deslizamiento Puro

$$F_x = F_{x0}(\kappa, F_z, \gamma) \quad (91)$$

$$F_{x0} = D_x \sin[C_x \arctan\{B_x \kappa_x - E_x (B_x \kappa_x - \arctan(B_x \kappa_x))\}] + S_{Vx} \quad (92)$$

$$\kappa_x = \kappa + S_{Hx} \quad (93)$$

$$\gamma_x = \gamma * \lambda_{\gamma x} \quad (94)$$

Cuyos coeficientes son:

$$C_x = p_{Cx1} * \lambda_{Cx} \quad (95)$$

$$D_x = \mu_x * F_z * \zeta_1 \quad (96)$$

$$\mu_x = (p_{Dx1} + p_{Dx2} df_z)(1 + p_{px3} dp_i + p_{px4} dp_i^2) * (1 - p_{Dx3} * \gamma^2) \lambda_{\mu_x} \quad (97)$$

$$E_x = (p_{Ex1} + p_{Ex2} df_z + p_{Ex3} df_z^2) * (1 - p_{Ex4} \operatorname{sgn}(\kappa_x)) * \lambda_{E_x} \quad (98)$$

$$K_x = F_z * (p_{Kx1} + p_{Kx2} df_z) * \exp(p_{Kx3} df_z)(1 + p_{px1} dp_i + p_{px2} dp_i^2) \lambda_{K_x} \quad (99)$$

$$K_x = B_x C_x D_x \quad (100)$$

$$B_x = K_x / (C_x D_x) \quad (101)$$

$$S_{Hx} = (p_{Hx1} + p_{Hx2} df_z) \lambda_{Hx} \quad (102)$$

$$S_{Vx} = F_z * (p_{Vx1} + p_{Vx2} df_z) * \lambda_{V_x} * \lambda_{\mu_x} * \zeta_1 \quad (103)$$

Fórmulas para la Fuerza Lateral (Fy) con Deslizamiento Puro

$$F_y = F_{y0}(\alpha, F_z, \gamma) \quad (104)$$

$$F_{y0} = D_y \sin[C_y \arctan\{B_y \alpha_y - E_y (B_y \alpha_y - \arctan(B_y \alpha_y))\}] + S_{Vy} \quad (105)$$

$$\alpha_y = \alpha + S_{Hy} \quad (C_y + C_{\gamma} < 2) \quad (106)$$

$$\gamma_y = \gamma * \lambda_{\gamma y} \quad (107)$$

Cuyos coeficientes son:

$$C_y = p_{Cy1} * \lambda_{Cy} \quad (108)$$

$$D_y = \mu_y * F_z * \zeta_2 \quad (109)$$

$$\mu_y = (p_{Dy1} + p_{Dy2}df_z)(1 + p_{py3}dp_i + p_{py4}dp_i^2)(1 - p_{Dy3} * \gamma_y^2)\lambda_{\mu_y} \quad (110)$$

$$E_y = (p_{Ey1} + p_{Ey2}df_z) * (1 - (p_{Ey3} + p_{Ey4}\gamma_y) * \text{sgn}(\alpha_y)) * \lambda_{E_y} \quad (111)$$

$$K_{y0} = p_{Ky1}(1 + p_{py1}dp_i)F_{z0}\sin[2\arctan\{\frac{F_z}{p_{Ky2}F'_{z0}(1 + p_{py2}dp_i)}\}] * \lambda_{Fz0} * \lambda_{Ky} \quad (112)$$

$$K_y = K_{y0} * (1 - p_{Ky3}|\gamma_y|) * \zeta_3 \quad (113)$$

$$B_y = K_y / (C_y D_y) \quad (114)$$

$$S_{Hy} = (p_{Hy1} + p_{Hy2}df_z) * \lambda_{Hy} + p_{Hy3}\gamma_y * \lambda_{Ky\gamma} * \zeta_0 + \zeta_4 - 1 \quad (115)$$

$$S_{Vy} = F_z * \{(p_{Vy1} + p_{Vy2}df_z) * \lambda_{Vy} + (p_{Vy3} + p_{Vy4}df_z)\gamma_y * \lambda_{Ky\gamma}\} * \lambda_{\mu_y} * \zeta_2 \quad (116)$$

$$S_{Vy\gamma} = F_z * \{(p_{Vy3} + p_{Vy4}df_z)\gamma_y * \lambda_{Ky\gamma}\} * \lambda_{\mu_y} * \zeta_2 \quad (117)$$

$$K_{y\gamma0} = (p_{Hy3} * K_{y0} + F_z(p_{Vy3} + p_{Vy4}df_z)) * \lambda_{Ky\gamma} \quad (118)$$

Fórmulas para el Momento de Alineación (Mz) con Deslizamiento Puro

$$M'_z = M_{z0}(\alpha, F_z, \gamma) \quad (119)$$

$$M_{z0} = -t * F_{y0} + M_{zr} \quad (120)$$

Con el *Pneumatic Trail*, t :

$$t(\alpha_t) = D_t \cos[C_t \arctan\{B_t \alpha_t - E_t (B_t \alpha_t - \arctan(B_t \alpha_t))\}] * \cos(\alpha) \quad (121)$$

$$\alpha_t = \alpha + S_{Ht} \quad (122)$$

Con el Momento Residual, M_{zr} :

$$M_{zr}(\alpha_r) = D_r \cos[C_r \arctan(B_r \alpha_r)] * \cos(\alpha) \quad (123)$$

$$\alpha_r = \alpha + S_{Hf} \quad (124)$$

$$S_{Hf} = S_{Hy} + S_{Vy}/K_y \quad (125)$$

$$\gamma_z = \gamma * \lambda_{\gamma z} \quad (126)$$

Y con los coeficientes:

$$B_t = (q_{Bz1} + q_{Bz2}df_z + q_{Bz3}df_z^2) * \{1 + q_{Bz4}\gamma_z + q_{Bz5}|\gamma_z|\} * \lambda_{Ky}/\lambda_{\mu z} \quad (127)$$

$$C_t = q_{Cz1} \quad (128)$$

$$D_t = F_z * (q_{Dz1} + q_{Dz2}df_z) * (1 + q_{Dz3}\gamma_z + q_{Dz4}\gamma_z^2) * (1 - q_{pz1}dp_i)(R_0/F'_{z0})\lambda_t\zeta_5 \quad (129)$$

$$E_t = (q_{Ez1} + q_{Ez2}df_z + q_{Ez3}df_z^2) * \left(1 + (q_{Ez4} + q_{Ez5}\gamma_z) * \left(\frac{2}{\pi}\right) * \arctan(B_t C_t \alpha_t)\right) \quad (130)$$

$$S_{Ht} = q_{Hz1} + q_{Hz2}df_z + (q_{Hz3} + q_{Hz4}df_z)\gamma_z \quad (131)$$

$$B_r = (q_{Bz9} * \lambda_{Ky}/\lambda_{\mu y} + q_{Bz10} * B_y * C_y)\zeta_6 \quad (132)$$

$$C_r = \zeta_7 \quad (133)$$

$$D_r = F_z * [(q_{Dz6} + q_{Dz7}df_z)\lambda_r + (q_{Dz8} + q_{Dz9}df_z)(1 + q_{pz2}dp_i)\gamma_z]R_0\lambda_{\mu y} + \zeta_8 - 1 \quad (134)$$

$$K_z = -t * K_y \quad (135)$$

Para las situaciones en las que el *turn-slip* puede ser despreciado y el ángulo de caída se mantiene pequeño, los factores de reducción ζ_i de las ecuaciones anteriores deben ser 1.

Fórmulas para la Fuerza Longitudinal (Fx) con Deslizamiento Combinado

$$F_x = F_{x0}G_{x\alpha}(\kappa, F_z, \alpha) \quad (136)$$

$$F_x = D_{x\alpha} \cos[C_{x\alpha} \arctan\{B_{x\alpha}\alpha_s - E_{x\alpha} (B_{x\alpha}\alpha_s - \arctan(B_{x\alpha}\alpha_s))\}] \quad (137)$$

$$\alpha_s = \alpha + S_{Hx\alpha} \quad (138)$$

Cuyos coeficientes son:

$$B_{x\alpha} = r_{Bx1} \cos[\arctan\{r_{Bx2}\kappa\}] \lambda_{x\alpha} \quad (139)$$

$$C_{x\alpha} = r_{Cx1} \quad (140)$$

$$D_{x\alpha} = F_{x0} / \cos[C_{x\alpha} \arctan\{B_{x\alpha} S_{Hx\alpha} - E_{x\alpha} (B_{x\alpha} S_{Hx\alpha} - \arctan(B_{x\alpha} S_{Hx\alpha}))\}] \quad (141)$$

$$E_{x\alpha} = r_{Ex1} + r_{Ex2} df_z \quad (142)$$

$$S_{Hx\alpha} = r_{Hx1} \quad (143)$$

Siendo la función de pesos:

$$G_{x\alpha} = \frac{\cos[C_{x\alpha} \arctan\{B_{x\alpha} \alpha_s - E_{x\alpha} (B_{x\alpha} \alpha_s - \arctan(B_{x\alpha} \alpha_s))\}]}{\cos[C_{x\alpha} \arctan\{B_{x\alpha} S_{Hx\alpha} - E_{x\alpha} (B_{x\alpha} S_{Hx\alpha} - \arctan(B_{x\alpha} S_{Hx\alpha}))\}]} \quad (144)$$

Fórmulas para la Fuerza Lateral (Fy) con Deslizamiento Combinado

$$F_y = F_{y0} G_{y\kappa}(\kappa, F_z, \alpha, \gamma) + S_{Vy\kappa} \quad (145)$$

$$F_y = D_{y\kappa} \cos[C_{y\kappa} \arctan\{B_{y\kappa} \kappa_s - E_{y\kappa} (B_{y\kappa} \kappa_s - \arctan(B_{y\kappa} \kappa_s))\}] + S_{Vy\kappa} \quad (146)$$

$$\kappa_s = \kappa + S_{Hy\kappa} \quad (147)$$

Cuyos coeficientes son:

$$B_{y\kappa} = r_{By1} \cos[\arctan\{r_{By2}(\alpha - r_{By3})\}] \lambda_{y\kappa} \quad (148)$$

$$C_{y\kappa} = r_{Cy1} \quad (149)$$

$$D_{y\kappa} = F_{y0} / \cos[C_{y\kappa} \arctan\{B_{y\kappa} S_{Hy\kappa} - E_{y\kappa} (B_{y\kappa} S_{Hy\kappa} - \arctan(B_{y\kappa} S_{Hy\kappa}))\}] \quad (150)$$

$$E_{y\kappa} = r_{Ey1} + r_{Ey2} df_z \quad (151)$$

$$S_{Hy\kappa} = r_{Hy1} + r_{Hy2} df_z \quad (152)$$

$$S_{Vy\kappa} = D_{Vy\kappa} \sin[r_{Vy5} \arctan(r_{Vy6}\kappa)] \lambda_{Vy\kappa} \quad (153)$$

$$D_{Vy\kappa} = \mu_y F_z * (r_{Vy1} + r_{Vy2} df_z + r_{Vy3} \gamma) * \cos[\arctan(r_{Vy4}\alpha)] \quad (154)$$

Siendo la función de pesos:

$$G_{x\alpha} = \frac{\cos[C_{y\kappa} \arctan\{B_{y\kappa} \kappa_s - E_{y\kappa} (B_{y\kappa} \kappa_s - \arctan(B_{y\kappa} \kappa_s))\}]}{\cos[C_{y\kappa} \arctan\{B_{y\kappa} S_{Hy\kappa} - E_{y\kappa} (B_{y\kappa} S_{Hy\kappa} - \arctan(B_{y\kappa} S_{Hy\kappa}))\}]} \quad (155)$$

Fórmulas para el Momento de Alineación (Mz) con Deslizamiento Combinado

$$M'_z = -t * F_y' + M_{zr} + s * F_x \quad (156)$$

$$t(\alpha_{t,eq}) = D_t \cos[C_t \arctan\{B_t \alpha_{t,eq} - E_t (B_t \alpha_{t,eq} - \arctan(B_t \alpha_{t,eq}))\}] * \cos(\alpha) \quad (157)$$

$$F_{y,\gamma=0}' = F_y - S_{Vy\kappa} \quad (158)$$

$$M_{zr} = M_{zr}(\alpha_{r,eq}) = D_r \cos[\arctan(B_r \alpha_{r,eq})] * \cos(\alpha) \quad (159)$$

Con los siguientes argumentos:

$$\alpha_{t,eq} = \arctan \sqrt{\tan^2 \alpha_t + \left(\frac{K_x}{K_y}\right)^2 \kappa^2 * \text{sgn}(\alpha_t)} \quad (160)$$

$$\alpha_{r,eq} = \arctan \sqrt{\tan^2 \alpha_r + \left(\frac{K_x}{K_y}\right)^2 \kappa^2 * \text{sgn}(\alpha_r)} \quad (161)$$

$$s = \{s_{sz1} + s_{sz2}(F_y/F_{z0}) + (s_{sz3} + s_{sz4} df_z)\gamma\} * R_0 * \lambda_s \quad (162)$$

Fórmula para el Momento de Vuelco (Mx) con Deslizamiento Combinado

$$\begin{aligned} M_x = & R_0 * F_z * \left\{ q_{sx3} * \frac{F_y}{F_{z0}'} \right. \\ & + q_{sx4} \cos[q_{sx5} \arctan\left(\left(\frac{F_z}{F_{z0}'}\right)^2\right)] \sin[q_{sx7}\gamma + q_{sx8} \arctan\left(q_{sx9} \frac{F_y}{F_{z0}'}\right)] \\ & \left. + [q_{sx10} \arctan\left(q_{sx11} \frac{F_z}{F_{z0}'}\right) - q_{sx2}(1 + q_{px1} dp_i)]\gamma + q_{sx1} \lambda_{VMx} \right\} \lambda_{Mx} \end{aligned} \quad (163)$$

Anexo III. Ejemplo de *TYDEX*

**HEADER

RELEASE	Release of TYDEX-Format	1.3
MEASID	Measurement ID	Combi__Vx_ 60_Fz_ 500_SA_2_CA_ 5
SUPPLIER	Data Supplier	UMA
DATE	Date	28-APR-2023
CLCKTIME	Clocktime	13:57

**CONSTANTS

IDENTITY	Identity		120/70 ZR17 M/C
NOMWIDTH	nominal section width of tire mm		120
ASPRATIO	nominal aspect ratio	%	70
RIMDIAME	nominal rim diameter	inch	17
RIMWIDTH	rim width	inch	3.5.5
INFLPRES	inflation pressure	bar	2.53
TYREMASS	Tyre mass	kg	9.3
MANUFACT	Manufacturer	-	Bridgestone
TRCKSURF	Surface of track	-	Steel
TRCKCOND	Condition of track surface	-	dry
TRAJVELW	Trajectory velocity	m/s	16.0
INCLANGL	nominal inclination angle	deg	-6
SLIPANGL	slip angle	deg	-2
FZW	nominal wheel load	N	639

**MEASURCHANNELS

Anexo III. Ejemplo de archivo *TYDEX*

SLIPANGL	slip angle	deg	1.0	0.0	0.0
LONGSLIP	longitudinal slip	-	1.0	0.0	0.0
INCLANGL	inclination angle	deg	1.0	0.0	0.0
FZW	vertical load	N	1.0	0.0	0.0
FX	longitudinal	N	1.0	0.0	0.0
FYW	lateral force	N	1.0	0.0	0.0
MZW	aligning torque	Nm	1.0	0.0	0.0

**MEASURDATA

-1.969e+00	7.913e-01	-5.286e+00	6.279e+02	5.010e+02	9.641e+00
-1.760e+01					
-1.966e+00	5.989e-01	-5.312e+00	6.268e+02	5.440e+02	1.425e+01
-1.972e+01					
-1.971e+00	4.481e-01	-5.316e+00	6.302e+02	5.453e+02	4.125e+01
-1.881e+01					
-1.968e+00	3.299e-01	-5.326e+00	6.432e+02	5.881e+02	5.273e+01
-1.729e+01					
-1.965e+00	2.371e-01	-5.371e+00	6.427e+02	5.765e+02	7.203e+01
-1.560e+01					
-1.967e+00	1.644e-01	-5.286e+00	6.399e+02	5.975e+02	9.826e+01
-1.331e+01					
-1.966e+00	1.073e-01	-5.350e+00	6.361e+02	5.729e+02	1.342e+02
-1.035e+01					
-1.959e+00	6.260e-02	-5.312e+00	6.433e+02	4.948e+02	1.739e+02
-8.721e+00					
-1.964e+00	2.751e-02	-5.331e+00	6.535e+02	2.921e+02	2.198e+02
-5.919e+00					
-1.971e+00	-0.000e+00	-5.346e+00	6.543e+02	-1.794e+02	2.387e+02
-4.802e+00					
-1.964e+00	-2.751e-02	-5.331e+00	6.535e+02	-2.921e+02	2.198e+02
-5.919e+00					

Anexo III. Ejemplo de archivo *TYDEX*

```
-1.959e+00  -6.260e-02  -5.312e+00  6.433e+02  -4.948e+02  1.739e+02
-8.721e+00

-1.966e+00  -1.073e-01  -5.350e+00  6.361e+02  -5.729e+02  1.342e+02
-1.035e+01

-1.967e+00  -1.644e-01  -5.286e+00  6.399e+02  -5.975e+02  9.826e+01
-1.331e+01

-1.965e+00  -2.371e-01  -5.371e+00  6.427e+02  -5.765e+02  7.203e+01
-1.560e+01

-1.968e+00  -3.299e-01  -5.326e+00  6.432e+02  -5.881e+02  5.273e+01
-1.729e+01

-1.971e+00  -4.481e-01  -5.316e+00  6.302e+02  -5.453e+02  4.125e+01
-1.881e+01

-1.966e+00  -5.989e-01  -5.312e+00  6.268e+02  -5.440e+02  1.425e+01
-1.972e+01

-1.969e+00  -7.913e-01  -5.286e+00  6.279e+02  -5.010e+02  9.641e+00
-1.760e+01
```

**MODELPARAMETERS

```
FZ_NOM   Tyre nominal vertical load   N       1500
NOMPRES  Tyre nominal infl. pressure   bar     2.53
RFREE    Unloaded radius                 m       0.29
```

**MODELEND

**END

Anexo IV. Códigos de MATLAB

Código para la importación de archivos TDMS en *TDMS to TYDEX*

```
function importTDMS(app)
%% Función para importar los TDMS del banco de neumáticos a la App
TDMSfolder = uigetdir(pwd,'Seleccione la carpeta de TDMS');

if TDMSfolder ~= 0
    % Añade carpeta al path y cambiamos el directorio para poder leer los
    TDMS
    addpath(TDMSfolder);
    cd(TDMSfolder)

    % Selecciona solo archivos .tdms
    TDMSfiles = dir(fullfile(TDMSfolder, '*.tdms'));
    nFiles = numel(TDMSfiles);

    % Se inicializan las tablas y la barra de progreso
    progreso = uiprogressdlg(app.UIFigure, 'Title', 'Cargando
    TDMS', 'ShowPercentage', 'on');
    app.names.tablefx = cell(nFiles,1);
    app.names.tablefy = cell(nFiles,1);
    app.names.tablecombi = cell(nFiles,1);

    % Carga todos los TDMS como tablas
    for i = 1:nFiles
        name = fullfile(TDMSfiles(i).name);

        [table,tableName,T] = TDMS2data(name);
        [table] = sti_cpi(table,1);
        table.length = length(table.kappa);
        [table] = sim(table,tableName);

        % Añade arrays vacíos a la tabla para poder coger luego los datos que
        queremos meter al TYDEX
        table.pFx = zeros(1);
        table.pkappa = zeros(1);
        table.pFy = zeros(1);
        table.pFz = zeros(1);
        table.pSA = zeros(1);
        table.pcamber = zeros(1);
        table.pMz = zeros(1);
        table.pMx = zeros(1);
        app.tables.(tableName) = table;

        % Divide las tablas en los diferentes apartados de la app
        if contains(tableName, 'Fx0')
            app.names.tablefx{i} = tableName;
        elseif contains(tableName, 'Fy0')
            app.names.tablefy{i} = tableName;
        else
            app.names.tablecombi{i} = tableName;
        end
    end
end
```

```
app.Temp.(tableName) = T;
app.colors.(tableName) = zeros(1);

% Progresión de la barra de progreso
progreso.Value = i/nFiles;
end

% Borra huecos vacios de los arrays de nombres
app.names.tablefx(cellfun('isempty',app.names.tablefx)) = [];
app.names.tablefy(cellfun('isempty',app.names.tablefy)) = [];
app.names.tablecombi(cellfun('isempty',app.names.tablecombi)) = [];
app.names.allnames =
cat(1,app.names.tablefx,app.names.tablefy,app.names.tablecombi);

% Se cierra la barra de progreso
close(progreso);
else
    uialert(app.UIFigure,'Carpeta no añadida', 'No has añadido ninguna
carpeta.');
```

```
end
%% Funciones locales
function [table] = sim(table,tableName)
    if contains(tableName,'Fx0') || contains(tableName,'Combi')
        table.kappa = [-flip(table.kappa),table.kappa];
        table.Fx = [-flip(table.Fx),table.Fx];
        table.SA = [flip(table.SA),table.SA];
        table.camber = [flip(table.camber),table.camber];
        table.Fy = [flip(table.Fy),table.Fy];
        table.Mx = [flip(table.Mx),table.Mx];
        table.Mz = [flip(table.Mz),table.Mz];
        table.Fz = [flip(table.Fz),table.Fz];
    end
end
end
```

Código para la selección de puntos en *TDMS to TYDEX*

```
if strcmp(type,'Fy0')
    % Selection points
    pSA1 = 0:-d_alpha:min(t.SA);
    pSA2 = 0:d_alpha:max(t.SA);
    t.pSA = [flip(pSA1(2:end)),pSA2];

    for i = 1:length(t.pSA)
        if i == length(t.pSA)
            filterSA = [mean([t.pSA(i-1),t.pSA(i)]) max(t.SA)];
        elseif i == 1
            filterSA = [min(t.SA) mean([t.pSA(i),t.pSA(i+1)])];
        else
            filterSA = [mean([t.pSA(i-
1),t.pSA(i)]),mean([t.pSA(i),t.pSA(i+1)])];
        end
        idx = find(t.SA>filterSA(1) & t.SA<filterSA(2));
        t.pFx(1,i) = mean(t.Fx(idx));
        t.pFy(1,i) = mean(t.Fy(idx));
        t.pFz(1,i) = mean(t.Fz(idx));
        t.pMx(1,i) = mean(t.Mx(idx));
    end
end
```

```
t.pMz(1,i) = mean(t.Mz(idx));
t.pkappa(1,i) = mean(t.kappa(idx));
t.pcamber(1,i) = mean(t.camber(idx));
end
else
t.pkappa = -linspace(0,0.07,floor(n_points/4)+1);
pkappa2 = -linspace(0.1,0.95,floor(n_points/4)+1);
t.pkappa = [t.pkappa(2:end) pkappa2];

for i = 1:length(t.pkappa)
    if i == length(t.pkappa)
        filterkappa = [mean([t.pkappa(i-1),t.pkappa(i)]) min(t.kappa)];
    elseif i == 1
        filterkappa = [max(t.kappa) mean([t.pkappa(i),t.pkappa(i+1)])];
    else
        filterkappa = [mean([t.pkappa(i-
1),t.pkappa(i)]),mean([t.pkappa(i),t.pkappa(i+1)])];
    end
    idx = find(t.kappa<filterkappa(1) & t.kappa>filterkappa(2));
    t.pFx(1,i) = mean(t.Fx(idx));
    t.pFy(1,i) = mean(t.Fy(idx));
    t.pFz(1,i) = mean(t.Fz(idx));
    t.pMx(1,i) = mean(t.Mx(idx));
    t.pMz(1,i) = mean(t.Mz(idx));
    t.pSA(1,i) = mean(t.SA(idx));
    t.pcamber(1,i) = mean(t.camber(idx));
    t.pkappa(1,i) = mean(t.kappa(idx));
end

% Reemplaza valores no válidos
t.pkappa = [0 t.pkappa];
for i = 2:length(t.pkappa)-1
    if t.pkappa(i) > t.pkappa(i-1)
        t.pkappa(i) = mean([t.pkappa(i-1) t.pkappa(i+1)]);
    end
end
t.pkappa = t.pkappa(2:end);

% Simetría de los datos de frenada
t2pkappa = -flip(t.pkappa);
t2pFx = -flip(t.pFx);
t2pFy = flip(t.pFy);
t2pFz = flip(t.pFz);
t2pMx = flip(t.pMx);
t2pMz = flip(t.pMz);
t2pSA = flip(t.pSA);
t2pcamber = flip(t.pcamber);

zkappa = mean([t.pkappa(1),t2pkappa(end)]);
zFx = mean([t.pFx(1),t2pFx(end)]);
zFy = mean([t.pFy(1),t2pFy(end)]);
zFz = mean([t.pFz(1),t2pFz(end)]);
zMx = mean([t.pMx(1),t2pMx(end)]);
zMz = mean([t.pMz(1),t2pMz(end)]);
zSA = mean([t.pSA(1),t2pSA(end)]);
zcamber = mean([t.pcamber(1),t2pcamber(end)]);

t.pFx = [t2pFx zFx t.pFx];
```

```

t.pFy = [t2pFy zFy t.pFy];
t.pFz = [t2pFz zFz t.pFz];
t.pMx = [t2pMx zMx t.pMx];
t.pMz = [t2pMz zMz t.pMz];
t.pSA = [t2pSA zSA t.pSA];
t.pcamber = [t2pcamber zcamber t.pcamber];
t.pkappa = [t2pkappa zkappa t.pkappa];
end

```

Código del algoritmo genético empleado en *TYDEX to TIR*

```

function [bestmem,besterror,bestpop] =
GA_app(seed,NP,F,CR,MR,MutC,itermax,FX,FY,FZ,MX,MZ,KAPPA,ALPHA,CAMBER,tirePar
ams,id,opt_function,strategy,app)

```

```

%% Variables
% seed          = Array with the seed of the optimization
% NP            = Number of population members (min = 5)
% F            = DE constant [0 2]
% CR           = Crossover rate [0 1]
% MR           = Mutation rate [0 1]
% MutC         = Mutation constant
% itermax      = Max number of generations
% FX,FY,FZ,MX,MZ = Experimental data
% KAPPA,ALPHA,CAMBER = Experimental data
% tireStruct   = Struct with tire info for Simscape block
% id           = Selection of valid experimental data points
% opt_function = Name of the cost function
% opt_function = Possible
names:['errorFx0','errorFy0','errorFxC','errorFyC','errorMx','errorMz0','erro
rMzC']
%% Data and vars initialization

OptFunction = str2func(opt_function);

% Todo eso se tiene que hacer antes de llamar a la funcion para que la
% funcion sirva para todas las optimizaciones
% IMPORTANTE que el orden de los coef sea el mismo en todos lados

FX = FX(:,id);
FY = FY(:,id);
FZ = FZ(:,id);
MX = MX(:,id);
MZ = MZ(:,id);
KAPPA = KAPPA(:,id);
ALPHA = ALPHA(:,id);
CAMBER = CAMBER(:,id);

D = length(seed);
pop = zeros(NP,D);
popold = zeros(NP,D);
bestmem = zeros(1,D);
bestmemit = zeros(1,D);
poperror = zeros(1,NP);

%-----Población inicial-----

```

```

low = 0.8*seed;
high = 1.2*seed;

rng('shuffle', 'twister'); % Semilla rng (Mersenne Twister)
% Set random values to the params of each member
for i = 1:NP
    for j = 1:D
        pop(i,j) = low(j) + rand*(low(j)-high(j));
    end
end
% Main
% Evalua el primer miembro
params = pop(1,:);
[poperror(1)] =
OptFunction(tireParams,params,FX,FY,FZ,MX,MZ,KAPPA,ALPHA,CAMBER);
besterror = poperror(1);
ibest = 1;

% Evalua el resto de miembros de la 1 generación
for i = 2:NP
    params = pop(i,:);
    [poperror(i)] =
OptFunction(tireParams,params,FX,FY,FZ,MX,MZ,KAPPA,ALPHA,CAMBER);
    if poperror(i) < besterror
        besterror = poperror(i);
        ibest = i;
    end
end
bestmemit(1,:) = pop(ibest,:);
bestmem = bestmemit(1,:);
bestpop = bestmemit(1,:);

%-----DE Minimization-----

pm1 = zeros(NP,D);
pm2 = zeros(NP,D);
pm3 = zeros(NP,D);
pm4 = zeros(NP,D);
pm5 = zeros(NP,D);
bm = zeros(NP,D); % mejores miembros
ui = zeros(NP,D); % población intermedia mod
mui = zeros(NP,D); % población intermedia
mpo = zeros(NP,D); % población anterior
rot = (0:1:NP-1);
rt = zeros(NP);
a1 = zeros(NP);
a2 = zeros(NP);
a3 = zeros(NP);
a4 = zeros(NP);
a5 = zeros(NP);
ind = zeros(4);

iter = 1;
A = 1;
best_all = [];
progreso = uiprogressdlg(app.UIFigure,'Title','Ajustando
curva','Message','Error = ','ShowPercentage','on');
while ((iter < itermax))

```

```

progreso.Value = iter/itermax;
progreso.Message = sprintf('Iteración: %d\nError: %d',iter,besterror);
iter=iter+1;
popold = pop;           % guarda la población anterior

ind = randperm(4);

a1 = randperm(NP);      % mezcla las posiciones de los vectores
rt = rem(rot+ind(1),NP);
a2 = a1(rt+1);
rt = rem(rot+ind(2),NP);
a3 = a2(rt+1);
rt = rem(rot+ind(3),NP);
a4 = a3(rt+1);
rt = rem(rot+ind(4),NP);
a5 = a4(rt+1);

pm1 = popold(a1,:);    % población mezclada 1
pm2 = popold(a2,:);    % población mezclada 2
pm3 = popold(a3,:);    % población mezclada 3
pm4 = popold(a4,:);    % población mezclada 4
pm5 = popold(a5,:);    % población mezclada 5

bm = ones(NP,1)*bestmemit; % población llena del mejor miembro
anterior

mui = rand(NP,D) < CR; % todos los números random < CR are 1, 0 sino
mpo = mui < 0.5;       % inversa de mui
mut = rand(NP,D) < MR;
nmu = mut < 0.5;
dir = mut .* ((rand(NP,D) < 0.5)*2-1);

if (strategy == 1)      % DE/best/1
    ui = bm + F*(pm1 - pm2); % differential variation
    ui = popold.*mpo + ui.*mui; % binomial crossover
    ui = ui.*nmu + ((ui.*mut)+(dir*MutC)); % mutation
elseif (strategy == 2)
    Fw = (0.7 + iter .* (1 - 0.7) ./ itermax) * F;
    ui = popold + Fw .* (bm - popold) + F * (pm1 - pm2);
    ui = popold.*mpo + ui.*mui; % binomial crossover
elseif (strategy == 3)
    Fw = (0.7 + iter .* (1 - 0.7) ./ itermax) * F;
    m = round(1 * A);
    i = 1:NP;
    w = (log(m + 0.5) - log(i)) ./ (sum(log(m + 0.5) - log(i)));
    u_amean = sum(popold .* (w'),1);
    ui = popold + Fw .* (u_amean - popold) + F * (pm1 - pm2);
end

%-----Selecciona los vectores que entran en la nueva población-----
for i=1:NP

    params=ui(i,1:D);
    [error] =
OptFunction(tireParams,params,FX,FY,FZ,MX,MZ,KAPPA,ALPHA,CAMBER);

    if error < poperror(i) % Compara el error con el anterior
        pop(i,:) = ui(i,:);

```

```

    poperror(i) = error;

    if error < besterror    % Compara el error con el mejor
        besterror = error;
        bestmem = ui(i,:);
        bestpop = [bestpop;bestmem];
    end
end
end
disp(besterror);
best_all = [best_all besterror];
bestmemit = bestmem;    % guarda el mejor miembro para la siguiente
                        % iteración, necesario para algunas estrategias
end
close(progreso);
end

```

Código de la función de coste de Fx0 para PAC-MC de *TYDEX to TIR*

```

function [error] = errorFx0(tireParams,params,FX,~,FZ,~,~,KAPPA,~,CAMBER)

%% Info
% Ecuaciones obtenidas de ADAMS Help
% PAC MC Tire Model (Pacejka tire model)
% No se considera la diferencia de presiones

%% Main
FNOMIN = tireParams.VERTICAL.FNOMIN;
FNOMIN = str2double(FNOMIN);
dfz = (FZ - FNOMIN)/FNOMIN;
[ PCX1, ...
  PDX1, PDX2, PDX3, ...
  PEX1, PEX2, PEX3, PEX4, ...
  PKX1, PKX2, PKX3, ...
  QSY1, ...
  PVX1, PVX2 ...
] = convertArray(params);

%% Ecuaciones
Cx      = PCX1; % Cx > 0
Kx      = FZ .* (PKX1 + PKX2 .* dfz) .* exp(PKX3 .* dfz);
mu_x    = (PDX1 + PDX2 .* dfz) .* (1 - (PDX3 * CAMBER.^2)); % mu_x > 0
Dx      = mu_x .* FZ;
Bx      = Kx ./ (Cx .* Dx);
SVx     = FZ .* (PVX1 + PVX2 .* dfz);
SHx     = -(QSY1 .* FZ + SVx) ./ Kx;
KAPPA_x = KAPPA + SHx;
Ex      = (PEX1 + PEX2 .* dfz + PEX3 .* dfz.^2) .* (1 - (PEX4 .*
sign(KAPPA_x))); % Ex < 1

    FXmodel = Dx .* sin(Cx .* atan(Bx .* KAPPA_x - Ex .* (Bx .* KAPPA_x -
atan(Bx .* KAPPA_x)))) + SVx;

%% Error
if min(Cx(:)) < 0

```

```
        error = 1e15 .* (1 + abs(min(Cx)));
elseif min(mu_x(:)) < 0
    error = 1e15 .* (1 + abs(min(mu_x)));
elseif max(Ex(:)) > 1
    error = 1e15 .* max(Ex(:));
else
    error = vecnorm(CAMBER(:).^2 .* (FXmodel(:)-FX(:)) ./ FZ(:)) ./
length(KAPPA(1,:));
end
end
```

Anexo V. Ejemplo de TIR

[MDI_HEADER]

FILE_TYPE = 'tir'

FILE_VERSION = 3.0

FILE_FORMAT = 'ASCII'

! : TIRE_VERSION : MF61

! : COMMENT : Example tyre data file with Pacejka coefficients

! : COMMENT : 225/50R17

\$-----units

[UNITS]

LENGTH = 'meter'

FORCE = 'Newton'

ANGLE = 'radians'

MASS = 'kg'

TIME = 'second'

\$-----model

[MODEL]

FITTYP = 61

USE_MODE = 14 \$Tyre use switch (IUSED)

VXLOW = 1

LONGVL = 16.7 \$Measurement speed

TYRESIDE = 'Left' \$Mounted side of tyre at
vehicle/test bench

\$-----dimensions

[DIMENSION]

UNLOADED_RADIUS = 0.3135 \$Free tyre radius

Anexo V. Ejemplo de archivo TIR

WIDTH = 0.205 \$Nominal section width of
the tyre
ASPECT_RATIO = 0.60 \$Nominal aspect ratio
RIM_RADIUS = 0.1905 \$Nominal rim radius
RIM_WIDTH = 0.195 \$Rim width

\$-----operating conditions

[OPERATING_CONDITIONS]

INFLPRES = 200000 \$Tyre inflation pressure
NOMPRES = 200000 \$Nominal inflation
pressure used in MF equations

\$-----inertia

[INERTIA]

MASS = 9.3 \$Tyre Mass
IXX = 0.4 \$Tyre diametral moment of inertia
IYY = 0.8 \$Tyre polar moment of inertia
BELT_MASS = 7.247 \$Belt mass
BELT_IXX = 0.35 \$Belt diametral moment of inertia
BELT_IYY = 0.55 \$Belt polar moment of inertia
GRAVITY = -9.81 \$Gravity acting on belt in Z
direction

\$-----parameter

[VERTICAL]

FNOMIN = 4000 \$Nominal wheel load
VERTICAL_STIFFNESS = 209651 \$Tyre vertical stiffness
VERTICAL_DAMPING = 50 \$Tyre vertical damping
BREFF = 8.386 \$Low load stiffness e.r.r.
DREFF = 0.25826 \$Peak value of e.r.r.
FREFF = 0.07394 \$High load stiffness
e.r.r.

BOTTOM_OFFST = 0.01 \$Distance to rim when
bottoming starts to occur

BOTTOM_STIFF = 3.0e+06 \$Vertical stiffness of
bottomed tyre

\$-----inflation_pressure_range

[INFLATION_PRESSURE_RANGE]

PRESMIN = 170000 \$Minimum allowed inflation
pressure

PRESMAX = 230000 \$Maximum allowed inflation
pressure

\$-----long_slip_range

[LONG_SLIP_RANGE]

KPUMIN = -1 \$Minimum valid wheel slip

KPUMAX = 1 \$Maximum valid wheel slip

\$-----slip_angle_range

[SLIP_ANGLE_RANGE]

ALPMIN = -0.5 \$Minimum valid slip angle

ALPMAX = 0.5 \$Maximum valid slip angle

\$-----inclination_slip_range

[INCLINATION_ANGLE_RANGE]

CAMMIN = -0.2 \$Minimum valid camber
angle

CAMMAX = 0.2 \$Maximum valid camber
angle

\$-----vertical_force_range

[VERTICAL_FORCE_RANGE]

FZMIN = 100 \$Minimum allowed wheel
load

FZMAX = 10000.0 \$Maximum allowed wheel
load

\$-----scaling

[SCALING_COEFFICIENTS]

LFZO	= 1	\$Scale factor of nominal (rated) load
LCX	= 1	\$Scale factor of Fx shape factor
LMUX	= 1	\$Scale factor of Fx peak friction coefficient
LEX	= 1	\$Scale factor of Fx curvature factor
LKX	= 1	\$Scale factor of Fx slip stiffness
LHX	= 1	\$Scale factor of Fx horizontal shift
LVX	= 1	\$Scale factor of Fx vertical shift
LXAL	= 1	\$Scale factor of Fx vertical shift
LGAX	= 1	\$Scale factor of camber for Fx
LCY	= 1	\$Scale factor of Fy shape factor
LMUY	= 1	\$Scale factor of Fy peak friction coefficient
LEY	= 1	\$Scale factor of Fy curvature factor
LKY	= 1	\$Scale factor of Fy cornering stiffness
LKYC	= 1	\$Scale factor of camber stiffness
LKZC	= 1	\$Scale factor of camber moment stiffness
LHY	= 1	\$Scale factor of Fy horizontal shift

LVY	= 1	\$Scale factor of Fy
vertical shift		
LGAY	= 1	\$Scale factor of camber
for Fy		
LTR	= 1	\$Scale factor of peak of
pneumatic trail		
LRES	= 1	\$Scale factor for offset
of residual torque		
LGAZ	= 1	\$Scale factor of camber
for Mz		
LYKA	= 1	\$Scale factor of alpha
influence on Fx		
LVIKA	= 1	\$Scale factor of kappa
induced Fy		
LS	= 1	\$Scale factor of moment
arm of Fx		
LSGKP	= 1	\$Scale factor of
relaxation length of Fx		
LSGAL	= 1	\$Scale factor of
relaxation length of Fy		
LGYR	= 1	\$Scale factor of
gyroscopic torque		
LMX	= 1	\$Scale factor of
overturning couple		
LVMX	= 1	\$Scale factor of Mx
vertical shift		
LMY	= 1	\$Scale factor of rolling
resistance torque		
LMP	= 1	\$Scale factor of parking
moment		
\$-----LONGITUDINAL_FORCE		
[LONGITUDINAL_COEFFICIENTS]		

Anexo V. Ejemplo de archivo TIR

PCX1	= 1.579	\$Shape factor Cfx for longitudinal force
PDX1	= 1.0422	\$Longitudinal friction Mux at Fznom
PDX2	= -0.08285	\$Variation of friction Mux with load
PDX3	= 0	\$Variation of friction Mux with camber
PEX1	= 0.11113	\$Longitudinal curvature Efx at Fznom
PEX2	= 0.3143	\$Variation of curvature Efx with load
PEX3	= -0.0	\$Variation of curvature Efx with load squared
PEX4	= 0.001719	\$Factor in curvature Efx while driving
PKX1	= 21.687	\$Longitudinal slip stiffness Kfx/Fz at Fznom
PKX2	= 13.728	\$Variation of slip stiffness Kfx/Fz with load
PKX3	= -0.4098	\$Exponent in slip stiffness Kfx/Fz with load
PHX1	= 2.1615e-04	\$Horizontal shift Shx at Fznom
PHX2	= 0.0011598	\$Variation of shift Shx with load
PVX1	= 2.20283e-5	\$Vertical shift Svz/Fz at Fznom
PVX2	= 1.0568e-4	\$Variation of shift Svz/Fz with load
RBX1	= 13.046	\$Slope factor for combined slip Fx reduction

Anexo V. Ejemplo de archivo TIR

RBX2	= 9.718	\$Variation of slope Fx reduction with kappa
RBX3	= 0	\$Influence of camber on stiffness for Fx combined
RCX1	= 0.9995	\$Shape factor for combined slip Fx reduction
REX1	= -0.4403	\$Curvature factor of combined Fx
REX2	= -0.4663	\$Curvature factor of combined Fx with load
RHX1	= -9.968e-5	\$Shift factor for combined slip Fx reduction
PPX1	= -0.3485	\$Linear pressure effect on slip stiffness
PPX2	= 0.37824	\$Quadratic pressure effect on slip stiffness
PPX3	= -0.09603	\$Linear pressure effect on longitudinal friction
PPX4	= 0.06518	\$Quadratic pressure effect on longitudinal friction
PTX1	= 1.98	\$Relaxation length SigKap0/Fz at Fznom
PTX2	= 0.0003	\$Variation of SigKap0/Fz with load
PTX3	= -0.31	\$Variation of SigKap0/Fz with exponent of load
\$-----LATERAL_FORCE		
[LATERAL_COEFFICIENTS]		
PCY1	= 1.337	\$Shape factor Cfy for lateral forces
PDY1	= 0.8785	\$Lateral friction Muy
PDY2	= -0.06452	\$Variation of friction Muy with load

Anexo V. Ejemplo de archivo TIR

PDY3 with squared camber	= 0	\$Variation of friction μ_{xy}
PEY1 Fznom	= -0.8057	\$Lateral curvature E_{fy} at
PEY2 with load	= -0.6046	\$Variation of curvature E_{fy}
PEY3 dependency of curvature E_{fy}	= 0.09854	\$Zero order camber
PEY4 with camber	= -6.697	\$Variation of curvature E_{fy}
PEY5	= 0	\$Camber curvature E_{fc}
PKY1 Kfy/Fznom	= -15.324	\$Maximum value of stiffness
PKY2 maximum value	= 1.715	\$Load at which Kfy reaches
PKY3 with camber	= 0.3695	\$Variation of Kfy/Fznom
PKY4 with camber squared	= 2.0005	\$Peak stiffness variation
PKY5 dependency with camber	= 0	\$Lateral stiffness
PKY6	= -0.8987	\$Camber stiffness factor
PKY7 stiffness factor	= -0.23303	\$Load dependency of camber
PHY1 Fznom	= -0.001806	\$Horizontal shift S_{hy} at
PHY2 with load	= 0.00352	\$Variation of shift S_{hy}
PVY1 at Fznom	= -0.00661	\$Vertical shift in S_{vy}/F_z
PVY2 with load	= 0.03592	\$Variation of shift S_{vy}/F_z

PVY3 with camber	= -0.162	\$Variation of shift Svy/Fz
PVY4 with camber and load	= -0.4864	\$Variation of shift Svy/Fz
RBV1 Fy reduction	= 10.622	\$Slope factor for combined
RBV2 reduction with alpha	= 7.82	\$Variation of slope Fy
RBV3 slope Fy reduction	= 0.002037	\$Shift term for alpha in
RBV4 stiffness of Fy combined	= 0	\$Influence of camber on
RCV1 Fy reduction	= 1.0587	\$Shape factor for combined
REY1 combined Fy	= 0.3148	\$Curvature factor of
REY2 combined Fy with load	= 0.004867	\$Curvature factor of
RHY1 Fy reduction	= 0.009472	\$Shift factor for combined
RHY2 Fy reduction with load	= 0.009754	\$Shift factor for combined
RVY1 Svyk/Muy*Fz at Fznom	= 0.05187	\$Kappa induced side force
RVY2 with load	= 4.853e-4	\$Variation of Svyk/Muy*Fz
RVY3 with camber	= 0	\$Variation of Svyk/Muy*Fz
RVY4 with alpha	= 94.63	\$Variation of Svyk/Muy*Fz
RVY5 with kappa	= 1.8914	\$Variation of Svyk/Muy*Fz

Anexo V. Ejemplo de archivo TIR

RVY6	= 23.8	\$Variation of Svyk/Muy*Fz with atan (kappa)
PPY1	= -0.6255	\$Pressure effect on cornering stiffness magnitude
PPY2	= -0.06523	\$Pressure effect on location of cornering stiffness peak
PPY3	= -0.16666	\$Linear pressure effect on lateral friction
PPY4	= -0.2811	\$Quadratic pressure effect on lateral friction
PPY5	= 0	\$Influence of inflation pressure on camber stiffness
PTY1	= 1.8	\$Peak value of relaxation length SigAlp0/R0
PTY2	= 1.8	\$Value of Fz/Fznom where SigAlp0 is extreme
\$-----OVERTURNING_MOMENT		
[OVERTURNING_COEFFICIENTS]		
QSX1	= -0.007764	\$Lateral force induced overturning moment
QSX2	= 1.1915	\$Camber induced overturning couple
QSX3	= 0.013948	\$Fy induced overturning couple
QSX4	= 4.912	\$Mixed load, lateral force, and camber on Mx
QSX5	= 1.02	\$Load effect on Mx with lateral force and camber
QSX6	= 22.83	\$B-factor of load with Mx
QSX7	= 0.7104	\$Camber with load on Mx
QSX8	= -0.023393	\$Lateral force with load on Mx

Anexo V. Ejemplo de archivo TIR

Qsx9	= 0.6581	\$B-factor of lateral force with load on Mx
Qsx10	= 0.2824	\$Vertical force with camber on Mx
Qsx11	= 5.349	\$B-factor of vertical force with camber on Mx
Qsx12	= 0	\$Camber squared induced overturning moment
Qsx13	= 0	\$Lateral force induced overturning moment
Qsx14	= 0	\$Lateral force induced overturning moment with camber
PPMX1	= 0	\$Influence of inflation pressure on overturning moment

\$-----ROLLING_COEFFICIENTS

[ROLLING_COEFFICIENTS]

QSY1	= 0.00702	\$Rolling resistance torque coefficient
QSY2	= 0	\$Rolling resistance torque depending on Fx
QSY3	= 0.001515	\$Rolling resistance torque depending on speed
QSY4	= 8.514e-5	\$Rolling resistance torque depending on speed ^4
QSY5	= 0	\$Rolling resistance torque depending on camber squared
QSY6	= 0	\$Rolling resistance torque depending on load and camber squared
QSY7	= 0.9008	\$Rolling resistance torque coefficient load dependency
QSY8	= -0.4089	\$Rolling resistance torque coefficient pressure dependency

\$-----ALIGNING_TORQUE

[ALIGNING_COEFFICIENTS]

QBZ1	= 12.035	\$Trail slope factor for trail Bpt at Fznom
QBZ2	= -1.33	\$Variation of slope Bpt with load
QBZ3	= 0	\$Variation of slope Bpt with load squared
QBZ4	= 0.176	\$Variation of slope Bpt with camber
QBZ5	= -0.14853	\$Variation of slope Bpt with absolute camber
QBZ9	= 34.5	\$Slope factor Br of residual torque Mzr
QBZ10	= 0	\$Slope factor Br of residual torque Mzr
QCZ1	= 1.2923	\$Shape factor Cpt for pneumatic trail
QDZ1	= 0.09068	\$Peak trail Dpt" = Dpt*(Fz/Fznom*R0)
QDZ2	= -0.00565	\$Variation of peak Dpt with load
QDZ3	= 0.3778	\$Variation of peak Dpt with camber
QDZ4	= 0	\$Variation of peak Dpt with camber squared
QDZ6	= 0.0017015	\$Peak residual torque Dmr = Dmr/(Fz*R0)
QDZ7	= -0.002091	\$Variation of peak factor Dmr with load
QDZ8	= -0.1428	\$Variation of peak factor Dmr with camber
QDZ9	= 0.00915	\$Variation of peak factor Dmr with camber and load

Anexo V. Ejemplo de archivo TIR

QDZ10	= 0	\$Variation of peak factor
Dmr with camber squared		
QDZ11	= 0	\$Variation of Dmr with
camber squared and load		
QEZ1	= -1.7924	\$Trail curvature Ept at
Fznom		
QEZ2	= 0.8975	\$Variation of curvature Ept
with load		
QEZ3	= 0	\$Variation of curvature Ept
with load squared		
QEZ4	= 0.2895	\$Variation of curvature Ept
with sign of Alpha-t		
QEZ5	= -0.6786	\$Variation of Ept with
camber and sign Alpha-t		
QHZ1	= 0.0014333	\$Trail horizontal shift Sht
at Fznom		
QHZ2	= 0.0024087	\$Variation of shift Sht
with load		
QHZ3	= 0.24973	\$Variation of shift Sht
with camber		
QHZ4	= -0.21205	\$Variation of shift Sht
with camber and load		
SSZ1	= 0.00918	\$Nominal value of s/R0:
effect of Fx on Mz		
SSZ2	= 0.03869	\$Variation of distance s/R0
with Fy/Fznom		
SSZ3	= 0	\$Variation of distance s/R0
with camber		
SSZ4	= 0	\$Variation of distance s/R0
with load and camber		
PPZ1	= -0.4408	\$Linear pressure effect on
pneumatic trail		

PPZ2 = 0 \$Influence of inflation
pressure on residual aligning torque

QTZ1 = 0 \$Gyration torque constant

MBELT = 7.247 \$Belt mass of the wheel
\$-----loaded radius

[LOADED_RADIUS_COEFFICIENTS]

Q_RE0 = 0.9974 \$Ratio of free tyre radius
with nominal tyre radius

QV1 = 7.742e-4 \$Tyre radius growth
coefficient

QV2 = 0.04667 \$Tyre stiffness variation
coefficient with speed

QFCX = 0 \$Tyre stiffness interaction
with Fx

QFCY = 0 \$Tyre stiffness interaction
with Fy

QFCG = 7.742e-4 \$Tyre stiffness interaction
with camber squared

QFZ1 = 0 \$Linear stiffness
coefficient, if zero, VERTICAL_STIFFNESS is taken

QFZ2 = 15.4 \$Tyre vertical stiffness
coefficient (quadratic)

PFZ1 = 0.7098 \$Pressure effect on
vertical stiffness

