



**UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA**  
**DEPARTAMENTO INGENIERÍA MECÁNICA**



**Optimización de la suspensión de una motocicleta para adherencia al camino y confort en condiciones off-Road.**

POR

**Vicente Cruz Urra Albornoz**

Memoria de Título presentada a la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Concepción para optar al título profesional de Ingeniero Civil Mecánico

Profesor Guía:  
Felipe Vásquez

enero 2023  
Concepción (Chile)

© 2023 Vicente Cruz Urra Albornoz

© 2023 Vicente Cruz Urra Albornoz

Se autoriza la reproducción total o parcial, con fines académicos, por cualquier medio o procedimiento, incluyendo la cita bibliográfica del documento.



Quiero partir agradeciendo a mis queridos padres por ser un pilar fundamental en mi desarrollo personal, que me han enseñado la responsabilidad y el respeto a las personas, los amo. Agradezco a mis profesores que en estos 6 años me han enseñado el pensamiento crítico, la ética profesional, el cuidado del medioambiente y por sobre todo, el conocimiento que me han otorgado en este arduo periodo. Quiero agradecer al profesor Felipe por ayudarme en el entendimiento del comportamiento de la motocicleta y la muy buena voluntad que ha tenido. Finalmente, agradezco a los amigos que he hecho a lo largo de los años, que me han ayudado a llevar este periodo mucho más ameno.

*Esta memoria está dedicada a mis seres queridos que me han apoyado en todos estos años de universidad.*

## Resumen

En la presente memoria de título se busca restaurar y modificar un código en Matlab que sea capaz de modelar la dinámica de la motocicleta en caminos off-road para diferentes situaciones de manejo, y así poder optimizar las diferentes variables que gobiernan las suspensiones de la motocicleta basados en la adherencia de las ruedas al camino y el confort del conductor. A través de la implementación de una optimización multiobjetivo.

En primer lugar, se hace una investigación sobre la dinámica de la motocicleta, así como el funcionamiento de sus suspensiones y las formas de regularlas; cómo afectan estas regulaciones de las suspensiones y las imperfecciones del camino, el desempeño de la motocicleta; y cómo es posible realizar la optimización a las suspensiones.

A continuación, se define el modelo dinámico donde se explica el tipo de motocicleta a utilizar y cuáles son sus características. Luego, se explica las diferentes situaciones a las que se someterá el modelo dinámico para ver cómo se desempeña la motocicleta, y así poder restaurar el código en Matlab, donde se explica los cambios efectuados en el Fastbike y la lógica que se seguirá para encontrar las variables óptimas de la suspensión.

Entonces, se realiza un análisis de sensibilidad para obtener un primer acercamiento de cómo se comporta la motocicleta a pequeñas modificaciones hechas en las suspensiones, donde se observa, por ejemplo: qué variables pueden afectar más este comportamiento. Luego, se realiza la optimización basada en un algoritmo genético que encuentra la Frontera de Pareto que, para una mejor visualización de datos, se hacen correlaciones de las variables de las suspensiones.

Finalmente, de la realización de este proyecto se obtiene un código en Matlab que puede optimizar las suspensiones de las motocicletas en caminos off-road, en diferentes situaciones de conducción y para diferentes desempeños de las motocicletas. Además, se consigue las correlaciones que tienen las regulaciones de la suspensión de las motocicletas y así poder por un lado, mejorar la seguridad y/o confort al momento de conducir y por otro, ahorrar en modificaciones en la motocicleta (tales como cambios completos de resortes o amortiguadores).

***Palabras Claves: Pareto Front, Fast-Bike, ISO 8608, suspension, Motorcycles.***

## Abstract

In the present Memoria de título, we seek to restore and modify a code in Matlab that is capable of modeling the dynamics of the motorcycle on off-road for different driving situations, and thus be able to optimize the different variables that govern the motorcycle's suspensions, based on the adherence of the wheels to the road and the comfort of the driver. Through the implementation of a multi-objective optimization.

In the first place, an investigation is made on the dynamics of the motorcycle, as well as the operation of its suspensions and the ways to regulate them; how suspension regulations and road blemishes affect motorcycle performance; and how it is possible to perform the optimization to the suspensions.

Next, the dynamic model is defined where the type of motorcycle to be used is explained and what its characteristics are. Then, the different situations to which the dynamic model will be subjected are explained to see how the motorcycle performs, and thus be able to restore the code in Matlab, where the changes made to the Fastbike are explained and the logic that will be followed to find the Optimal suspension variables.

Then, a sensitivity analysis is carried out to obtain a first approximation of how the motorcycle behaves to small modifications made to the suspensions, where it is observed, for example: which variables can affect this behavior the most.

Then, the optimization is carried out based on a genetic algorithm that finds the Pareto Frontier that, for a better visualization of the data, correlations of the suspension variables are made.

Finally, from the realization of this project, a Matlab code is obtained that can optimize motorcycle suspensions on off-road, in different driving situations and for different motorcycle performances. In addition, the correlations that the motorcycle suspension regulations have are achieved and thus, on the one hand, improve safety and/or comfort when driving and, on the other, save on modifications to the motorcycle (such as complete changes of springs or dampers).

***Keywords: Pareto Front, Fast-Bike, ISO 8608, suspension, Motorcycles.***

Tabla de Contenidos	iv
Lista de Tablas	v
Lista de Figuras	vii
Glosario	viii
<b>1. Introducción</b>	<b>1</b>
1.1. Contexto . . . . .	1
1.2. Objetivos . . . . .	1
1.2.1. Objetivo general . . . . .	1
1.2.2. Objetivos generales . . . . .	2
1.3. Metodología . . . . .	2
1.4. Hipótesis . . . . .	3
<b>2. Marco teórico</b>	<b>4</b>
2.1. Situaciones de manejo off-road. . . . .	4
2.2. Suspensión de las motocicletas. . . . .	5
2.2.1. Suspensión delantera y trasera. . . . .	5
2.2.2. Regulación del resorte, SAG. . . . .	6
2.2.3. Regulación del amortiguador. . . . .	7
2.3. Desempeño de las motocicletas. . . . .	9
2.4. Perfil de la superficie del camino. . . . .	11
2.5. Modelos de dinámica de la motocicleta. . . . .	13
2.5.1. Quarter car model. . . . .	13
2.5.2. FastBike. . . . .	14
2.6. Modelos de optimización. . . . .	14
2.6.1. Optimización lineal. . . . .	14
2.6.2. Optimización multiobjetivo. . . . .	16
2.6.2.1. Objetivos de simulación. . . . .	16
2.6.2.2. Algoritmo genético . . . . .	16
2.7. Conclusiones. . . . .	17
<b>3. Definición del modelo dinámico a analizar</b>	<b>18</b>
3.1. Motocicleta a optimizar. . . . .	18
3.2. Selección de parámetros a optimizar. . . . .	19
3.3. Definición situaciones de manejo. . . . .	20
3.3.1. Primera situación: frenado. . . . .	21
3.3.2. Segunda situación: giro y aceleración. . . . .	21
3.4. Código en Matlab . . . . .	23
3.5. Conclusiones. . . . .	24
<b>4. Análisis de sensibilidad</b>	<b>26</b>

4.1. Formulación análisis de sensibilidad. . . . .	26
4.2. Resultados. . . . .	26
4.2.1. Giro. . . . .	26
4.2.2. Frenado. . . . .	29
4.3. Conclusiones. . . . .	31
<b>5. Resultados</b>	<b>32</b>
5.1. Formulación de la optimización. . . . .	32
5.2. Resultados de la optimización. . . . .	32
5.3. Análisis de las correlaciones. . . . .	34
5.4. Conclusiones. . . . .	35
<b>6. Conclusiones</b>	<b>36</b>
6.1. Trabajos futuros. . . . .	37
<b>A. Anexo A: Cambios en el Fastbike para implementar caminos off-road.</b>	<b>39</b>
<b>B. Anexo B: Cambios en el Fastbike para implementar las suspensión delantera</b>	<b>40</b>
<b>C. Anexo C: Cambios en el Fastbike para implementar las suspensión trasera</b>	<b>41</b>
<b>D. Anexo D: Código Matlab del modelo de la motocicleta.</b>	<b>42</b>
<b>E. Anexo E: Código en Matlab de la función gamultiobj</b>	<b>47</b>



2.1.1.Motocicleta frenando. [1] . . . . .	5
2.1.2.Motocicleta en Camino off-Road. [2] . . . . .	5
2.2.1.Horquilla KTM 450 sx-f.[3] . . . . .	6
2.2.2.Suspensión trasera KTM 450 sx-f.[3] . . . . .	6
2.2.3.Regulación precarga de la suspensión delantera.[3] . . . . .	7
2.2.4.Regulación de la precarga de la suspensión trasera.[3] . . . . .	8
2.2.5.Regulación (a) compresión (b) Extensión.[3] . . . . .	9
2.2.6.Regulación (a) baja velocidad (b) alta velocidad.[3] . . . . .	9
2.2.7.Regulación extensión amortiguador trasero.[3] . . . . .	9
2.3.1.Cambio en el extensión del amortiguador.[4] . . . . .	10
2.4.1.Clasificación de caminos. [5] . . . . .	12
2.4.2.Perfil de un camino tipo c. . . . .	12
2.5.1.Ubicación de las masas en el QCM . . . . .	13
2.5.2.Grados de libertad en el Fastbike. [6] . . . . .	14
3.1.1.Motocicleta KTM 450 SX-F [7] . . . . .	18
3.2.1.Cambio de la constante elástica de los resortes delanteros y traseros . . . . .	20
3.2.2.Regulación de la extensión y compresión delantero . . . . .	20
3.2.3.Regulación de la extensión y compresión trasero . . . . .	21
3.3.1.Cambio de velocidad de la motocicleta en frenado. . . . .	22
3.3.2.Comportamiento de las suspensiones al frenado. . . . .	22
3.3.3.Comportamiento de la motocicleta en el giro. . . . .	23
3.3.4.Comportamiento de las suspensiones en la aceleración. . . . .	23
3.4.1.Diagrama de flujo de la optimización. . . . .	24
4.2.1.Análisis de sensibilidad en el giro para la adherencia. . . . .	27
4.2.2.Análisis de sensibilidad en el giro para el confort. . . . .	27
4.2.3.Aceleración del chasis en el giro . . . . .	28
4.2.4.Fuerzas de contacto de la rueda delantera en giro. . . . .	28
4.2.5.Fuerza de contacto de la rueda trasera en giro. . . . .	28
4.2.6.Análisis de sensibilidad en frenado para la adherencia. . . . .	29
4.2.7.Análisis de sensibilidad en frenado para el Confort. . . . .	30
4.2.8.Aceleración del chasis en frenado. . . . .	30
4.2.9.Fuerzas de contacto de la rueda delantera en frenado. . . . .	30
4.2.10.Fuerzas de contacto de la rueda delantera en frenado. . . . .	31
5.2.1.Frontera de Pareto de la adherencia versus confort para el frenado. . . . .	33
5.2.2.Frontera de Pareto de la adherencia versus confort para el giro. . . . .	33
5.3.1.Matriz de correlaciones. . . . .	35
A.0.1subsistema en simulink para implementar caminos off-road en el Fastbike . . . . .	39
B.0.1subsistema en simulink para implementar la suspensión delantera en el Fastbike	40
C.0.1subsistema en simulink para implementar las suspensión trasera Fastbike . . . . .	41

D.0.1Código Matlab variables de la suspensiones parte 1 . . . . .	42
D.0.2Código Matlab variables de la suspensiones parte 2 . . . . .	43
D.0.3Código Matlab variables de la suspensiones parte 3 . . . . .	44
D.0.4Código Matlab variables de la suspensiones parte 4 . . . . .	45
D.0.5Código Matlab variables de la suspensiones parte 5 . . . . .	46
E.0.1Función gamultiobj parte 1 . . . . .	47
E.0.2Función gamultiobj parte 2 . . . . .	48
E.0.3Función gamultiobj parte 3 . . . . .	49

2.4.1.Valores para $G_d(n_o)$ . . . . .	12
3.1.1.Parámetros de la motocicleta . . . . .	19
3.2.1.Variables de la suspensión. . . . .	21
5.2.1.Configuraciones óptimas de la suspensiones . . . . .	34

## Glosario

a	: aceleración
b	: Distancia del eje trasero al centro de masa
c	: Amortiguación de la suspensión
comp	: compresión
d	: Amortiguador
ext	: extensión
I	: Inercia
J	: Objetivo
k	: Rigidez de la suspensión
m	: Masa
N	: Fuerza
n	: Frecuencia espacial
l	: Brazo
ori	: Original
p	: Precarga
QCM	: Quarter car model
r	: Desplazamiento del perfil del camino
rms	: Valor Medio Cuadrático
s	: Resorte
w	: Distancia entre ejes
z	: Desplazamiento de la masa

## Subíndices

c	: masa suspendida
conf	: confort
f	: delantero
opt	: Óptimo
o	: inicial
r	: trasero
road	: adherencia
s	: suspensión
t	: contacto
w	: masa no suspendida

## Letras griegas

$\sigma$	: Ángulo
$\varphi$	: Ángulo de fase
$\pi$	: Pi

# Capítulo 1

## Introducción

### 1.1 Contexto

Las suspensiones en las motocicletas se originaron en las carreras de motocross [8]. Las primeras carreras surgen a inicios del siglo XX en el Reino Unido originalmente con el nombre de *scramble*. Una de estas competiciones es llamada *Scottish Six Days Trial*, también conocida por las siglas SSDT. Al pasar los años, las carreras se hicieron conocidas como motocross, de la abreviación de las palabras: moto de motocicleta y cross de *cross country* que en español significa a campo traviesa. Con el tiempo, el aumento de popularidad de estas carreras de motocross y una gran competencia entre los equipos permitió las mejoras de las motocicletas que sufrían mucho de las condiciones del terreno de las carreras. Esto condujo a la implementación de las suspensiones delanteras en los años 30 y de la Horquilla y suspensión trasera en los años 50, implementados incluso antes que las mayorías de moto de calle [9].

Los requerimientos importantes para las suspensiones de la motocicleta están basadas en el mejoramiento del confort (aceleraciones que siente el conductor) y la adherencia al camino, no obstante, estos requerimientos están en conflicto como lo demuestra Thomson (1969) [10]. En su trabajo concluye que el valor de la amortiguación para el confort es considerablemente menor que para la adherencia. Por otro lado, el resorte para el confort óptimo es cero, el cual no es posible debido a que se debe sostener por lo menos el peso de la motocicleta, mientras que para la adherencia es un valor conocido [11]. A mayor adherencia mayor seguridad en el camino debido a que las ruedas no se despegan, obteniendo mejor maniobrabilidad.

Tener una buena relación entre confort y la adherencia son críticos en caminos off-road, donde el conductor puede manejar distancias muy largas o en terrenos muy escarpados que dificultan la estabilidad. Es por esto, que en estos caminos es de vital importancia modificar las suspensiones que ayuden a tener un agradable manejo con alta seguridad de conducción.

Para tener una aproximación de como modificar las suspensiones de las motocicletas. Se deben realizar simulaciones numéricas de la dinámica de las motocicletas. Vasquez (2020)[12], realiza esta simulación, pero solo en situaciones de conducción por separado, además el código contenía equivocaciones sobre cómo se tomaba en cuenta las fuerzas de contacto de las ruedas y no contaba con la precarga de los resortes. Este código se pierde, y solo se encuentra parte de este, por lo que para hacer las mejoras hay que restaurar un código que sea capaz de calcular las suspensiones óptimas y modificarlo para instaurar las mejoras.

### 1.2 Objetivos

#### 1.2.1 Objetivo general

Restaurar un código en Matlab que permita estudiar las configuraciones óptimas de las suspensiones de una motocicleta en base al confort y adherencia para diferentes situaciones de manejo, y analizar las correlaciones entre las variables optimizadas.

### 1.2.2 Objetivos generales

1. Comprender los aspectos más importantes en las bibliografías existentes de una motocicleta para el entendimiento y puesta en marcha de un código que optimice la suspensiones de una motocicleta en el software Fastbike.
2. Rehacer y modificar en el software Fastbike y Matlab el modelo dinámico de la motocicleta.
3. Realizar un análisis de sensibilidad y encontrar óptimos de las variables de la suspensión en caminos off-road
4. Analizar las correlaciones de las diferentes variables optimizadas de la suspensión en las situaciones de frenado y giro.

### 1.3 Metodología

Se inicia con la investigación bibliográfica del diseño de una motocicleta para lograr entender su comportamiento dinámico, al igual que tener una vista general de sus partes, variables y constantes mecánicas. Luego se hace una búsqueda específica del funcionamiento y características de las suspensiones en revistas científicas y páginas de almacenamiento de investigaciones (*Science direct*, *Google scholar*, entre otros). En paralelo se inicia con el entendimiento del funcionamiento del software FastBike, el cual se logra en base al conocimiento adquirido de la dinámica de la motocicleta, consejos de usuarios del software y del conocimiento anterior del lenguaje de programación Matlab.

A continuación, se verifica las modificaciones del Fastbike para la simulación en condiciones off-road, es decir, frenado y aceleración de la motocicleta en un terreno recto y su comportamiento dinámico en un terreno con irregularidades. Luego, se verifica también las modificaciones del código en Matlab para la búsqueda de la optimización de las variables de la suspensión basado en confort o adherencia. Estas se encuentran mediante el promedio de las fuerzas generadas en el chasis para el confort y el promedio de las fuerzas de contacto entre las ruedas y el piso para la adherencia. Se inicia con una versión simplificada de la suspensión delantera y trasera para luego ir complejizando el modelo, primero tomando en cuenta rigideces, luego la amortiguación, para finalmente agregar las precargas y así obtener las diferentes variables que gobiernan a la suspensión.

Luego, se realiza un análisis de sensibilidad al modelo para obtener una visión de cómo se comportan las variables de la suspensión a pequeños cambios y así observar si existen mejoras o no en el confort y adherencia.

Después se optimizan las variables aplicando un algoritmo genético que encuentre las soluciones eficientes para la situaciones de frenado y giro.

Finalmente, obtenidas las variables optimizadas se buscan las posibles correlaciones entre estas. Esto se logra en base a la medida estadística llamada rango de Spearman. En palabras simples, esta medida nos permite obtener el grado de correlación que existe entre dos variables, donde

en un rango entre  $(-1, 1)$ , si el valor de Spearman entre dos variables es cercano a cero existe una débil correlación y mientras más cercano a  $|1|$  existe una correlación más fuerte.

#### **1.4 Hipótesis**

Es posible mediante las herramientas de Matlab y Simulink, simular un entorno virtual similar al comportamiento dinámico que tendría una motocicleta en off road, para así poder encontrar las fuerzas de contacto de las ruedas y aceleraciones del chasis, que permitan optimizar el confort y adherencia, y encontrar correlaciones de las variables de la suspensión para situaciones de frenado y giro en conjunto.

## Capítulo 2

### Marco teórico

En este capítulo, se definen las diferentes situaciones a la que un conductor de motocicletas en camino off-road se ve enfrentado. Luego, se explica de manera general cómo son las suspensiones de estas motocicletas y sus respectivas regulaciones. Debido al cambio en las regulaciones de la motocicleta se producen variaciones en el desempeño de la misma, es por esto que se explican conceptos claves en este desempeño como lo son: la adherencia en el camino y el confort. Estos conceptos también se ven afectados por las imperfecciones en el camino, por lo que se explica la forma de generar caminos off-road.

Finalmente, se muestran los diferentes modelos dinámicos de la motocicletas, para poder generar modelos de optimización.

#### 2.1 Situaciones de manejo off-road.

Tanto el conductor como la motocicleta al momento de conducir, se ven enfrentados a diferentes situaciones de manejo. Las más generales son: frenar, acelerar y mantener su velocidad constante. Un poco más complejo y sobre todo para personas principiantes, es el giro a una velocidad relativamente alta, ya que es necesario realizar un rolido (o *roll*) para mantener el equilibrio. Ya para personas más experimentadas, se tienen situaciones como saltos, mantener el equilibrio en una rueda, entre otras.

En la práctica, estas situaciones de manejo se pueden dar por separado o combinados. Por ejemplo: frenar antes de entrar a una curva para después acelerar al salir, o ir a velocidad constante en caminos con ondulaciones muy grandes (llamados *whoops*) en donde la motocicleta realiza saltos continuamente y obliga al conductor a estar de pie para mantener el equilibrio.

Para la realización del proyecto, se escogen las situaciones de conducción más comunes al momento de conducir una motocicleta, las cuales son: el frenado en un camino recto y la aceleración en la salida de una curva.

En la Figura 2.1.1 se muestra una exageración del frenado en un camino off-Road, pero muestra muy bien cómo se despega la rueda trasera en esta situación (a una velocidad menor el despegue puede ser menor o no existir), esto puede traer problemas en la seguridad al momento de conducir en estos caminos. Si bien en la simulación no es tan exagerado como en la Figura 2.1.1, igual existe un pequeño despegue al momento frenar producido por las irregularidades del camino.

La segunda situación de manejo, el giro, combina la aceleración y el giro en una curva. La Figura 2.1.2 representa como el conductor hace un rolido en la motocicleta y acelera para mantener la posición en la curva. Es de vital importancia que se optimice en esta situación, ya que es fácil perder la estabilidad y caerse.





**Figura 2.1.1:** Motocicleta frenando. [1]



**Figura 2.1.2:** Motocicleta en Camino off-Road. [2]

## **2.2 Suspensión de las motocicletas.**

Las suspensiones están encargadas de sostener la motocicleta y mejorar su desempeño. En el siguiente subcapítulo se explica cómo son y las regulaciones que presentan.

### **2.2.1 Suspensión delantera y trasera.**

La suspensión delantera cuenta con dos botellas mostradas en la Figura 2.2.1. La botella izquierda es la que sostiene a la motocicleta con una combinación entre un resorte de acero y presión de aire, y a la derecha el amortiguador hidráulico modifica la velocidad a la que se

mueve el vástago en la botella. Estas también pueden ser simétricas, donde el amortiguador y resorte están en las dos botellas.



**Figura 2.2.1:** Horquilla KTM 450 sx-f.[3]

En la Figura 2.2.2 se muestra la suspensión trasera, la cual contiene un resorte de acero, y un amortiguador de nitrógeno a presión en la cámara adyacente.



**Figura 2.2.2:** Suspensión trasera KTM 450 sx-f.[3]

Las suspensiones de la motocicleta tienen componentes que modifican levemente su funcionamiento para adaptarse mejor al piloto y al terreno en particular. A continuación se muestran estas regulaciones.

### 2.2.2 Regulación del resorte, SAG.

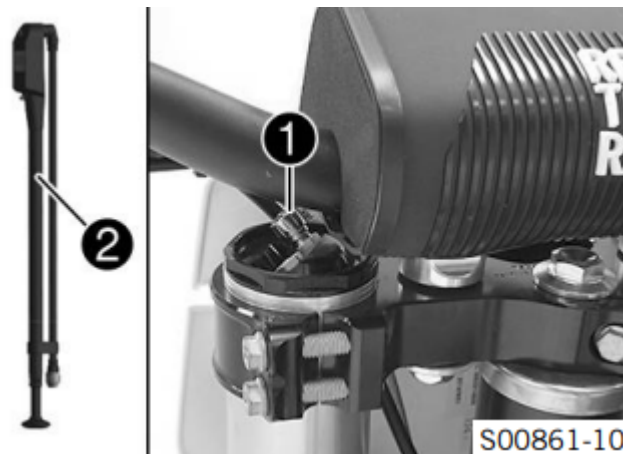
Para entender la regulación del resorte se debe introducir el concepto de SAG, del inglés hundimiento, este es el porcentaje de la carrera de la suspensión que se comprime estáticamente, es decir queda un espacio entre la carrera total y la actual. Esta compresión se debe al peso propio de la moto y al del conductor. El SAG nos permite estimar cuánto recorrido de las

ruedas tenemos para enfrentar los baches en el camino. La regulación de SAG se puede realizar en base a dos mecanismos: cambiando la constante elástica del resorte o aplicando precarga a la motocicleta.

**Cambio del resorte:** una forma de regular la suspensión es el cambio de la constante elástica del resorte, esto se logra por el cambio del resorte. Un resorte muy blando hace que la carrera de la suspensión se comprima más y un resorte más rígido hace que se comprima menos, afectando directamente al SAG de la motocicleta.

**Precarga:** la precarga comprime el resorte antes de cargarla con el peso de la moto y el conductor. Esta precarga provoca que la motocicleta necesite más fuerza para comprimirse, esto no se produce por un cambio en la constante elástica del resorte, sino que se genera una fuerza interna en el resorte la cual se tiene que superar para recién poder moverla. En resumen, la regulación de la precarga modifica el SAG sin tener que cambiar el resorte.

La regulación de la precarga del resorte de la suspensión se basa en el cambio de la presión interna de la botella izquierda para la suspensión delantera (mostrada en la Figura 2.2.3, donde 1 es la válvula y 2 la bomba de presión.) y para la suspensión trasera es en base al giro de un anillo de ajuste (Figura 2.2.4, donde 1 es la ubicación del tornillo de seguridad y 2 el anillo de ajuste).



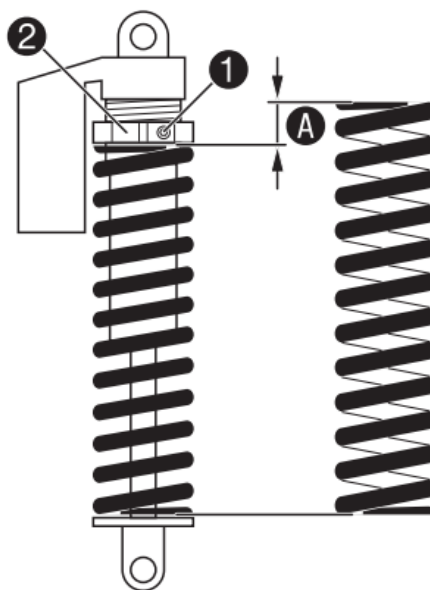
**Figura 2.2.3:** Regulación precarga de la suspensión delantera.[3]

La regulación del SAG permite que la rueda sea capaz de seguir las diferentes alturas en el camino por ejemplo en un bache. Un valor alto o bajo de SAG puede provocar que suspensión choque con la parte de arriba o abajo de la carrera, provocando daños en sus componentes y transmitiendo fuerzas indeseables al conductor.

### 2.2.3 Regulación del amortiguador.

Para entender cómo se regula el amortiguador, primero se debe introducir dos conceptos claves: la compresión y extensión, que representan los sentidos que se mueve la suspensión, la cual afectará de una manera u otra su desempeño.

**Compresión:** La compresión sucede cuando la suspensión se comprime en una elevación del camino, por ejemplo: la primera mitad de un lomo de toro. Para valores bajos de la fuerza del



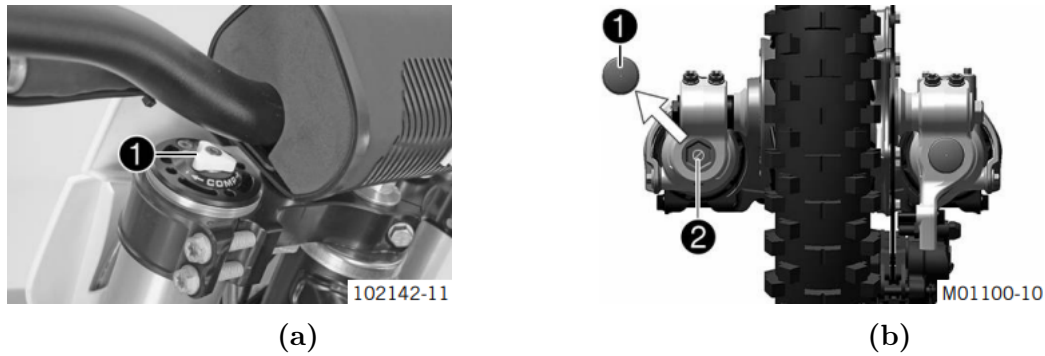
**Figura 2.2.4:** Regulación de la precarga de la suspensión trasera.[3]

amortiguador en compresión, permite que la suspensión pueda seguir el perfil del lomo de toro más fácil hasta la máxima altura de este, pero hace que la moto se sienta más sensible, ya que una frenada o aceleración muy brusca puede hacer que la moto vaya hacia delante o hacia atrás muy fácil. Un valor alto de la fuerza del amortiguador en compresión hace que el recorrido de la suspensión en el lomo de toro sea muy corta transmitiendo mucha fuerza al conductor.

**Extensión:** La extensión es el caso donde la suspensión vuelve a su estado normal después de haber sido comprimida, por ejemplo cuando se pasa la altura máxima del lomo de toro. Si la caída es muy abrupta y/o el amortiguador no permita que la rueda baje lo suficientemente rápido, la rueda pierde el contacto (un lomo de toro muy alto y con mucha velocidad longitudinal de la motocicleta) . Una extensión demasiado grande hace que la suspensión se mantenga más tiempo sin tocar el camino, por lo cual se pierde tracción con este. Un valor bajo permite que la rueda vuelva a tener tracción en menor tiempo, pero si es muy bajo, hace que la suspensión se expanda muy rápido lo cual puede hacer que los componentes internos de la suspensión choquen entre ellos provocando fuerzas indeseables al conductor.

La regulación del amortiguador se basa en el giro de dos tornillos (uno para compresión y otro para extensión) que mueven válvulas que regulan en diversas maneras el área de paso del fluido por unos conductos internos. Estas válvulas funcionan alternadamente, quiere decir que mientras se está en extensión una válvula está abierta y permite el movimiento del líquido mientras que la otra está cerrada. El caso contrario, en compresión, la válvula que estaba abierta en la extensión se cierra mientras que la otra se abre [4].

En la Figura 2.2.5 se muestra la regulación de la compresión y la extensión de la horquilla, donde para la compresión el 1 representa el tornillo de regulación y para la extensión es representado por el número 2.



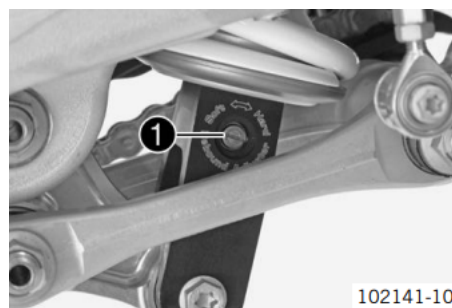
**Figura 2.2.5:** Regulación (a) compresión (b) Extensión.[3]

Para el caso de la suspensión trasera la regulación es un poco diferente, La modificación de la compresión se hace a través de tornillos de ajuste mostrado en la Figura 2.2.6 la cual se divide en baja y alta velocidad, que representan si la compresión se efectúa en velocidad bajas o altas. Por motivos de simplicidad se unen estas dos variables en una.

La regulación de la extensión trasera se hace mediante un tornillo de ajuste mostrado en la Figura 2.2.7.



**Figura 2.2.6:** Regulación (a) baja velocidad (b) alta velocidad.[3]



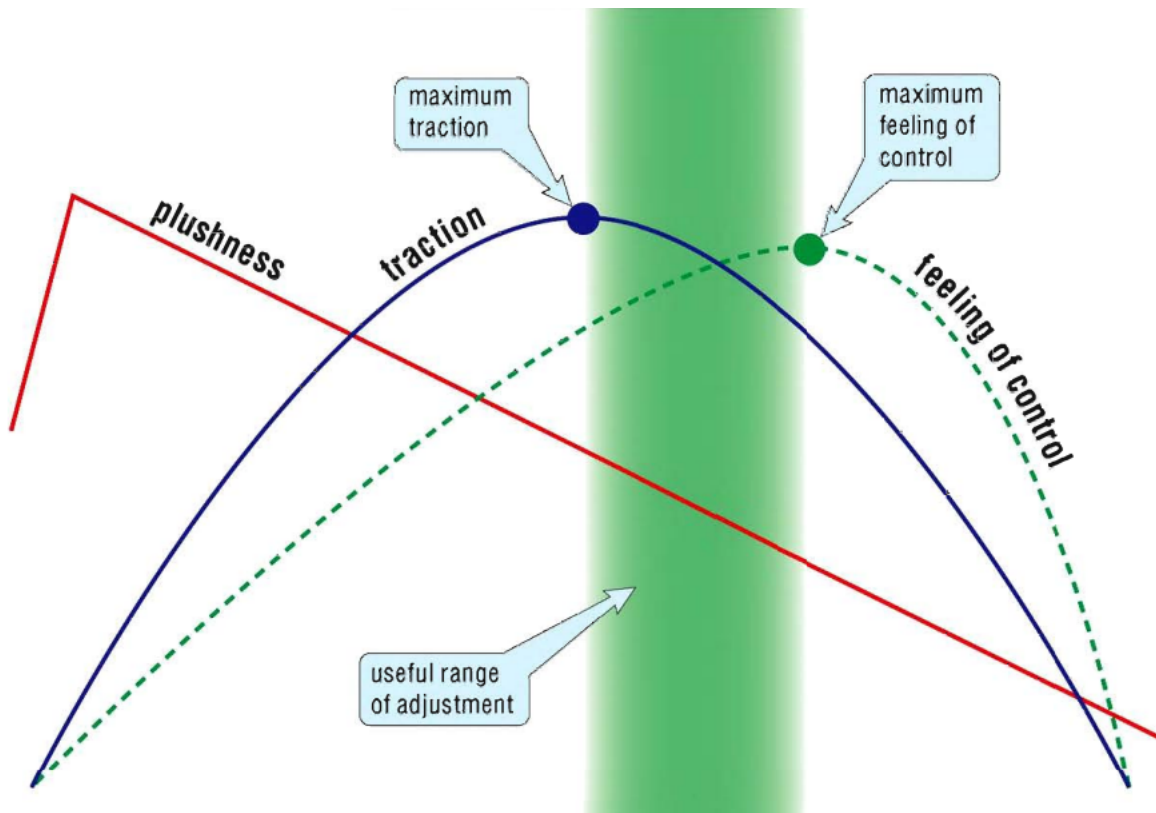
**Figura 2.2.7:** Regulación extensión amortiguador trasero.[3]

### 2.3 Desempeño de las motocicletas.

Tener un buen desempeño en la motocicleta depende a qué situación de conducción se someta. Por un lado, en una carrera en camino off-road, donde el camino tiene muchos baches e

irregularidades, los conductores manejan al límite de perder el equilibrio y caer, por este motivo es necesario que la motocicleta no pierda el contacto de las ruedas con el camino fácilmente, o en su defecto, vuelva a tener rápidamente el contacto de las ruedas con el camino si este contacto se pierde. A esto se le conoce como Adherencia, como al aumentar la adherencia aumentan las capacidades de frenar o doblar para esquivar un obstáculo, se dice que aumenta la seguridad del manejo. Por otro lado, en un camino de carretera, en donde se hacen largos trayectos y hay muy pocas irregularidades, se desea que las aceleraciones que siente el conductor sean muy pocas, ya que afecta directamente a la sensación de manejo o Confort.

El confort y adherencia son conceptos que van de la mano, existe una zona en donde se optimizan pero los puntos máximos de optimización son diferentes. Thede, et al. (2010) [4], en la Figura 2.3.1, se explica este comportamiento para la cantidad de amortiguamiento en extensión, donde se puede ver que existe un rango de ajuste conveniente, pero los puntos más altos para el confort (*feeling of control*) y la adherencia (*traction*) difieren.



**Figura 2.3.1:** Cambio en el extensión del amortiguador.[4]

La forma utilizada para medir el confort es a través de las aceleraciones del chasis de la motocicleta. Por otro lado, la adherencia se mide por las fuerzas de contacto de las ruedas delanteras y traseras. Para llegar a este objetivo, Lot, R., (2021) [13] explica que para estados transientes se debe calcular el *root mean squares* o rms de las fuerzas (ecuación 2.3.1) y las aceleraciones (ecuación 2.3.2).

$$rms_{road} = \sqrt{\int_0^T (N_t - N_o)^2 dt} \quad (2.3.1)$$

$$rms_{conf} = \sqrt{\int_0^T (a_z)^2 dt} \quad (2.3.2)$$

Donde,  $T$  es el tiempo que se ejecuta la maniobra.  $N_t$  es la fuerza de contacto de la rueda (trasera o delantera) y  $N_o$  es la fuerza de contacto estática o equivalente en un camino sin perturbaciones. Por último,  $a_z$  son las aceleraciones verticales del chasis.

De esta manera, para evaluar numéricamente el desempeño de una motocicleta, es necesario conocer las fuerzas de contacto y las aceleraciones verticales.

## 2.4 Perfil de la superficie del camino.

Entender cómo son las irregularidades del camino es complicado debido a que son en esencia aleatorias. Se podría calcular mediante una medición a pie pero sería un método tedioso y de poca fiabilidad. Por lo tanto, es muy importante tener un perfil bastante cercano a la realidad, ya que las irregularidades en el camino es lo que provoca las excitaciones en la motocicleta que afecta directamente al confort y la adherencia.

En el libro *Motorcycle Desing* [11] utilizan el método propuesto en la Norma ISO 8608 [5], la cual describe el camino por su Densidad de Potencia espectral PSD (*Power spectral density*) versus su frecuencia espacial  $n$  (*spatial frequency*) o frecuencia espacial angular  $\Omega$  (*angular spatial frequency*). Esto permite clasificar los caminos en 8 bandas diferentes. En la Figura 2.4.1 se muestran las diferentes bandas.

Para generar un camino a partir de los espectros se utiliza la ecuación 2.4.1 propuesta en Agostinacchio, (2013) [14].

$$h(x) = \sum_{i=0}^N \sqrt{2 \cdot \delta n G_d(i \cdot \Delta n)} \cdot \cos 2 \cdot \pi \Delta n \cdot x + \varphi_i \quad (2.4.1)$$

Donde,  $h(x)$  es la altura del perfil del camino,  $x$  es la distancia del camino que va desde 0 a  $L$ ,  $\Delta n = \frac{1}{L}$  son los valores de la frecuencia discretizados y  $\varphi_i$  es un ángulo de fase aleatorio que va desde 0 a  $2\pi$ .  $G_d$  es el PSD para un  $n$ , la cual se obtiene de la ecuación 2.4.2.

$$G_d(n) = G_d(n_o) \cdot \left(\frac{n}{n_o}\right)^{-2} \quad (2.4.2)$$

En donde  $G_d(n_o)$  se obtiene de la Tabla 2.4.1.

Por ejemplo, utilizando el procedimiento de Agostinacho se genera el camino tipo C en Matlab mostrado en la Figura 2.4.2.

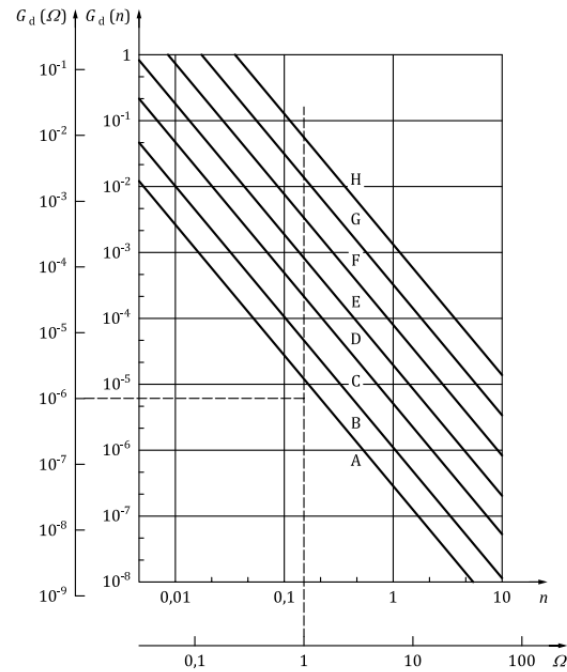


Figura 2.4.1: Clasificación de caminos. [5]

Tabla 2.4.1: Valores para  $G_d(n_o)$

Calificación del camino	Límite inferior	Media geométrica	Límite superior
	frecuencia espacial $G_d(n_o)$ a $n_o = 0,1 \text{ cycles/m}$ $10^{-6} \text{ m}^3$		
A	-	16	32
B	32	64	128
C	128	256	512
D	512	1024	2048
E	2048	4094	8192
F	8192	16384	32768
G	32768	65536	131072
H	131072	262144	-

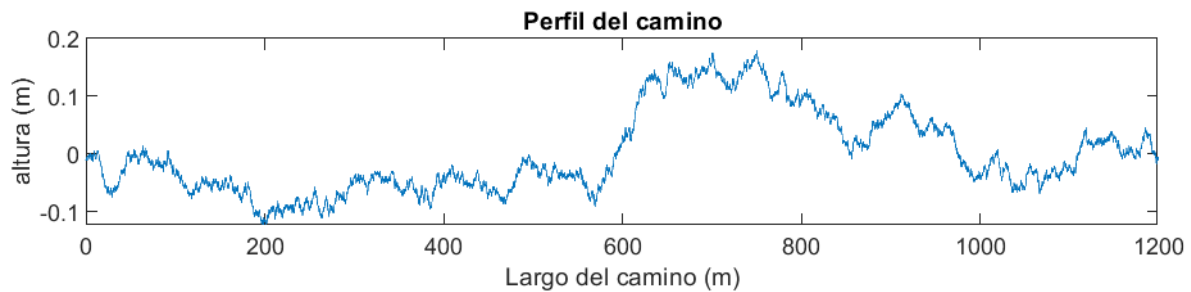


Figura 2.4.2: Perfil de un camino tipo c.



## 2.5 Modelos de dinámica de la motocicleta.

Para estimar las fuerzas y aceleraciones que se generan al transitar por dichos caminos, existen modelos con diversos grados de precisión que se presentan a continuación.

### 2.5.1 Quarter car model.

El modelo que cobra especial importancia cuando se habla de las suspensiones es el modelo de un cuarto de auto o media bicicleta (Quarter car model. QCM), llamado así porque divide el auto o motocicleta de tal manera que se puedan observar los resortes, masas y amortiguadores de una sola rueda. Este es el mínimo modelo con el que se puede estudiar las fuerzas que existen entre el perfil del camino, la rueda y las aceleraciones del chasis.

Este modelo consiste en dos masas: la masa suspendida  $m_c$  (*sprung mass*) que hace referencia a la masa del chasis y la masa no suspendida  $m_w$  (*unsprung mass*) que hace referencia a la masa de la rueda con sus componentes. En la Figura 2.5.1 se muestra una representación del modelo.

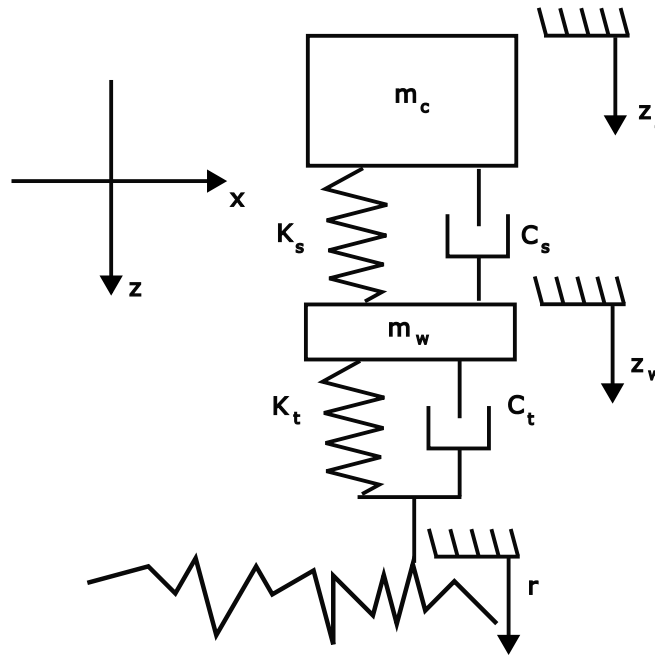


Figura 2.5.1: Ubicación de las masas en el QCM

Este sistema tiene como parámetros la rigidez de la rueda  $K_t$  y la rigidez del resorte de la suspensión  $K_s$ , al igual que las amortiguaciones  $C_t$  y  $C_s$ . También presenta la altura del camino  $r$  y el movimiento se estudia mediante dos coordenadas verticales, en particular se eligen los desplazamientos de cada masa, positivos hacia abajo.

A partir de la segunda ley de Newton se derivan las ecuaciones del movimiento 2.5.1 y 2.5.2.

$$m_c \cdot \ddot{Z}_c = C_s \cdot (\dot{Z}_c - \dot{Z}_w) + k_s \cdot (Z_c - Z_w) \quad (2.5.1)$$

$$m_w \cdot \ddot{Z}_w = -C_s \cdot (\dot{Z}_c - \dot{Z}_w) - C_t \cdot (\dot{Z}_w - \dot{r}) + k_s \cdot (Z_c - Z_w) - K_t \cdot (Z_w - r) \quad (2.5.2)$$

### 2.5.2 FastBike.

Un modelo para la dinámica de la motocicleta más complejo es el Fastbike. Este un código en Simulink desarrollado en el departamento de Ingeniería Mecánica de la Universidad de Padova, validado en [15].

El modelo de la motocicleta utilizado en Fastbike considera 6 cuerpos con masas: la masa no suspendida frontal, basculante, chasis delantero, chasis (incluyendo motor, tanque de gasolina y marco.) y las ruedas trasera y delanteras. También se consideran como grados de libertad: los movimientos hacia atrás, adelante y al lado del centro de masa, ángulo de guiñada (*yaw angle*), ángulo de cabeceo, ángulo de giro, rotación del basculante, deflexión de la suspensión delantera y el ángulo de giro de la rueda trasera y delantera. En la Figura 2.5.2 se muestran estos grados de libertad.

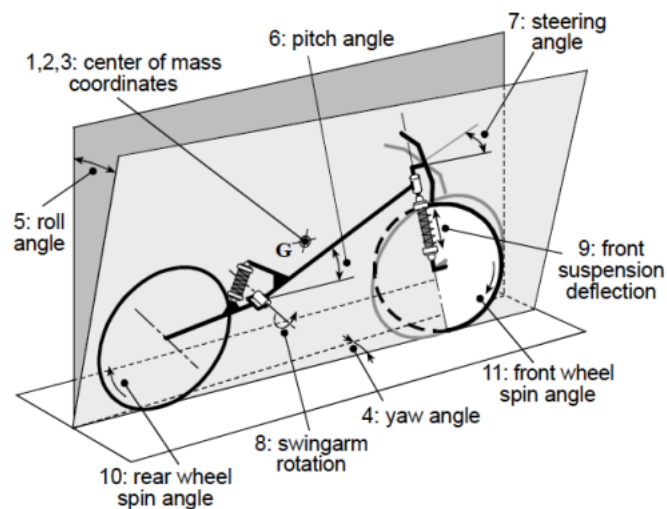


Figura 2.5.2: Grados de libertad en el Fastbike. [6]

Una vez descrito como modelar la motocicleta es necesario tener modelos de optimización que logren encontrar puntos en regulación de la suspensión para mejorar el comportamiento.

## 2.6 Modelos de optimización.

Existen diversos métodos para buscar los valores de los parámetros que maximicen la adherencia y el confort. Inicialmente la búsqueda puede ser manual, no obstante difícilmente se encontrarán los óptimos. Para el QCM, que es sencillo, existe una solución analítica, mientras que para modelos completos, como el Fastbike, la búsqueda es numérica.

### 2.6.1 Optimización lineal.

En una suspensión con resortes y amortiguadores lineales, los óptimos para el Confort y adherencia se obtienen a partir del trabajo de Limebeer y Massaro [11], quienes obtuvieron las siguientes ecuaciones para poder calcular las variables  $k$  y  $c$  de la suspensión que optimizan el confort y adherencia.

$$k_s^{opt} = \frac{q_2 \cdot k_t \cdot m_c \cdot m_w}{k_t^2 + q_2 \cdot (m_c + m_w)^2} \quad (2.6.1)$$

$$c_s^{opt} = \sqrt{\frac{k_t^2(m_c + m_w)(k_w^2 + q_1 m_c^2) + q_2 k_s^2(m_c + m_w)^3 + q_2 q_2 k_t m_w m_c (k_t m_c - 2k_s(m_c + m_w))}{k_t(k_t^2 + q_2(m_c + m_w)^2)}} \quad (2.6.2)$$

Donde  $q_1$  y  $q_2$  son factores que representan la importancia relativa en 3 casos diferentes:

- Cuando  $q_1 = q_2 = 0$ , obtenemos el óptimo de confort para los pasajeros, que al reemplazar en las ecuaciones 2.6.1 y 2.6.2 se obtiene.

$$k_s^{opt,c} = 0 \quad (2.6.3)$$

$$c_s^{opt,c} = 0 \quad (2.6.4)$$

Lo que indica que el óptimo de confort se obtiene cuando no existen resortes, es decir, sin aceleraciones en el chasis, lo cual en la práctica no es posible, por lo que se realiza el caso en donde sí exista la rigidez  $k_s > 0$ .

$$c_s^{opt,c} = \sqrt{\frac{(m_w + m_c)}{k_t}} \cdot k_s \quad (2.6.5)$$

- El siguiente caso es para el óptimo de la adherencia donde  $q_1 = 0$  y  $q_2 \rightarrow \infty$ .

$$k_s^{opt,road} = \frac{k_t \cdot m_c \cdot m_w}{(m_c + m_w)^2} \quad (2.6.6)$$

$$c_s^{opt,road} = \sqrt{\frac{k_s^2 \cdot (m_c + m_w)^3 + k_t \cdot m_w \cdot m_c \cdot (k_t \cdot m_c - 2 \cdot k_s \cdot (m_c + m_w))}{(k_t \cdot (m_c + m_w))^2}} \quad (2.6.7)$$

- El último caso utilizando el recorrido total de la suspensión, reemplazando con  $q_1 \rightarrow \infty$  y  $q_2 = 0$ .

$$c_s^{opt} = 0 \quad (2.6.8)$$

$$k_s^{opt} = 0 \quad (2.6.9)$$

Da el mismo resultado que en el óptimo del confort, por lo que no es posible. Esta vez se hace el caso para  $k_s^{opt} > 0$  y se obtiene que:

$$c_s^{opt} = \infty \quad (2.6.10)$$

Lo que no es posible ya que no existe ninguna amortiguación infinita.

## 2.6.2 Optimización multiobjetivo.

Calcular la adherencia y confort óptimo con el modelo antes prepuesto permite tener un acercamiento, pero no sirve cuando las suspensiones tienen variables no lineales. Si se quiere considerar factores como la precarga, extensión, compresión, cambios del resorte, la no linealidad de los resortes, se debe considerar hacer simulaciones numéricas. Por otro lado, la ecuaciones antes mencionadas se maximiza un objetivo a la vez, pero en realidad se requiere maximizar todos los objetivos a la vez.

### 2.6.2.1 Objetivos de simulación.

Para obtener los objetivos, se normalizan las ecuaciones 2.3.1 y 2.3.2 con respecto los rms de referencia, donde la ecuación 2.6.11 es para la aceleración vertical del chasis y la ecuación 2.6.12 para las fuerzas de contacto en las ruedas.

$$J_i = \frac{rms(\ddot{Z}_c)}{rms(\ddot{Z}_c)_{ref}} \quad (2.6.11)$$

$$J_k = \frac{rms(N_f) + rms(N_r)}{rms(N_f)_{ref} + rms(N_r)_{ref}} \quad (2.6.12)$$

Una vez definidos los objetivos, se busca optimizarlos mediante algún tipo de algoritmo, pero antes hay que tener saber que es un óptimo. Para esto se utiliza la Frontera de Pareto.

La Frontera de Pareto o *Pareto Front* son las soluciones óptimas para un grupo de variables, la cual cada solución de Pareto mejora al menos un objetivo y empeora al menos uno de los otros objetivos, la cual da una frontera de soluciones igualmente buenas entre ellas. Es de gran importancia en ingeniería, ya que es posible optimizar varias variables simultáneamente y se puede ver un ejemplo en Gobbi et al. [16].

### 2.6.2.2 Algoritmo genético

La optimización que se busca en este proyecto es multiobjetivo, es decir que se requieren optimizar varios objetivos a la vez ( $J_1, \dots, J_n$ ), por lo que no existe una sola configuración de las suspensiones que sean optimizadas, sino que es un conjunto de configuraciones. Luego, la configuración utilizada para optimizar los objetivos se muestran en la ecuación 2.6.13 la que indica que objetivos se busca minimizar, modificando las variables  $x$  de la suspensión en un rango entre ganancias las  $g_{in}$  y  $g_{su}$ , que depende de cada variable.

$$\begin{aligned} \min_{x \in R^n} f(x) \\ X \in x \end{aligned} \quad (2.6.13)$$

donde:

$$\begin{aligned} f(x) &= [J_1, \dots, J_n] \\ x &= [x_1, \dots, x_n] \\ X : g_{in} \cdot x_i &< x_i < g_{su} \cdot x_i, \quad i = \{1, \dots, 8\} \end{aligned}$$

El algoritmo utilizado para encontrar la Frontera de Pareto, es el *multi-objective Genetic Algorithm* implementado en Matlab en la función gamultiobj, la cual está basado en el trabajo de Kalyanmoy (2001) [17]. En perspectiva, se realiza un código en donde la función gamultiobj busca valores aleatorios de  $x$  (las variables de la suspensión) la cual evalúa el Fastbike en las dos situaciones, luego se obtienen los valores de la aceleración y fuerza de contacto de las ruedas las cuales se normalizan con las ecuaciones 2.6.11 y 2.6.12. Luego, la función gamultiobj opera para encontrar Frontera de Pareto, esto se repite hasta encontrar un criterio de detención. Así, por cada iteración puede encontrar nuevos óptimos o mantener los ya encontrados.

## 2.7 Conclusiones.

En este capítulo se logra cumplir con el primer objetivo, donde fue posible comprender los conocimientos necesarios para poder realizar la formulación de la optimización multiobjetivo que se realiza en el Capítulo 5. Por lo que, se muestra el perfil del camino que recibe la motocicleta y las variables de las suspensiones que se pueden regular y que modifican su comportamiento. También se indica como es el modelo de simulación multiobjetivos.

Finalmente, resulta beneficioso hacer un análisis de sensibilidad para tener un mejor entendimiento del efecto que produce el cambio de cada variable de la suspensión por separado, en el comportamiento de la motocicleta.

## Capítulo 3

### Definición del modelo dinámico a analizar

En este capítulo se presenta el modelo a optimizar, tanto las características de la motocicleta (peso, inercia, centro de masa, etc.), variables de las suspensiones y las situaciones a la cual se verá enfrentada la motocicleta.

Finalmente, se muestra el código para realizar la simulación de la dinámica de la motocicleta y también el diagrama de flujo que explica la lógica de la optimización.

#### 3.1 Motocicleta a optimizar.

La motocicleta a optimizar es la KTM 450 SX-F 2017, ya que es la utilizada en [12] y es una de las motocicletas más usadas para carreras off-road, mostrada en la Figura 3.1.1.



**Figura 3.1.1:** Motocicleta KTM 450 SX-F [7]

En la tabla 3.1.1 se muestra los parámetros más importantes de la motocicleta.

**Tabla 3.1.1:** Parámetros de la motocicleta

Tipo	Valor	Descripción	Tipo	Valor	Descripción
Geometría			Montaje frontal		
$w$	1,482 m	distancia entre ruedas	$c_f$	8 $Nms/Rad$	dirección giratoria
$\epsilon$	0.4625 Rad	ángulo de avance	$m_f$	30 kg	-
$a_n$	0.1 m	normal al camino	$h_f$	0,7 m	centro de gravedad
$l_{sa}$	0.59 m	brazo rueda trasera	$e_x$	0.02 m	excentricidad
$sa_0$	0,25 Rad	ángulo nominal	$I_{fxx}$	1,3 $kgm^2$	inercia
$R_r$	0,305	radio rueda	$I_{fyy}$	1.4	inercia
$rho_r$	0,05	sección transversal	$I_{fzz}$	0,45 $kgm^2$	inercia
$R_f$	0,305	radio rueda	Masas no suspendidas		
$rho_f$	0,05	sección transversal	$m_{fw}$	12 kg	masa
Inercia			$m_{fu}$	0	-
$m$	107 kg	masa total	$x_{fu}$	0	-
$h_0$	0,5 m	centro de gravedad	$z_{fu}$	0	-
$b_0$	0,79	centro de gravedad	$m_{rw}$	18 kg	masa
$I_{xx}$	11 $kgm^2$	inercia roldo	$m_{sa}$	0	-
$I_{xy}$	0	-	$I_{sa}$	0	-
$I_{yy}$	23	inercia	$x_{sa}$	0	-
$I_{zz}$	20	inercia	$z_{sa}$	0	-
$I_{fy}$	0,5	inercia			
$I_{ry}$	0,7	inercia			
Cadena			Fuerzas		
$w_{sr}$	0,1 m	radio piñón de la rueda	$K_D$	0,2 $N/(m/s)^2$	-
$c_{sr}$	0,05 m	radio piñón chasis	$h_a$	0,8 m	centro de gravedad
$c_x$	0,1 m	posición del piñón	$\sigma_f$	0,2 m	ángulo relajación frontal
$c_z$	0,05 m	-	$\sigma_r$	0,2 m	longitud relajación trasera

### 3.2 Selección de parámetros a optimizar.

Para que la simulación pueda probar diferentes condiciones de la suspensión, es necesario que existan variables que puedan modificar el comportamiento de la amortiguación, resorte y precarga. Estas variables se eligen a partir de las regulaciones de la suspensión y las modificaciones se representan como ganancias, por simplicidad, (positivas o negativas) del valor de referencia. A continuación, se presentan como varían las variables en un pequeño rango.

En primer lugar, para de la constante elástica del resorte trasero y delantero se modifica el original en un rango de  $\pm 20\%$ , como se observa en la Figura 3.2.1.

Para la regulación de la extensión y compresión de los amortiguadores, de la misma forma que anteriormente, modifican en un rango de  $\pm 20\%$ . Estos cambios se pueden ver en la Figura 3.2.2 para la suspensión delantera y en la Figura 3.2.3 para la trasera.

Adicionalmente, para la precarga se hace recorrer desde un rango de  $[0, 0,03]$  m ya que son los valores típicos para motocicletas de caminos off-road.

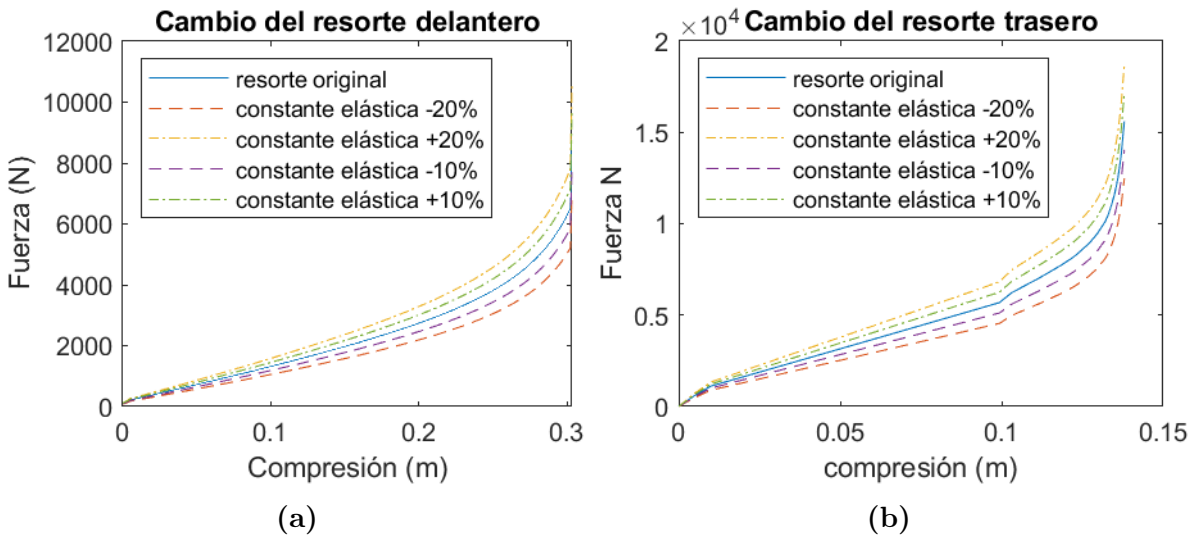


Figura 3.2.1: Cambio de la constante elástica de los resortes delanteros y traseros

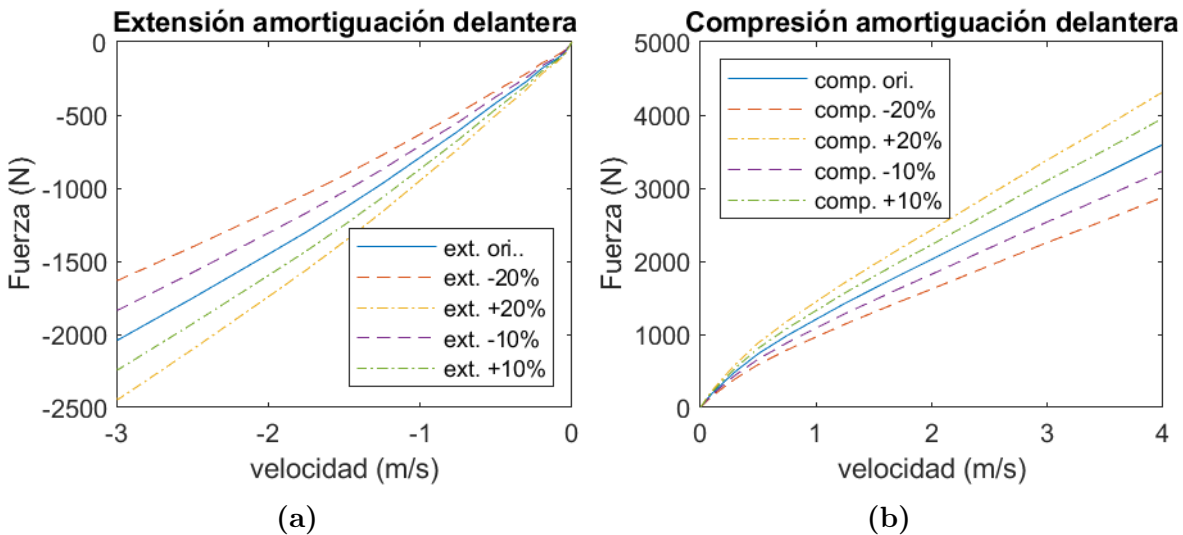


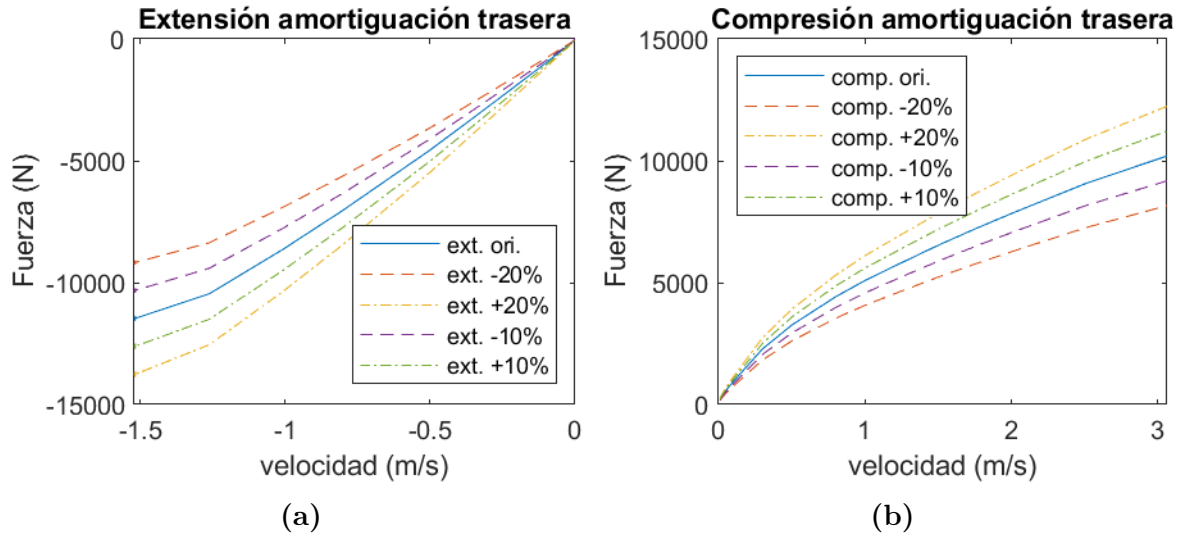
Figura 3.2.2: Regulación de la extensión y compresión delantera

Finalmente, las modificaciones reciben el nombre de  $s_1$  y  $s_2$  para el cambio de la constante elástica del resorte delantero y trasero respectivamente.  $d_1$  y  $d_2$  para la compresión y extensión de la amortiguación delantera.  $d_3$  y  $d_4$  para la compresión y extensión trasera. Y  $p_1$  y  $p_2$  para la precarga delantera y trasera. Se resumen en la Tabla 3.2.1.

### 3.3 Definición situaciones de manejo.

Las situaciones a elegir son las de frenado y la de giro, debido a que son las más comunes, por ejemplo en una circuito off-road, donde continuamente se enfrentan a un frenado antes de entrar a la curva y luego a una aceleración saliendo de esta. Además, fueron las que utilizó Vasquez en [12] y en donde se obtienen los valores que definen velocidades iniciales y finales, valores de rolido, aceleración y desaceleración.





**Figura 3.2.3:** Regulación de la extensión y compresión trasero

Variable	Descripción
$d_1$	ganancia de la compresión amortiguación delantera
$d_2$	ganancia de la extensión amortiguación delantera
$d_3$	ganancia de la compresión amortiguación trasera
$d_4$	ganancia de la extensión amortiguación trasera
$s_1$	ganancia resorte delantero
$s_2$	ganancia resorte trasero
$p_1$	ganancia de la precarga delantera
$p_2$	ganancia de la precarga trasera

**Tabla 3.2.1:** Variables de la suspensión.

### 3.3.1 Primera situación: frenado.

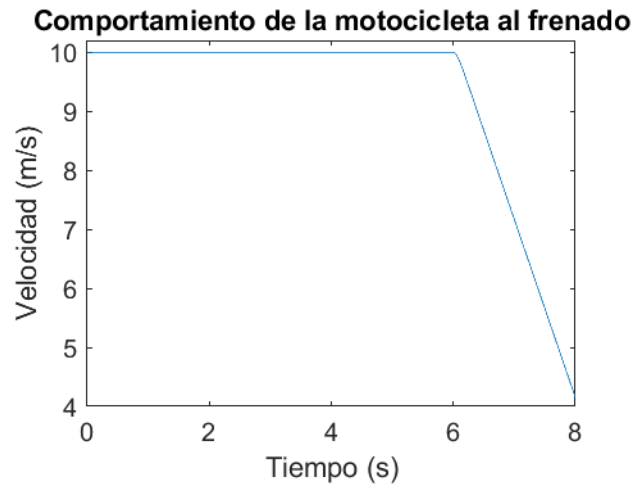
En la primera situación se representa el frenado de la motocicleta. La simulación parte con una velocidad constante de  $10 \text{ m/s}$ . Al iniciar la simulación se desea que la motocicleta esté en estado estacionario debido a que se trata de evitar fuerzas residuales del inicio, por lo que la simulación inicia en el segundo 6 donde se frena con desaceleración constante hasta llegar al segundo 8 en donde la velocidad de la motocicleta baja hasta los  $4 \text{ m/s}$ .

En la Figura 3.3.1 se puede observar la velocidad de la motocicleta en función del tiempo de simulación.

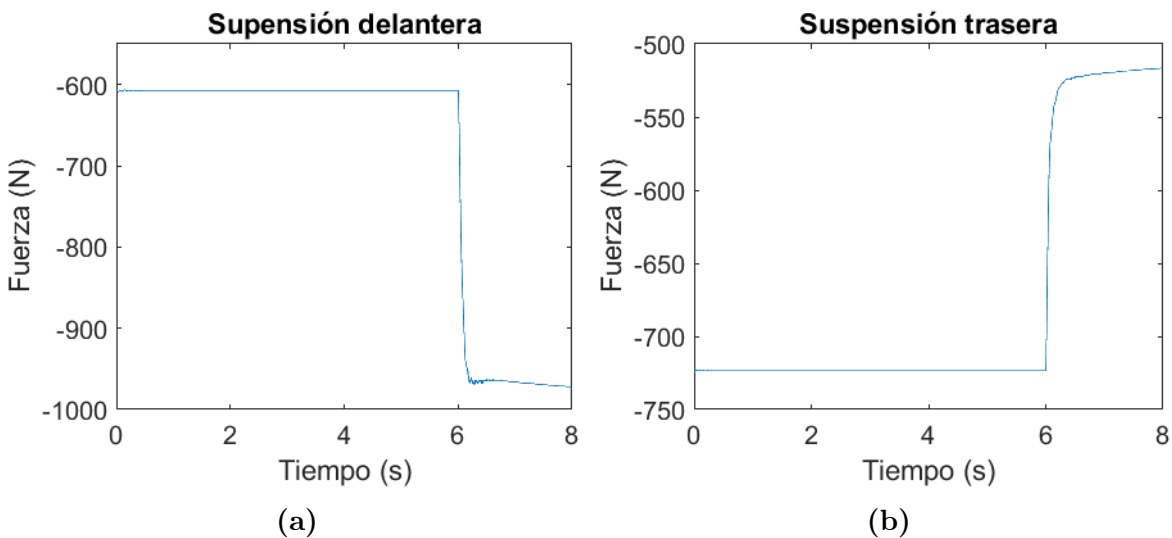
Y en la Figura 3.3.2 se observa el comportamiento de las suspensiones en el frenado. Se muestra que al frenar la inercia de la moto con el conductor hacen que se comprima la suspensión delantera (Figura 3.3.2a) y deja de cargar la trasera (Figura 3.3.2b).

### 3.3.2 Segunda situación: giro y aceleración.

La segunda situación representa la mitad de la curva y luego la salida de esta. La situación parte con la motocicleta con un rolido de  $0,7 \text{ rad}$  y una velocidad de  $7,2 \text{ m/s}$ . Al igual que la simulación



**Figura 3.3.1:** Cambio de velocidad de la motocicleta en frenado.



**Figura 3.3.2:** Comportamiento de las suspensiones al frenado.

anterior se desea que la motocicleta esté en estado estacionario, por lo que la simulación inicia en el segundo 6 en donde empieza a salir de la curva, para lograr esto la motocicleta acelera  $11 \text{ m/s}$  y a la par cambia su rolido hasta llegar los  $0 \text{ rad}$  cuando la simulación llegue al segundo 8, 5.

En la Figura 3.3.3 se observa el comportamiento de la motocicleta en el giro en un camino lineal. En la Figura 3.3.3b el Roll situación representa qué rolido debe seguir la motocicleta en el giro, y el Roll motocicleta cómo se comporta la motocicleta para conseguir el estado estacionario antes de empezar la curva.

Ahora, el comportamiento de las suspensiones en giro se observa en la Figura 3.3.4. Al inicio de la simulación existe una gran excitación de las suspensiones producido por las condiciones iniciales, luego se espera a que la simulación llegue al estado estacionario para empezar la salida del giro.

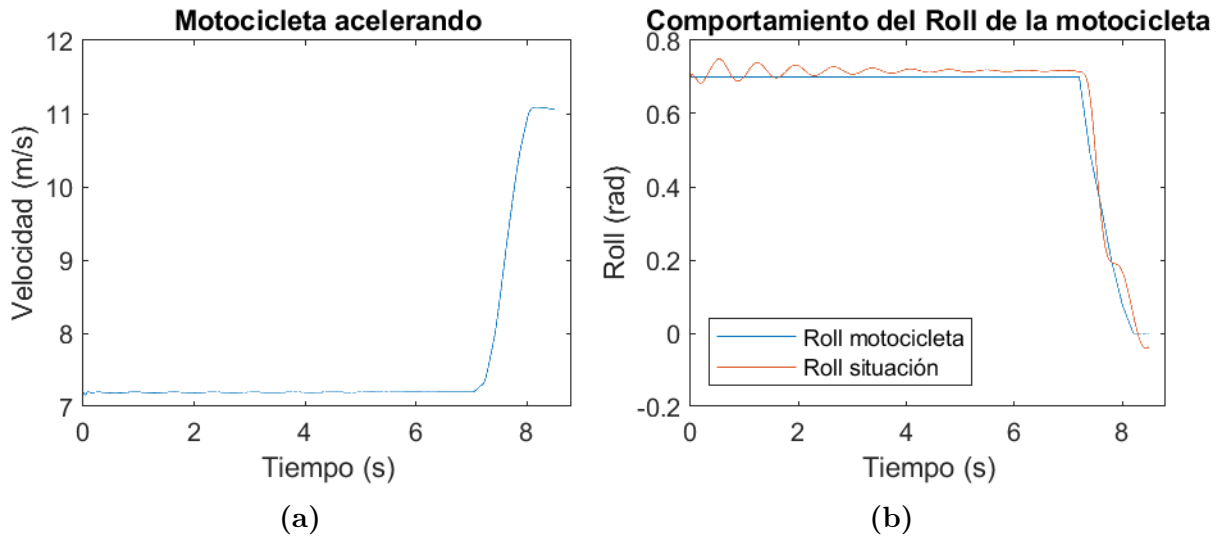


Figura 3.3.3: Comportamiento de la motocicleta en el giro.

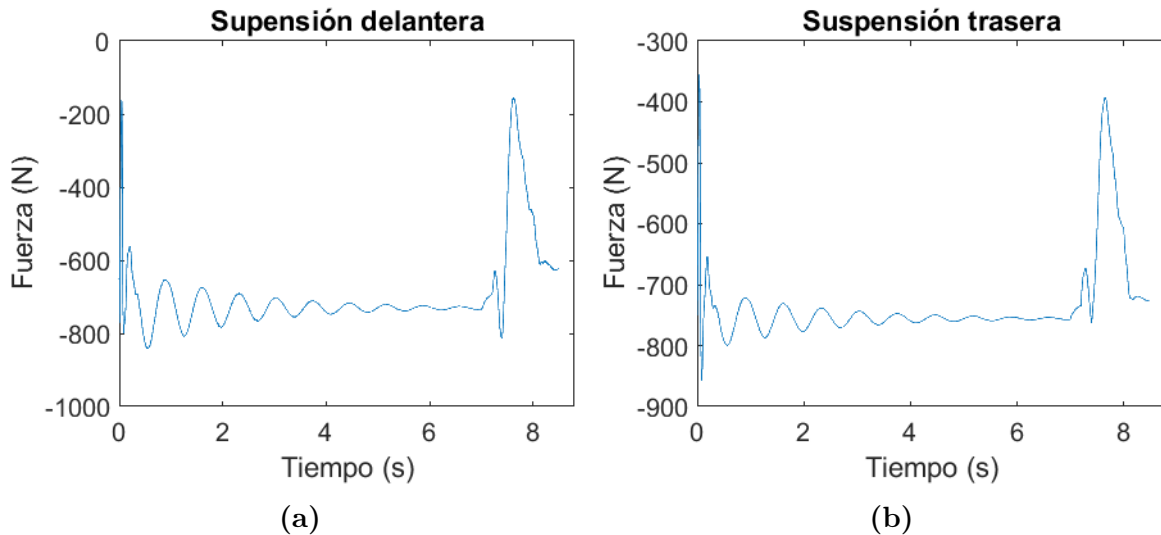


Figura 3.3.4: Comportamiento de las suspensiones en la aceleración.

Una vez definidas todas las variables de la simulación, es necesario modificar y rehacer el código a partir de Vasquez (2020) [12] para la simulación de la dinámica de la motocicleta.

### 3.4 Código en Matlab

En el ANEXO A se muestra la modificación en el Fastbike para representar la entrada del camino, y en el ANEXO B y C se muestran las suspensiones que a diferencia de lo propuesto por Vasquez (2020) [12] se toma en cuenta la precarga, y las diferentes regulaciones de la suspensión.

Los errores en el código hecho por Vasquez (2020) [12], las cuales son: cómo se tomaban las fuerzas de contacto de las ruedas y que las simulaciones de optimización deben hacerse con situaciones de manejo en conjunto en lugar de encontrar óptimos por separado para cada

situación. Se escribe el código Matlab llamado *cost function* (ANEXO D) que representa la dinámica de la motocicleta, modificando los errores antes mencionados, al igual que agregar las regulaciones de la suspensión y finalmente simular las situaciones en conjunto.

Para entender cómo funciona la optimización, se dibuja un diagrama de flujo (Figura 3.4.1), en donde se aprecia la lógica de la simulación. Primero, el programa recibe las entradas del camino y variables de la motocicleta de referencia, luego el *cost function* simula la motocicleta en Fastbike. Del Fastbike obtiene las aceleraciones del chasis y fuerzas de contacto, así el *cost function* envía a la optimización (ya sea el algoritmo genético o al análisis de sensibilidad) los objetivos de simulación, para que después el código de la optimización itere modificando las variables de la suspensión y tener como salida la Frontera de Pareto o los cambios en la sensibilidad.

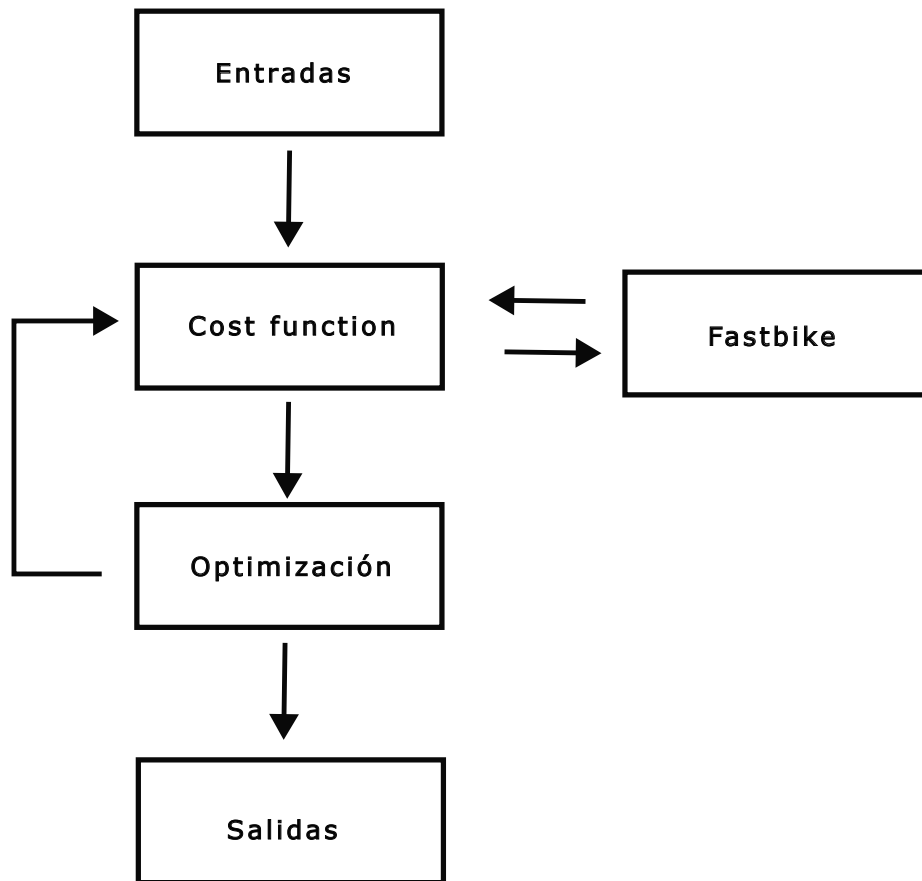


Figura 3.4.1: Diagrama de flujo de la optimización.

### 3.5 Conclusiones.

En este capítulo se mostró la motocicleta KTM 450 SX-F la cual es una de las más utilizada en caminos off-road. Luego, a partir de las diferentes regulaciones de la motocicleta se eligen las variables que modifican la suspensión y se muestra su cambio a través de ganancias. A continuación, se explican las situaciones a la cual la motocicleta se ve enfrentada en las simulaciones. Finalmente, se logra lo propuesto en el segundo objetivo, rehacer un código en

Matlab (mostrado en el ANEXO D) para la dinámica de la motocicleta modificando los cambios hechos en las suspensiones.

## Capítulo 4

### Análisis de sensibilidad

En este capítulo se detalla el análisis de sensibilidad del Fastbike, la cual se realiza para las dos situaciones y que dará como resultado el comportamiento de la motocicleta y como afectan cada una de las variables de la suspensión.

#### 4.1 Formulación análisis de sensibilidad.

Una vez definido los parámetros vistos en en capítulo 3, se procede a simular la motocicleta en el Fastbike. En primera instancia en un análisis de sensibilidad, para poder observar el desempeño de la motocicleta al cambio de las variables de la suspensión y cuales tienen mayor y menor influencia. Esto se hace modificando cada una de las variables de la moto en  $-10\%$  y  $+10\%$

#### 4.2 Resultados.

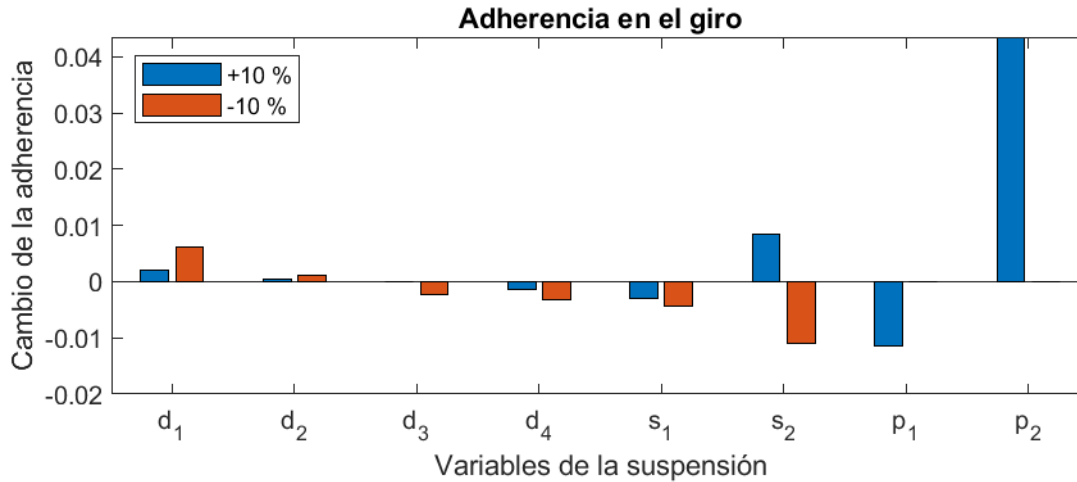
##### 4.2.1 Giro.

En las Figuras 4.2.1 y 4.2.2 se muestran como afectan los cambios de las variables en el giro en el confort y adherencia. Las barras en azul es un aumento en  $10\%$  de estas variables y en rojo la disminución en  $10\%$ . Destaca la parte de las precargas en donde solo existe un aumento del  $10\%$  debido a que un estado inicial la regulación de la precarga está en su estado mínimo, por lo que solo es posible aumentarla.

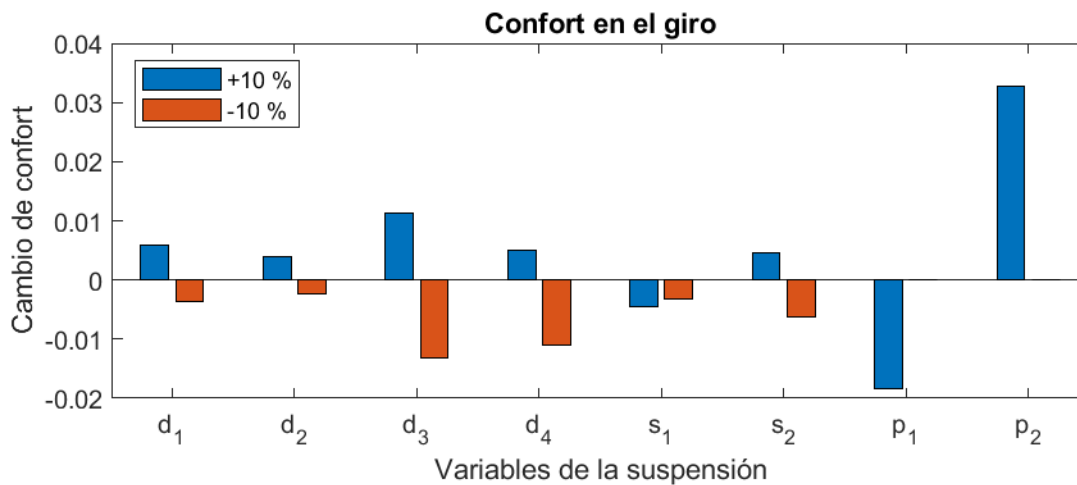
El eje vertical representa el cambio en el confort para la Figura 4.2.2 y en la adherencia para la Figura 4.2.1, donde, con respecto al estado inicial, el eje en positivo representa el empeoramiento y el negativo el mejoramiento.

Para la adherencia, lo que más le afecta es la precarga trasera. Debido que al modificarla hace que la motocicleta se cargue más en la parte trasera, lo que amplifica el propio cabeceo producido por la aceleración en el giro (movimiento hacia atrás por la aceleración), por lo que cada vez que hay un desperfecto en el camino muy grande, la rueda delantera pierde muy fácilmente contacto con el camino; en el caso contrario, disminuir la precarga delantera mejora el comportamiento de la motocicleta. Las demás variables no afectan mucho la adherencia, tomando como caso especial la compresión trasera, donde aumentarla tiene muy poco o nulo impacto.

Para el Confort (Figura 4.2.2) al disminuir las variables, la motocicleta mejora su comportamiento sobre todo si se habla de la compresión y extensión de la amortiguación trasera, ya que al disminuirlas se transmite menos aceleraciones al chasis, por otro lado la amortiguación delantera presenta el mismo comportamiento pero en menor medida. De igual forma que en la adherencia, la precarga trasera afecta directamente el desempeño de la motocicleta, esto es debido a que posiblemente la referencia se encuentre alejado de la zona optimización (por como se observa en la Figura 2.3.1) por lo que aumentar la precarga trasera la aleja de la zona de confort, esto disminuye tanto el confort y la adherencia, mientras que la precarga delantera se encuentra en el caso contrario, donde aumentarla se acerca más la zona de optimización.



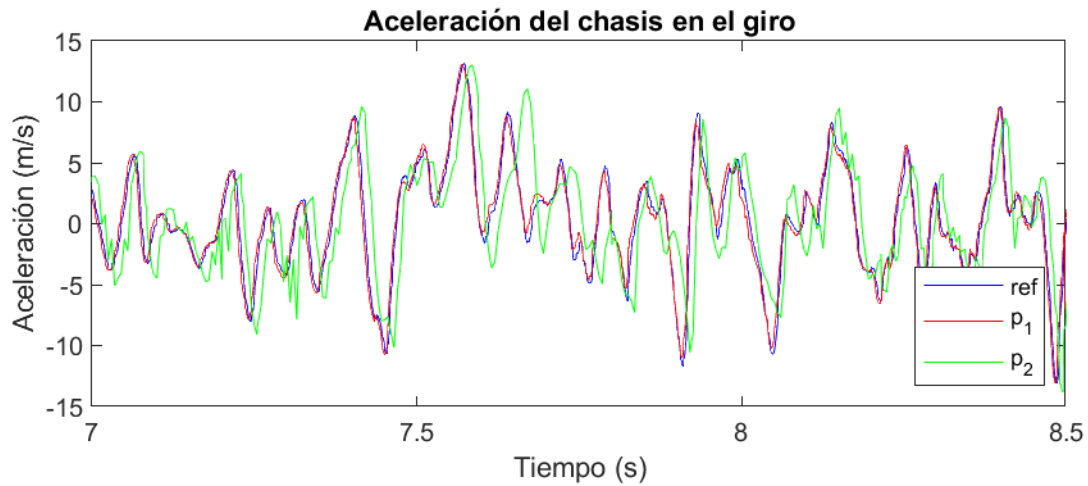
**Figura 4.2.1:** Análisis de sensibilidad en el giro para la adherencia.



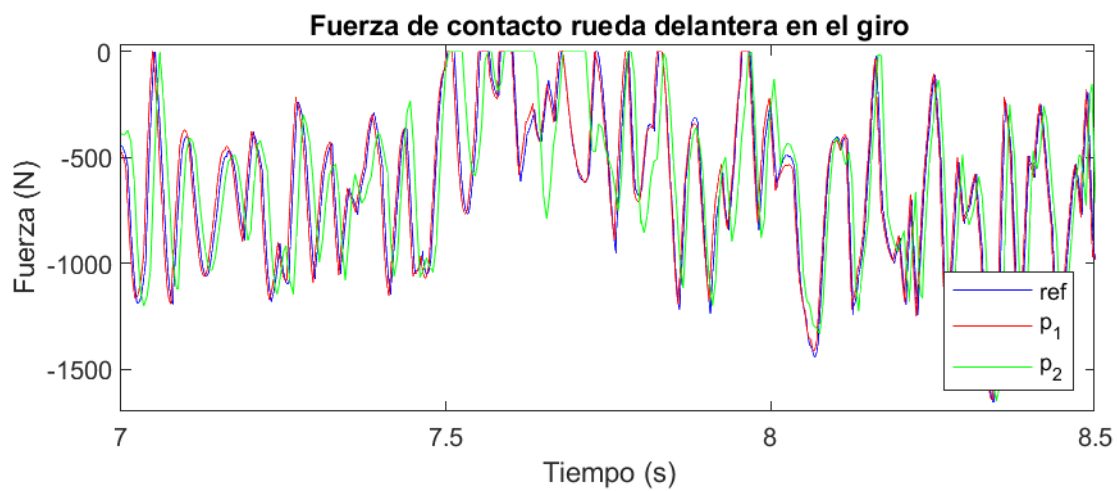
**Figura 4.2.2:** Análisis de sensibilidad en el giro para el confort.

En la Figura 4.2.3, se observa el cambio en las aceleraciones del chasis lo que afecta directamente el confort del conductor. Se muestran los parámetros que generan el mejor y peor confort, donde en rojo presenta el mejor confort y en verde el peor. Donde se observa como el cambio en la precarga trasera aumenta la frecuencia de las aceleraciones del chasis y un poco su amplitud.

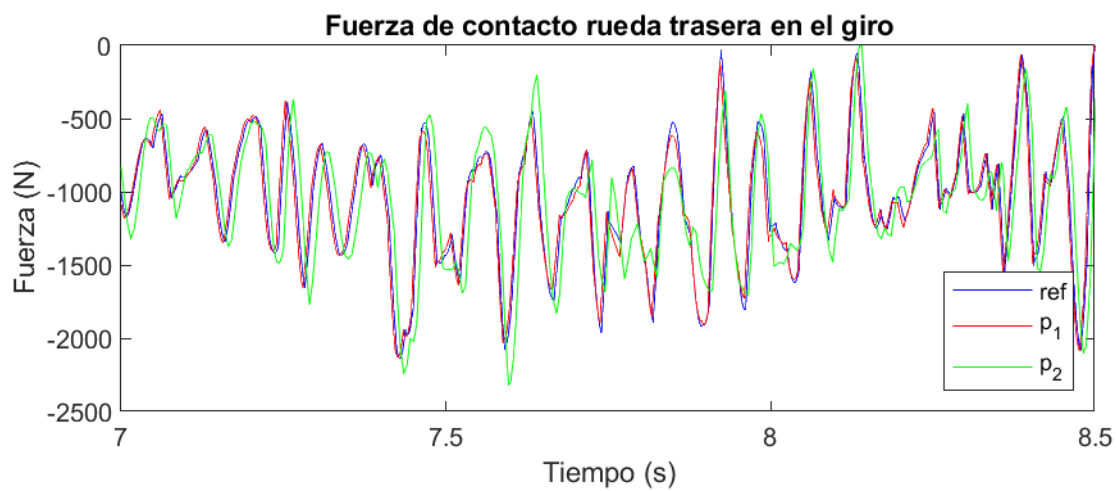
Para la adherencia en giro, las Figura 4.2.4 y 4.2.5 representan las fuerzas de contacto de la rueda delantera y trasera respectivamente. Se observa que, alrededor del tiempo  $t = 7,5 s$  pierde contacto la rueda delantera en el giro, la cual en este caso es producido por el aumento de la precarga trasera.



**Figura 4.2.3:** Aceleración del chasis en el giro



**Figura 4.2.4:** Fuerzas de contacto de la rueda delantera en giro.



**Figura 4.2.5:** Fuerza de contacto de la rueda trasera en giro.



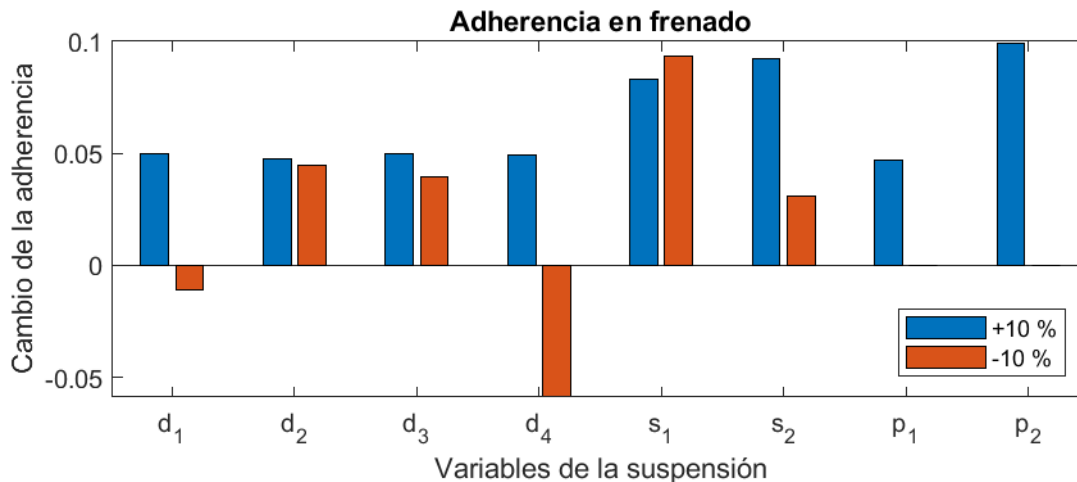
### 4.2.2 Frenado.

Del mismo modo que en el análisis de sensibilidad del giro, se efectúa esta vez para el frenado. En la Figura 4.2.6 y 4.2.7 se muestra el análisis de sensibilidad para la adherencia y el confort respectivamente.

En el caso de la adherencia en el frenado se observa que la mayoría de los cambios disminuyen el contacto de las ruedas con el piso. Esto se debe a que posiblemente la motocicleta en la referencia está en un estado óptimo que al modificar la mayoría de sus variables empeoran su comportamiento. Un caso especial es la extensión de la amortiguación trasera, ya que al disminuir esta variable la rueda trasera puede volver a su estado natural más rápido por lo que vuelve a tener contacto con el piso más rápidamente.

Por otro lado, el confort en el frenado tiene un comportamiento similar, pero a diferencia que en la adherencia la compresión del amortiguador delantero mejora en gran medida el confort, ya que la rueda puede responder de mejor manera a las imperfecciones del camino.

En comparación con el análisis del giro, se observa que los cambios en las variables de las suspensiones en el frenado afectan en mayor magnitud el comportamiento de la motocicleta. Esto se debe a que la motocicleta en giro existe un rolido, esto hace que los cambios en la suspensión sean menos influyentes.



**Figura 4.2.6:** Análisis de sensibilidad en frenado para la adherencia.

En la Figura 4.2.8, se presentan las aceleraciones en el chasis, donde al igual que en el análisis del giro, en rojo es la mejora y en verde es el empeoramiento.

En las Figuras 4.2.9 y 4.2.10, se presentan esta vez las fuerzas de contacto, la cual en la rueda trasera se observa el efecto del frenado donde la motocicleta se carga hacia adelante perdiendo contacto más fácilmente en la parte de atrás.

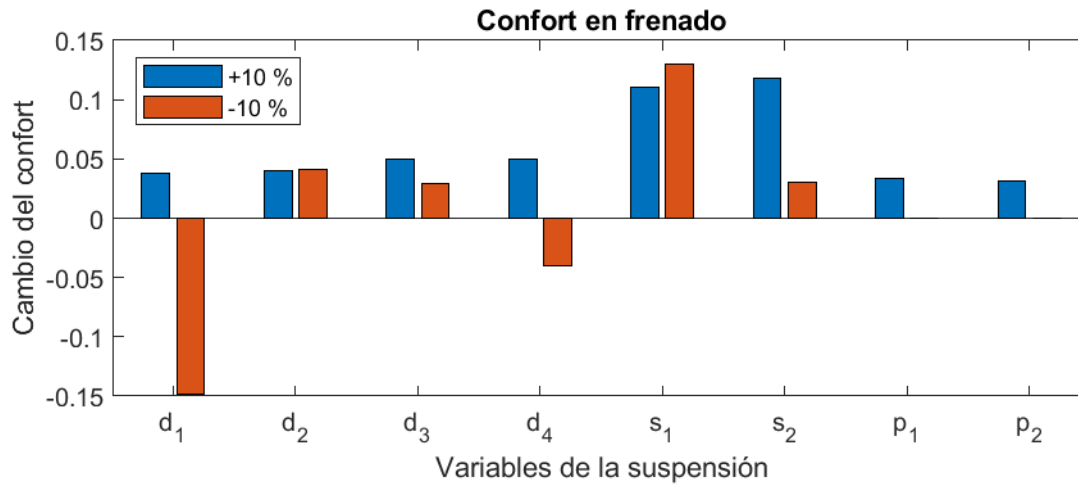


Figura 4.2.7: Análisis de sensibilidad en frenado para el Confort.

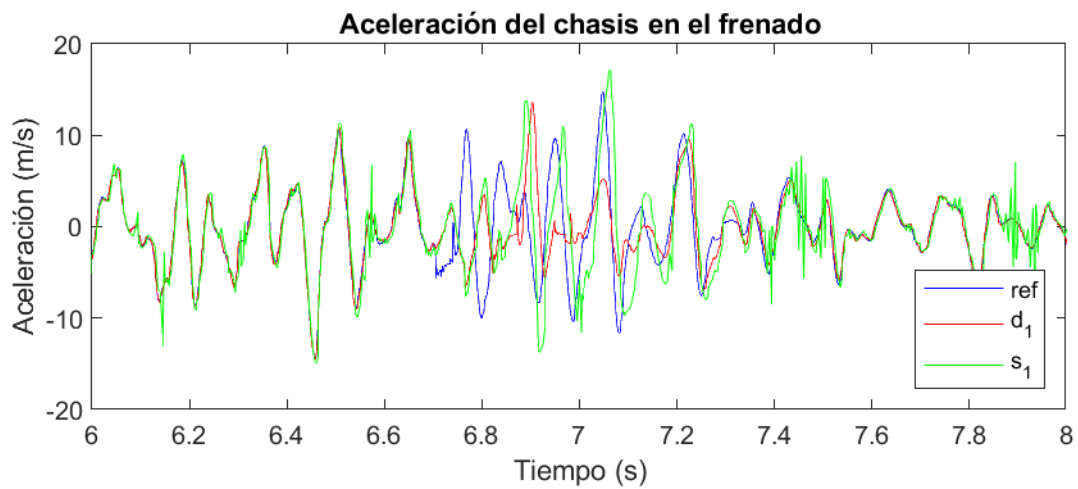


Figura 4.2.8: Aceleración del chasis en frenado.

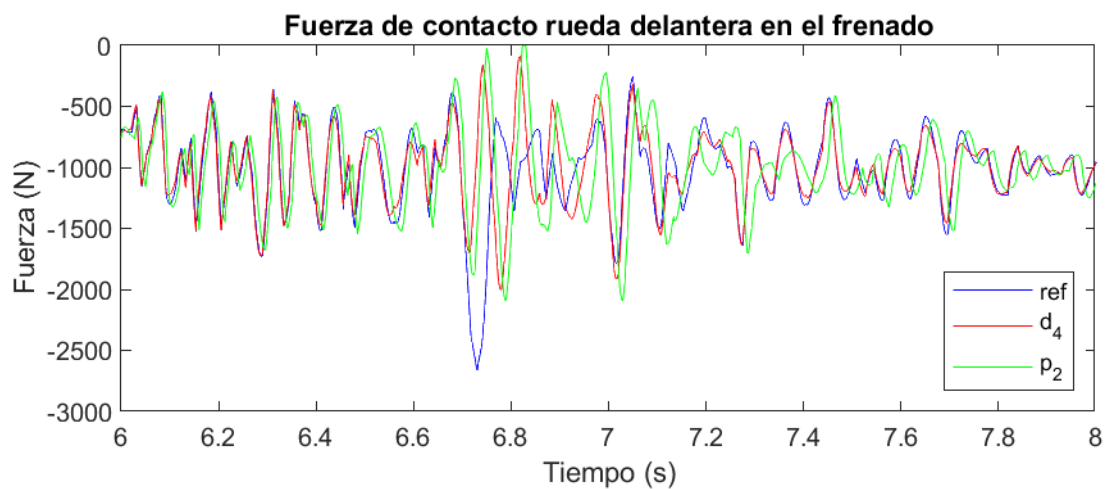
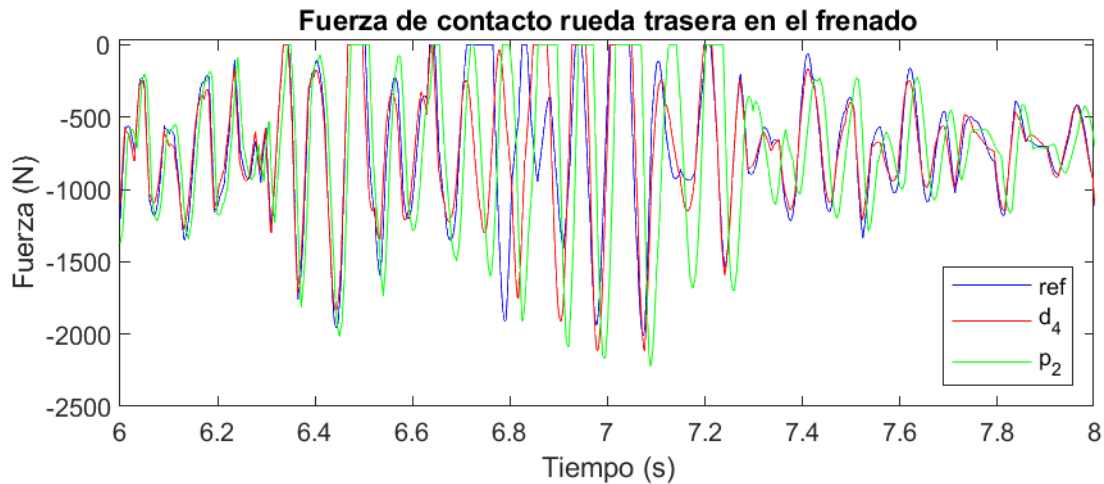


Figura 4.2.9: Fuerzas de contacto de la rueda delantera en frenado.



**Figura 4.2.10:** Fuerzas de contacto de la rueda delantera en frenado.

### 4.3 Conclusiones.

En este capítulo realiza el análisis de sensibilidad del Fastbike, donde se logra obtener las variables de la suspensión que más afectan al comportamiento de la motocicleta. Del análisis del giro, las precargas toman un valor importante ya que cambian el cabeceo de la motocicleta. Y en específico en la adherencia, las demás variables modifican mínimamente el comportamiento de la motocicleta. Por otro lado, en el confort se ve como la modificación el amortiguador trasero toma mayor relevancia.

En el caso de frenado la mayoría de las variables de la suspensión la empeoran, salvo la compresión delantera y extensión trasera, que dependiendo de lo se busque (confort o adherencia) mejorará en mayor medida una u otra.

Finalmente, al comparar las dos situaciones existe una diferencia en la magnitud del comportamiento de la motocicleta, donde en frenado son mayores que en el giro, esto debido a cómo afecta el ruido a las suspensiones.

# Capítulo 5

## Resultados

En este capítulo se expondrán los resultados obtenidos de las diferentes simulaciones. Donde, se procederá a la búsqueda de las variables óptimas mediante la optimización multiobjetivo y después obtener las correlaciones mediante el valor de Spearman.

### 5.1 Formulación de la optimización.

La optimización se realiza mediante lo descrito en el Capítulo 2, donde se busca una optimización multiobjetivo, mediante la minimización de las aceleraciones del chasis y fuerzas de contacto de las ruedas con el piso. El código escrito para realizar la optimización de muestra en el ANEXO E.

Para la optimización se requieren optimizar simultáneamente, los  $J_1$  y  $J_2$  para confort y adherencia en frenado respectivamente, y  $J_3$  y  $J_4$  para Confort y Adherencia para el giro. La ecuación 2.6.13 muestra los parámetros de simulación en donde las variables se modifican en un rango  $\pm 20\%$  y entre un 0 y 0,03 m la precarga.

$$\begin{aligned} \min_{x \in R^n} f(x) \\ X \in x \end{aligned} \tag{5.1.1}$$

donde:

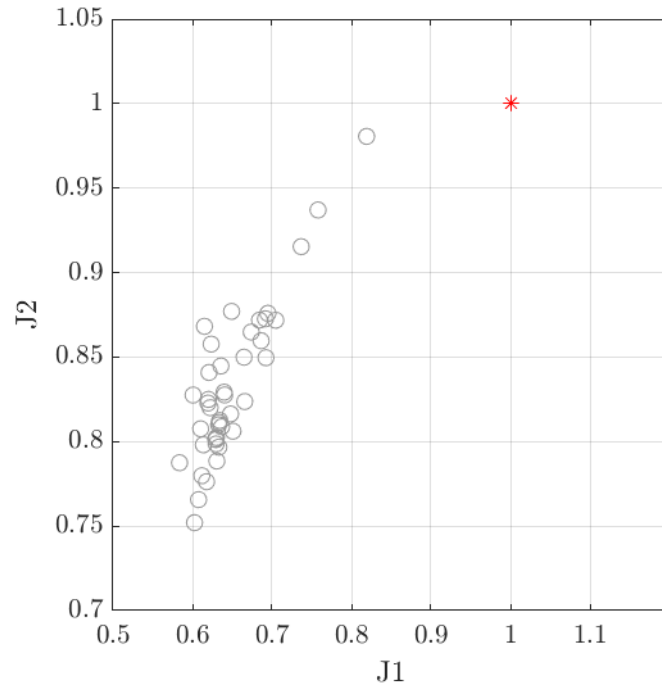
$$\begin{aligned} f(x) &= [J_1, J_2, J_3, J_4] \\ x &= [d_1, d_2, d_3, d_4, s_1, s_2, p_1, p_2] \\ X : 0,8x_i &< x_i < 1,2x_i, \quad i = \{1, \dots, 6\} \\ X : 0 &< x_i < 0,03, \quad i = \{7, 8\} \end{aligned}$$

### 5.2 Resultados de la optimización.

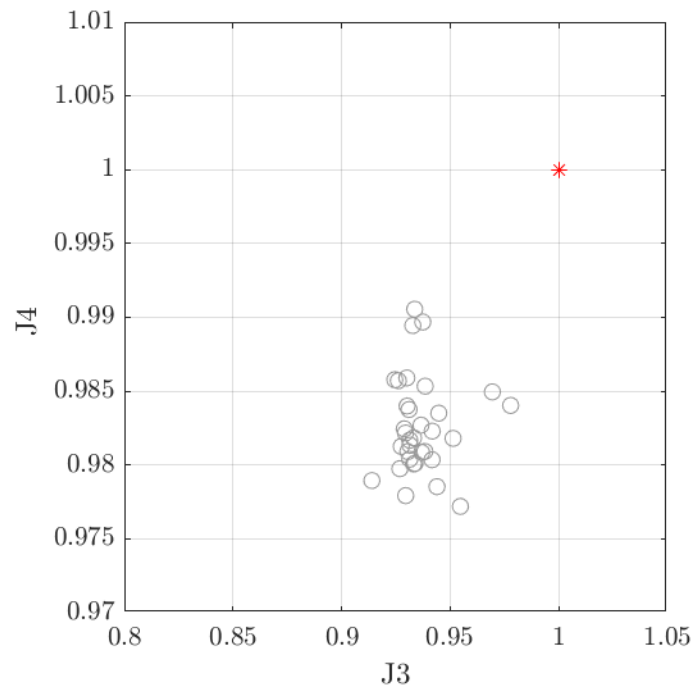
Debido a que la Frontera de Pareto obtenida es de 4 objetivos, por lo que su representación es en 4D, su visualización es complicada, es por esto que se toman dos vistas principales. En la Figura 5.2.1 se muestra la vista de la Frontera de Pareto del Confort ( $J_1$ ) versus Adherencia ( $J_2$ ) en frenado. Y en la Figura 5.2.2  $J_3$  el Confort y  $J_4$  la adherencia para el giro. Cada círculo en el Frente de Pareto representa un óptimo obtenido en la simulación el cual al modificar cualquiera de las variables de la suspensión empeorarían uno u otro objetivo. También en las Figuras antes mencionadas, los puntos de optimización se alejan del punto de referencia (1,1), lo que implica que todo la Frontera de Pareto mejora la configuración inicial de la motocicleta.

En la Figura 5.2.1, se observa que, para la Frontera de Pareto de frenado, el punto más óptimo en la adherencia está a un 25% alejado de la referencia y el confort un 40%. Mientras que en la Frontera de Pareto en el giro (Figura 5.2.2), los cambios son menores, cerca de un 2% en

adherencia y 7% en confort con respecto a la referencia. Esto está relacionado con lo mostrado en el análisis de sensibilidad donde los cambios son menores en giro que en frenado.



**Figura 5.2.1:** Frontera de Pareto de la adherencia versus confort para el frenado.



**Figura 5.2.2:** Frontera de Pareto de la adherencia versus confort para el giro.

En la Tabla 5.2.1 se muestran ejemplos de configuraciones óptimas de la suspensión para adherencia en frenado y giro.

**Tabla 5.2.1:** Configuraciones óptimas de la suspensiones

Configuración óptima de la suspensión para adherencia en frenado							
$d_1$	$d_2$	$d_3$	$d_4$	$s_1$	$s_2$	$p_1$	$p_1$
0,8242	0,9707	0,8483	0,8463	0,9853	0,8537	0,0158	0,0077
$J_1$	0,6026	$J_2$	0,7520	$J_3$	0,9337	$J_4$	0,9906
Configuración óptima de la suspensión para adherencia en giro							
$d_1$	$d_2$	$d_3$	$d_4$	$s_1$	$s_2$	$p_1$	$p_1$
0,9092	1,0109	0,8878	0,8504	0,9814	0,8183	0,0153	0,0035
$J_1$	0,6331	$J_2$	0,7967	$J_3$	0,9439	$J_4$	0,97859

Debido a que se dificulta la visualización de resultados de la Frontera de Pareto para múltiples objetivos, ya que en lugar de una Frontera se muestra una nube de óptimos, se hace un análisis correlaciones de todas las variables.

### 5.3 Análisis de las correlaciones.

La matriz de correlaciones mostrada en la Figura 5.3.1, muestra que tanta relación existe entre las variables de la suspensión optimizadas mediante La Frontera de Pareto, siendo 1 completamente relacionadas y  $-1$  inversamente relacionadas, para las dos situaciones de manejo en conjunto.

Tanto en las correlaciones entre los  $J_1$  y  $J_2$ , como las de  $J_3$  y  $J_4$  se espera que las relaciones sea inversamente proporcionales ya que varios autores, [4], [12] indican que no se puede tener buena adherencia sin tener perder en Confort o viceversa. Además, Thede, et al. (2010) [4] indican que tener tracción en la rueda y un buen confort no tienen sus óptimos a la par. Por lo tanto, dado el valor que se muestra en la matriz donde para  $J_1$  y  $J_2$  es de 0,25 y para  $J_3$  y  $J_4$  es prácticamente inexistente. Además, del análisis de sensibilidad existía una alta correlación entre la precarga delantera y trasera, pero en la matriz de correlaciones son bajas. Se llega a la conclusión que quizás la simulación esté mal implementada.

A continuación, se hicieron varias pruebas y unos de los principales problemas, es la poca robustez de los cambios hechos en el software Fastbike cuando hay muchas imperfecciones en el camino (off-road) que lleva a la motocicleta a andar en al límite del contacto de las ruedas al piso, si bien se demuestra en Cossalter, V (2009) [15] que el Fastbike funciona para caminos no tan irregulares, en otros tipos de caminos no es tan efectivo. Esto se debe a dos factores: (1) El PID del conductor no es el deseado ya que se necesita de una mayor capacidad de manejo para estos tipos de camino, ya que se tienen muchos saltos en donde la motocicleta se cae o sale volando. (se hicieron pruebas cambiando el PID pero no se llegó a buen resultado en el tiempo de realización del informe); (2) el modelo tiene muchos puntos donde no encuentra soluciones, es decir hay muchas veces en donde se pierden simulaciones debido a que el programa no puede llegar a una solución en ciertas combinaciones de valores de la suspensión, perdiendo así puntos que pudieran ser óptimos pero que la Frontera de Pareto no los tome como tal. Se llega a esta conclusión ya que al analizar las simulaciones donde el programa no puede resolverla, al cambiar en 0,0001 el valor de cualquier variable de una simulación en particular el software si es capaz de resolverla.

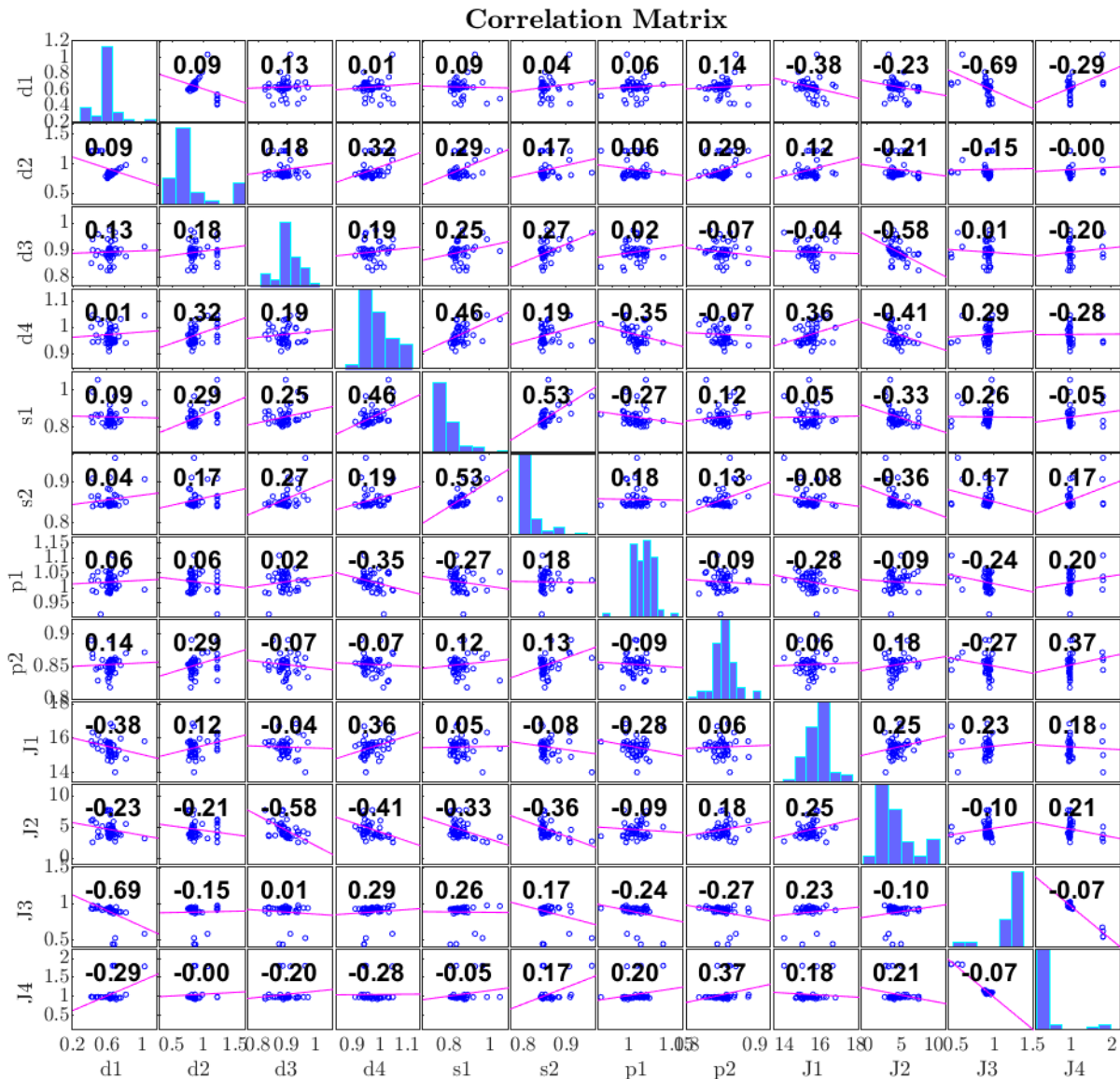


Figura 5.3.1: Matriz de correlaciones.

## 5.4 Conclusiones.

En este capítulo, se logra plantear y encontrar variables óptimas de la motocicleta para las situaciones de frenado y giro a la vez a través de la Frontera de Pareto, obteniendo mayores óptimos en frenado que en giro, que es coherente con el análisis de sensibilidad. Luego, para una mejor visualización de resultados, se hace una matriz de correlaciones, en donde no se pudo llegar a un resultado esperado. Esto se debe en mayor medida a la robustez del software y el PID del conductor. Aunque, para caminos normales el Fastbike funciona, al agregar caminos con muchas irregularidades (como lo son los off-road) es necesario tener un PID del conductor más flexible a los saltos que realice la motocicleta para que no pierda su estabilidad muy seguido.

## Capítulo 6

### Conclusiones

Se logró optimizar las variables de la suspensión de una motocicleta off-road mediante la creación de un código mostrado en el ANEXO D y E, donde utiliza un algoritmo genético multiobjetivo, que emplea la Frontera de Pareto para encontrar un grupo de puntos óptimos de estas variables. Así se pudo estudiar mediante un análisis de sensibilidad que variables afectan más y cuales menos el desempeño de la motocicleta en diferentes situaciones de conducción.

En primer lugar, entender el funcionamiento de la motocicleta en diferentes tipos de caminos es vital para poder evitar accidentes y tener buenas sensaciones al momento de manejar. Por una parte, se tienen las competiciones en caminos off-road, caminos con muchas imperfecciones que llevan al conductor a estar cerca de perder la tracción en las ruedas o incluso perderla, así que una moto optimizada para Adherencia hace que el tiempo sin tracción en las ruedas disminuya. Por otro lado, una motocicleta de ciudad se utiliza para caminos sin muchos defectos y para tramos más largos, hacen que sean razonables priorizar el confort a la adherencia. Dado esto se buscó comprender el funcionamiento de las motocicletas, la cual se logra con los libros de *motorcycle design* [13] y *Motorcycle suspensión Bible* [4].

Además, se logra cumplir con el segundo objetivo, ya que se pudo rehacer el código en Matlab en el cual se hicieron modificaciones para arreglar errores y agregar los cambios en la suspensiones, y así hacer simulaciones para la motocicleta KTM 450 SX-F en un camino off-road. A la par, se obtuvieron las variables que gobiernan a las suspensiones de esta motocicleta y también a las regulaciones de estas.

Luego, para el siguiente objetivo, donde se buscaba realizar un análisis de sensibilidad para tener primeras observaciones de cómo se optimizan las suspensiones, se realiza el análisis de sensibilidad del modelo modificando un  $\pm 10\%$  cada variable de la suspensión. Donde se observó que, si se comparan los cambios del frenado y el giro, los de este último son menores debido al rolido. Por otro lado, en el giro, modificar el cabeceo implica un cambio sustancial en el comportamiento de la motocicleta. En cambio, en el frenado, se ven más cambios en el comportamiento en la regulación de la compresión delantera y extensión trasera. En adición, se observa como es el mejoramiento o empeoramiento de las fuerzas de contacto o las aceleraciones del chasis.

Finalmente, se logra plantear y encontrar las variables óptimas que modifican el desempeño de la motocicleta para las 2 situaciones de manejo mediante la función gamultiobj. Luego, para una mejor visualización se hace una matriz de correlaciones donde no se pudo llegar a un resultado favorable en las correlaciones debido a los problemas de robustez de software, dado que se producen muchos puntos en donde la moto se cae o vuela, debido probablemente a como se hizo el modelo o el PID del conductor no está muy refinado. Cabe destacar que estos problemas solo se encuentran en la modificación para que la simulación corra en caminos off-road, debido a las muchas irregularidades que se encuentran en estos tipos de perfil.

Si bien no se logra encontrar las correlaciones, esta memoria propone una forma de encontrar



configuraciones óptimas de la suspensiones de la motocicleta en caminos off-road, y mejora errores encontrados en trabajos anteriores.

### **6.1 Trabajos futuros.**

Para trabajos futuros, como ya se mencionó con anterioridad, mejorar el sistema del conductor mejoraría la robustez del software, teniendo en cuenta como los pilotos se mueven en estos tipos de terrenos y que fuerzas y torques transmiten para mantener la estabilidad.

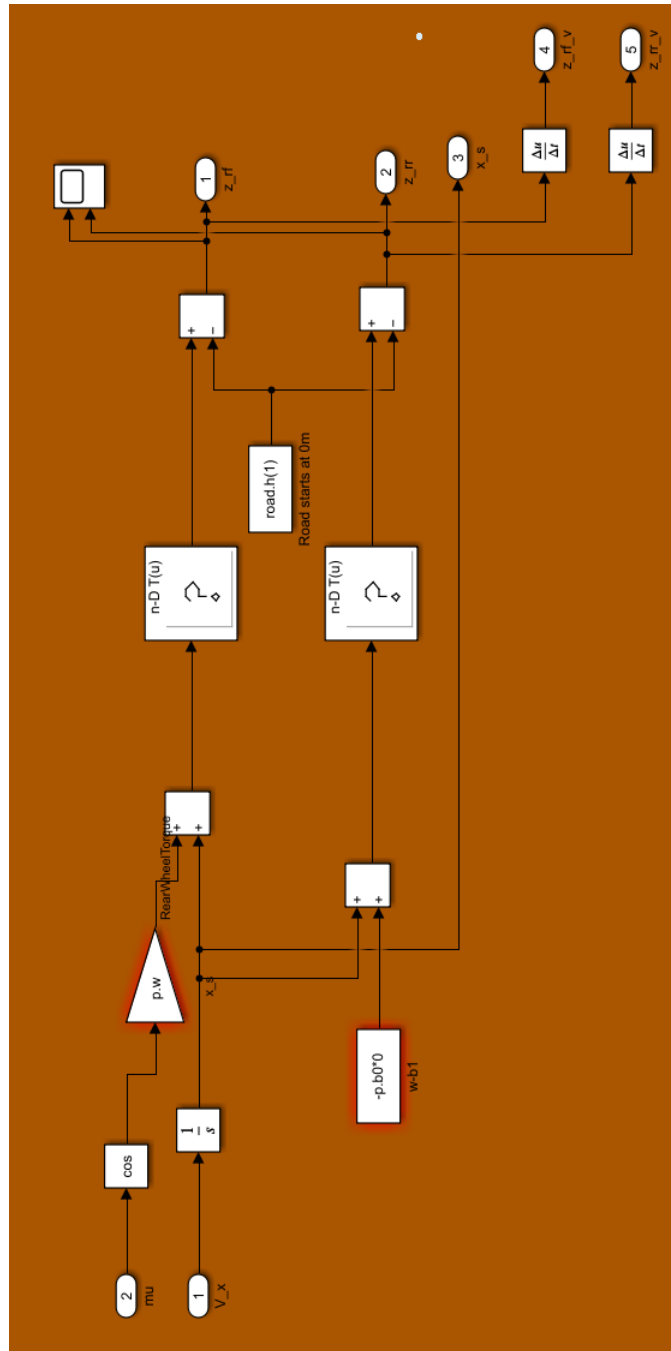
Los modelos con inteligencia artificial pueden ser de gran ayuda para estos problemas, donde un modelo convencional puede fallar bastante, una IA puede encontrar una forma de simulación más cercana a la realidad sin puntos muertos de simulación.

## Bibliografía

- [1] Cl Brakes. ¿cómo elegir las pastillas de freno de adecuadas para tu moto off-road?
- [2] R. Ruiz. 6 motos trail para hacer offroad de verdad.
- [3] KTM. Manual de instrucciones ktm 450 sx-f. 2016.
- [4] Poul Thede and Lee Parks. Motorcycle suspensión bible. 2010.
- [5] Internacional Organization for Standardization. Iso 8608, mechanical vibration - road surface profiles - reporting of measured data, the organization. 2016.
- [6] Lot R. Cossalter, V. and F. Maggio. A multibody code for motorcycle handling and stability analisis with validation and example of application. *SAE Technical Paper*, 2003.
- [7] smotos. Ktm 450 sx-f : Base de las motos de musquin y webb.
- [8] Ed Youngblood. the birth of motocross 1924 through 1939.
- [9] Ed Youngblood. motocross goes international 1947 through 1965.
- [10] A.Thompsons. Optimun damping in a randomly excited non-linear suspensión. 1969.
- [11] D Limebeer and M Massaro. Dynamics and optimal control of road vehicles. *Oxford University Press*, 2018.
- [12] F Vasquez, R Lot, E Rustighi, and R Pegoraro. Correlations between parameters and performance in optimal suspensions of off-road motorcycles. 2020.
- [13] R Lot and J Sadauckas. Motorcycle design. 2021.
- [14] M Agostinacchio, D Ciampa, and S Olita. The vibrations induces by surface irregularities in road pavements - a matlab approach. 2013.
- [15] Dalla Tore G. Lot R . Cossalter, V. and M. Massaro. An advanced multi-body code for the analysis of motorcycle dynamics. 2009.
- [16] Matinu G. Doniselli C. Guglielmetto L. Gobbi, M. and E. Pisino. Optimal and robust design of a road vehicle suspension system. *Vehicle System Dynamics*, 33:3–22, 1999.
- [17] Kalyanmoy Deb. Multi-objective optimization using evolutionary algorithms. *John Wiley Sons, Ltd*, 2001.

# Apéndice A

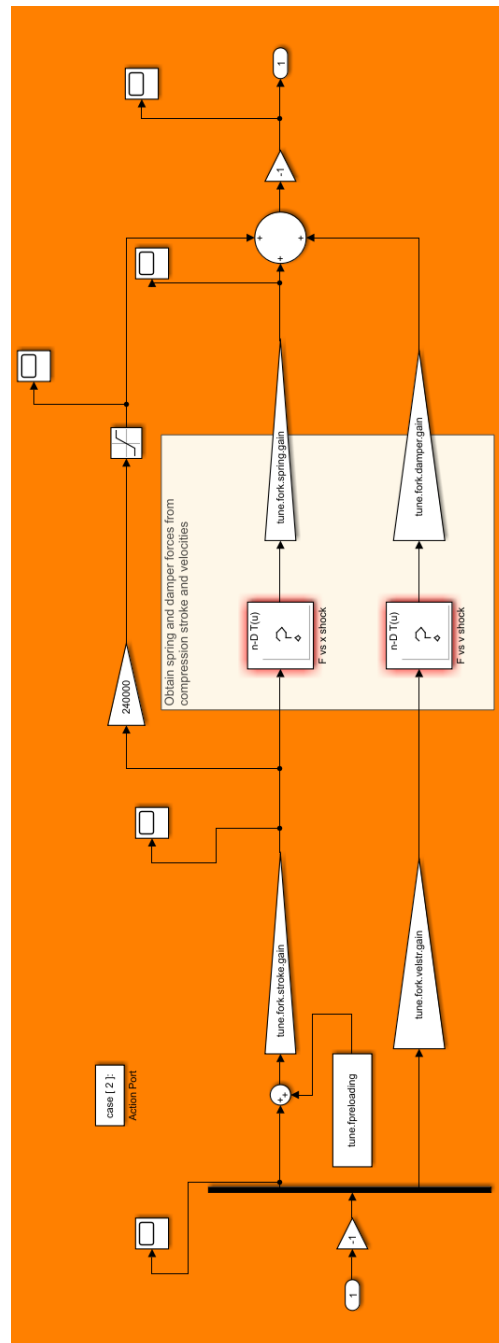
## Anexo A: Cambios en el Fastbike para implementar caminos off-road.



**Figura A.0.1:** subsistema en simulink para implementar caminos off-road en el Fastbike

## Apéndice B

### Anexo B: Cambios en el Fastbike para implementar las suspensión delantera



**Figura B.0.1:** subsistema en simulink para implementar la suspensión delantera en el Fastbike

## Apéndice C

### Anexo C: Cambios en el Fastbike para implementar las suspensión trasera

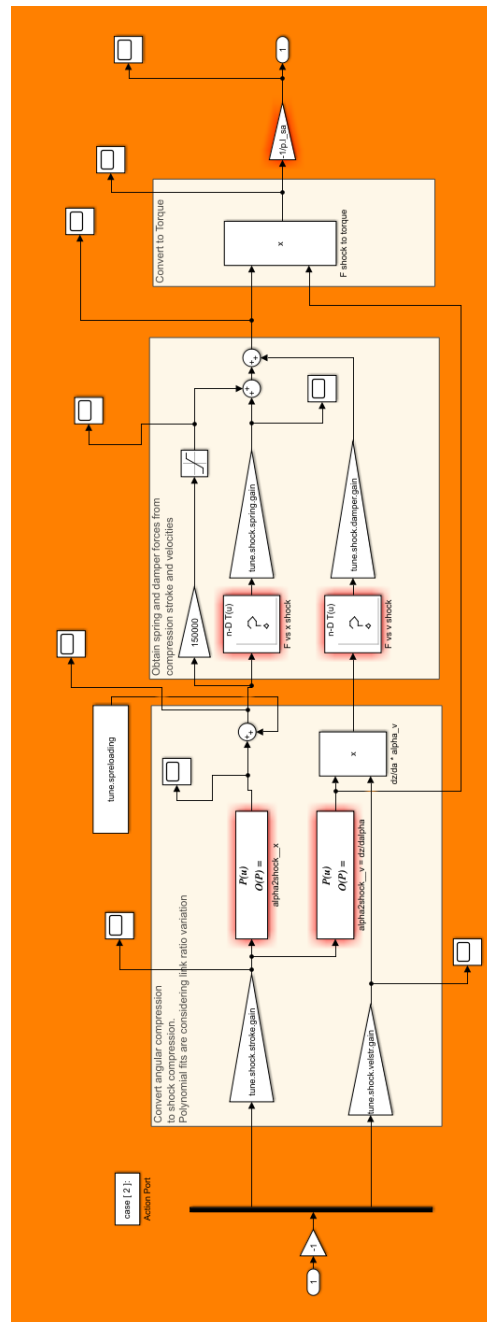


Figura C.0.1: subsistema en simulink para implementar las suspensión trasera Fastbike

# Apéndice D

## Anexo D: Código Matlab del modelo de la motocicleta.

```

function JJ = Cost_function_multicaminos_all(x, p, s, susp, tune, tyre, ma, all_road, FastBikeFolder, id, rider)

switch tune.susp_current_or_opti
case 'current'
    All_Outputs = multi_simulate_moto(x, p, s, susp, tune, tyre, ma, all_road, FastBikeFolder, id, rider);
case 'opti'
    [tune,susp] = suspension_variables( x, tune,susp);
    All_Outputs = multi_simulate_moto(x, p, s, susp, tune, tyre, ma, all_road, FastBikeFolder, id, rider);
end

%% 2 - Calculate Cost function
switch tune.cost_ref_or_norm
case 'ref!'
    All_Outputs = cost_function(All_Outputs,tune,ma,id);
case 'norm'
    All_Outputs = cost_function(All_Outputs,tune,ma,id);
    All_Outputs = cost_function(All_Outputs,tune,ma,id);
    All_Outputs = cost_function_normalized(All_Outputs, tune);
end

%% 3 - Decide Output
switch tune.salidas_all_or_soloJJ_or_normJJ
case 'all'
    JJ = All_Outputs;
case 'soloJJ'
    JJ = All_Outputs.JJ;
case 'normJJ'
    JJ = All_Outputs.JJn;
end
end

%% 1 - suspension variables
function [tune,susp] = suspension_variables( x, tune, susp)
% modificacion del damper
susp.fork.damper.f = [susp.damper_fneg * x(2) susp.damper_fpos * x(1)];
susp.shock.damper.f = [susp.sdamper_fneg * x(4) susp.sdamper_fpos * x(3)];
% modificacion del spring
tune.fork.spring.gain = x(5);
tune.shock.spring.gain = x(6);

```

Figura D.0.1: Código Matlab variables de la suspensiones parte 1

```

% modification preloading
tune.fpreload = x(7);
tune.spreload = x(8);

%d1=x1,d2=x2,d3=x3,d4=x4,s1=x5,s2=x6,p1=x7,p2=x8

end

%% 2 - Multi-simulación
function All_Outputs = multi_simulate_moto(x, p, s, susp, tune, tyre, ma, all_road, FastBikeFolder, id, rider)
    OldFolder = cd;
    cd(FastBikeFolder.dir);

    switch tune.simulation
        case 'all'
            %
            ma = id.br;
            road = all_road.br;
            myTimer = timer('StartDelay',20, 'TimerFcn', 'set_param( FastBikeFolder.file, 'SimulationCommand','stop')');
            for KpGain = 1:1
                start(myTimer);
                All_Outputs.br = sim( FastBikeFolder.file, 'SrcWorkspace', 'current', 'CaptureErrors', 'on' );
                stop(myTimer);
            end
            delete(myTimer);
            %
            ma = id.acc;
            road = all_road.acc;
            myTimer = timer('StartDelay',20, 'TimerFcn', 'set_param( FastBikeFolder.file, 'SimulationCommand','stop')');
            for KpGain = 1:1
                start(myTimer);
                All_Outputs.acc = sim( FastBikeFolder.file, 'SrcWorkspace', 'current', 'CaptureErrors', 'on' );
            end
    end
end

```

Figura D.0.2: Código Matlab variables de la suspensiones parte 2

```

%% 3 - Cost function calculation
function All_Outputs = cost_function(All_Outputs, tune, ma, id)

switch tune.simulation

case 'all'
    Nomb_situation = 'brr';
    All_Outputs = cost_simplify(All_Outputs,Nomb_situation,id,ma);
    %
    Nomb_situation = 'acc';
    All_Outputs = cost_simplify(All_Outputs,Nomb_situation,id,ma);
    %

otherwise
    Nomb_situation = tune.simulation;
    All_Outputs = cost_simplify(All_Outputs,Nomb_situation,id,ma);

end

end

%% 4 - Cost function normalized
function All_Outputs = cost_function_normalized(All_Outputs, tune)

if All_Outputs.JJ(1) == 2
    All_Outputs.JJ = [2 2 2 2];
end

All_Outputs.JJn = [2 2 2 2];
All_Outputs.JJn = All_Outputs.JJ ./ tune.JJref ;

if All_Outputs.JJn(1) > 2 || All_Outputs.JJn(2) > 2 || All_Outputs.JJn(3) > 2 || All_Outputs.JJn(4) > 2
    All_Outputs.JJn = [2 2 2 2];
    fprintf('Error 3: JJ was taller than 2 JJ = [2 2]\n')
end

if All_Outputs.JJn(1) < 0.4 || All_Outputs.JJn(2) < 0.4 || All_Outputs.JJn(3) < 0.4 || All_Outputs.JJn(4) < 0.4
    All_Outputs.JJn = [2 2 2 2];
    fprintf('Error 2: JJ was smaller than 0.4 JJ = [2 2]\n')
end

end

```

Figura D.0.3: Código Matlab variables de la suspensiones parte 3



```

end

%% 5 - Cost simplify
function All_Outputs = cost_simplify(All_Outputs,Nomb_situation,id,ma)
    if Nomb_situation == 'brcc'
        L = 1;
    elseif Nomb_situation == 'asc'
        L = 3;
    end
end

%
if contains(All_Outputs.(Nomb_situation).SimulationMetadata.ExecutionInfo.StopEvent, 'ReachedStopTime')
    ma.t1 = id.(Nomb_situation).t1; ma.t2 = id.(Nomb_situation).t2;
    tt = All_Outputs.(Nomb_situation).tout ;
    All_Outputs.(Nomb_situation).tt2 = tt( tt >= ma.t1 & tt <= ma.t2 );
    All_Outputs.(Nomb_situation).NF = All_Outputs.(Nomb_situation).Yre_Front.data( tt >= ma.t1 & tt <= ma.t2 ,3);
    All_Outputs.(Nomb_situation).Nr = All_Outputs.(Nomb_situation).Yre_Rear.data( tt >= ma.t1 & tt <= ma.t2 ,3);
    All_Outputs.(Nomb_situation).a3 = All_Outputs.(Nomb_situation).acceleration.data( tt >= ma.t1 & tt <= ma.t2 ,3);

    All_Outputs.JJ(L) = 0;
    All_Outputs.JJ(L + 1) = 0;
    All_Outputs.JJ(L) = rms2_int( All_Outputs.(Nomb_situation).tt2, All_Outputs.(Nomb_situation).a3 ) ;
    All_Outputs.JJ(L + 1) = rms2_int( All_Outputs.(Nomb_situation).tt2, All_Outputs.(Nomb_situation).Nr - id.(Nomb_situation).nf ) ;
end

else
    All_Outputs.JJ = [ 2 2 2 ];
    disp('-----')
    fprintf('%s There was an error on Simulink on time:\n',Nomb_situation)
    %disp(All_Outputs.(Nomb_situation).SimulationMetadata.ExecutionInfo.ErrorDiagnostic.SimulationTime)
    %disp('Error Identifier:')
    %disp(All_Outputs.(Nomb_situation).SimulationMetadata.ExecutionInfo.ErrorDiagnostic.Message)
    %disp('Action taken:')
    fprintf('JJ(%1,%1) = [ 2 2 ] \n',L,L+1)
    fprintf('%s \n',Nomb_situation)
    disp('-----')
end
end

```

Figura D.0.4: Código Matlab variables de la suspensiones parte 4

```

function All_Outputs = simulate_simplify(x, p, s, susp, tune, tyre, ma, all_road, FastBikeFolder, id, rider)
    ma = id.(tune.simulation);
    road = all_road.(tune.simulation);
    myTimer = timer('StartDelay',15, 'TimerFcn', 'set_param( FastBikeFolder.file, 'SimulationCommand','stop')');
    for KpGain = 1:1
        start(myTimer);
        All_Outputs.(tune.simulation) = sim( FastBikeFolder.file , 'SrcWorkspace','current','CaptureErrors','on' );
        stop(myTimer);
    end
    delete(myTimer);
end

```

**Figura D.0.5:** Código Matlab variables de la suspensiones parte 5

# Apéndice E

## Anexo E: Código en Matlab de la función gamultiobj

```

clc
clearvars
close all

%% Seleccionar carpeta
folder = './02_parametros';
folder2 = './03_caminos';
folder3 = './05_resultados';
folder4 = './06_rms';

addpath(genpath(folder));
addpath(genpath(folder2));
addpath(genpath(folder3));
addpath(genpath(folder4));

% directorio fastbike
FastBikeFolder.dir = './01_fastbike\05_FastBike_two_variable';
FastBikeFolder.file = 'FastBikeRTI_v3_GUI_two';

%% carga de los datos
p = load('moto_parametros_KTM');
rider = load('rider_parametros');
s = load('susp_linear_KTM');
tune = load('susp_tuning');
susp = load('ktm_susp_fits.2');
tyre = load('tyre_parametros');
all_road = load('multicaminos');
ma = load('manu_main');
id = load('inicial_datos');

%% simulacion
% situacion
situacion = "all"; %% brr o acc o all
n_itera = "v4";

%% 01 - Reference con 1 solo estado
disp('Simulink calculating reference values');
tic
tune.simulation = situacion;
tune.susp_current_or_opti = 'current';
tune.cost_ref_or_norm = 'ref';
tune.salidas_all_or_soloJJ_or_normJJ = 'all';
xktm = [1 1 1 1 0];
All_outs = Cost_function_multicaminos_all(xktm, p, s, susp, tune, tyre, ma, all_road, FastBikeFolder, id, rider);

```

Figura E.0.1: Función gamultiobj parte 1

<pre> save( './05_Resultados/ref_' + situation + n_itera ) toc </pre>	<pre> %% 02 jj Reference con todos los caminos disp('simulink calculating reference to normalize cost function:'); tic tune.simulation = situation; tune.susp_current_or_opti = 'current'; tune.cost_ref_or_norm = 'ref'; tune.salidas_all_or_soloJJ = 'soloJJ'; % ** have to be solo JJ xktm = [1 1 1 1 0 0]; All outs = Cost function_multicaminos_all(xktm, P, s, susp, tune, tyre, ma, all_road, FastBikeFolder.id,rider); tune.JJref = All_outs; toc </pre>
<pre> %% 03 Optimisation tic; format long; </pre>	<pre> disp('Multiobjective Optimisation started'); tune.simulation = situation; tune.susp_current_or_opti = 'opti'; tune.cost_ref_or_norm = 'norm'; % ** have to be norm tune.salidas_all_or_soloJJ_or_normJJ = 'normJJ'; ub = [1 1 1 1 1]* 1.2; %fork damper, shock dampre, fork spring, shock spring lb = [1 1 1 1 1]* 0.8; ub(7:8) = [0.02 0.02]; lb(7:8) = [0 0]; </pre>
<pre> % Cost function handle NL1414.Func = @(X) Cost_function_multicaminos_all(x, P, s, susp, tune, tyre, ma, all_road, FastBikeFolder.id,rider); % Plots while optimising NL1414.options = optimoptions('gamultiobj', 'PlotFcn', { @gplotpareto, @gplotsread} ); % Modify stopping criteria NL1414.options = optimoptions( NL1414.options, 'PopulationSize', 5, 'MaxGenerations', 3, 'MaxStallGenerations', 20, 'FunctionTolerance', 1e-3); NL1414.options = optimoptions( NL1414.options, 'PopulationSize', 20, 'MaxGenerations', 5, 'MaxStallGenerations', 100, 'FunctionTolerance', 1e-4); % Output function NL1414.options = optimoptions( NL1414.options, 'OutputFcn', @myout ); % run optimisation [NL1414.opt , NL1414.fval, NL1414.exflag, NL1414.output, NL1414.population, NL1414.scores] = gamultiobj(NL1414.func , 8, [], [], [], [], lb, ub, NL1414.options ); disp('MO NL1414 b ended'); save( './05_Resultados/_opt_NL_' + situation + n_itera ) toc </pre>	

Figura E.0.2: Función gamultiobj parte 2

```

% datos optimizados
%04 Calculate dynamics of optimal solutions
disp('Calculate and save dynamics of optimal solutions');
tic
    load( './05_Resultados/opt_NL_' + situation + n_itera )
    tune.simulation = situation;
    tune.susp_current_or_opti = 'opti';
    tune.cost_ref_or_norm = 'norm'; % ** have to be norm
    tune.out_all_or_soloJJ_or_normJJ = 'all';
    NL1414.All_outs = 0;

    for ii = 1 : length(NL1414.fval)
        x_opt = NL1414.opt(ii, :);
        NL1414.All_outs = Cost_function_multicaminos_all(x_opt, p, s, susp, tune, tyre, ma, all_road, FastBikeFolder,id,rider);
    end

    save( './05_Resultados/opt_NL_' + situation + n_itera )

toc
%
%
disp('Add reference situation to results structure');
tic
    load( './05_Resultados/ref_' + situation + n_itera, 'All_outs' );
    All_outs_ref = All_outs; clear All_outs
    load( './05_Resultados/opt_NL_' + situation + n_itera )
    save( './05_Resultados/opt_NL_' + situation + n_itera )
toc
function [state, options, optchanged] = myout(options, state, flag)
    optchanged = false;

    if state.Generation > 0
        load './05_Resultados/states_NL_all' state_all
    end
    state_all( state.Generation + 1 ) = state;
    save './05_Resultados/states_NL_all' state_all
end

```

Figura E.0.3: Función gamultiobj parte 3