



ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS INDUSTRIALES Y DE TELECOMUNICACIÓN

Titulación:

INGENIERÍA INDUSTRIAL

Título del proyecto:

OPTIMIZACIÓN DE PARÁMETROS PRINCIPALES Y CÁLCULO DE
CARGAS DE UNA MOTOCICLETA DE COMPETICIÓN

MEMORIA

Ibai Irigoyen Ulayar

César Díaz de Cerio

Pamplona, 2 de Marzo de 2010

1. ÍNDICE

1.ÍNDICE.....	- 2 -
2. OBJETIVOS	- 5 -
3 ANTECEDENTES	- 6 -
3.1. MOTOSTUDENT.....	- 6 -
3.1.1. LA COMPETICIÓN	- 6 -
3.1.2 EL EQUIPO	- 6 -
3.1.3. FASES DE LA COMPETICIÓN	- 8 -
4. DATOS DE PARTIDA	- 11 -
4.1 REGLAMENTO TÉCNICO	- 11 -
4.2. PIEZAS	- 16 -
4.3. MOTOCICLETA DE REFERENCIA	- 17 -
4.3.1. HONDA RS 125	- 17 -
4.3.2. APRILIA RS 125 2008	- 18 -
5. GEOMETRÍA GENERAL.....	- 20 -
5.1. FUNCIÓN E HISTORIA.....	- 20 -
5.2 CONSIDERACIONES GEOMÉTRICAS.....	- 23 -
5.2.1. GEOMETRÍA BÁSICA DE LA MOTOCICLETA	- 23 -
5.2.2. AVANCE	- 24 -
5.2.3 LANZAMIENTO (inclinación del ángulo de la dirección).....	- 28 -
5.2.4. DISTANCIA ENTRE EJES.....	- 38 -
5.2.5. DIÁMETRO DE LAS RUEDAS.....	- 40 -
5.2.6. PESO (MASA) Y SU POSICIÓN	- 41 -
5.3. ELECCIÓN INICIAL DE LOS PARÁMETROS.....	- 48 -
5.3.1. CENTRO DE GRAVEDAD ÓPTIMO	- 49 -
6. OPTIMIZACIÓN DEL LAYOUT DE LA MOTO POR EL MÉTODO DE MANIOBRA ÓPTIMA	- 52 -
6.1. INTRODUCCIÓN.....	- 52 -

6.1.1. SOLUCIÓN AL PROBLEMA DE CONTROL ÓPTIMO	54 -
6.2. VALIDACIÓN DEL MODELO DEL PROTOTIPO	57 -
6.2.1. INPUTS.....	58 -
6.2.1.1. Motorcycle	59 -
6.2.1.2. Track.....	63 -
6.2.2. RESULTADOS	65 -
6.2.3. COMENTARIOS	67 -
6.3. ANÁLISIS PARAMÉTRICO.....	69 -
6.3.1. DISEÑO DE EXPERIMENTOS.....	70 -
6.3.1.1. Introducción	70 -
6.3.1.2. Nociones generales	72 -
6.3.1.3. Análisis de varianza de tres factores a dos niveles (2^3).....	75 -
6.3.2. DETERMINACIÓN FINAL DE LAS VARIABLES GEOMÉTRICAS	94 -
6.3.3. OTROS PARÁMETROS DE INTERÉS	106 -
7. ANÁLISIS DE ESFUERZOS	110 -
7.1. CÁLCULOS TEÓRICOS	110 -
7.1.1 MOVIMIENTO RECTILÍNEO	111 -
7.1.1.1 Fuerzas de resistencia aerodinámica	111 -
7.1.1.2. Fuerzas verticales en estado estacionario.....	113 -
7.1.1.3. Fuerza de resistencia causada por la pendiente de la carretera.....	114 -
7.1.2. EQUILIBRIO EN ESTADO ESTACIONARIO	114 -
7.1.3. MOVIMIENTO LINEAL TRANSITORIO.....	116 -
7.1.3.1. Aceleración	117 -
7.1.3.2. Frenada	124 -
7.1.4. CURVA EN ESTADO ESTACIONARIO.....	127 -
7.1.4.1. Inclinación de la moto en giro estático	128 -
7.1.4.2. Comportamiento direccional de la moto en el giro.....	131 -
7.1.4.3. Fuerzas en curva.....	134 -
7.1.5. CONCLUSIÓN	135 -
7.2. CARGAS DINÁMICAS OBTENIDAS MEDIANTE XOPTIMA.....	135 -

7.3. COMPARACIÓN	- 140 -
7.4. CARGAS DEBIDAS A LAS IRREGULARIDADES DEL SUELO	- 142 -
7.4.1. MONO-SUSPENSIÓN CON UN GRADO DE LIBERTAD	- 142 -
7.4.1.1. <i>Movimiento Oscilatorio impuesto por las irregularidades de la carretera ..</i>	- 142 -
7.4.1.2. <i>Confort de pilotaje</i>	- 145 -
7.4.1.3. <i>Aceleración vertical</i>	- 146 -
7.5. CARGAS FINALES PARA UTILIZAR EN EL ANÁLISIS FEM	- 154 -
8. BIBLIOGRAFÍA	- 157 -

2. OBJETIVOS

El objetivo general que se pretende alcanzar con la realización de este proyecto, consiste en el diseño del chasis de una motocicleta de competición de 125 cc y con un motor de 2 tiempos.

Por un lado se trata de optimizar los parámetros principales de la moto. Estos parámetros son básicamente geométricos que influyen directamente en el comportamiento de la motocicleta. La correcta elección de estos parámetros es esencial para que la motocicleta responda de manera exitosa en las condiciones que se verá involucrada.

Para ello se han de estudiar uno a uno los distintos efectos de cada parámetro, analizando y valorando las ventajas y desventajas que se presentan según el valor elegido para cada parámetro, y comparándolas entre sí. Todo ello con el objetivo de dar con la mejor solución que permita alcanzar los fines perseguidos. Esto supone un intenso proceso no solo de información, investigación y recopilación de información de diversas fuentes sino también de exigentes estudios mediante un software ingenieril, que permitan obtener el conocimiento suficiente para poder realizar la elección de modo acertado.

Una vez definidos los parámetros más importantes se llevará a cabo el cálculo de cargas de la motocicleta. Para el cálculo de las máximas cargas habrá que considerar las situaciones más exigentes para la motocicleta, es decir situaciones extremas donde más sufrirá la moto. Para esta labor se utilizará tanto teoría de ingeniería de motocicletas como un software multi-body. Tras conocer las cargas de la motocicleta habrá que trasladarla dichas cargas al chasis de la motocicleta.

Hay que mencionar, que debido a la magnitud que representa el diseño entero de un chasis, este proyecto no alcanzará todo el proceso de diseño sino que parte de ella. Como se ha mencionado anteriormente, este proyecto abarca desde la optimización de los parámetros principales hasta el cálculo de las cargas en la motocicleta.

La segunda parte del diseño del chasis se verá contemplado en otro proyecto fin de carrera realizado por un compañero mío, con el que he estado trabajando de manera conjunta. Esta segunda parte del diseño partirá de los resultados obtenidos en este proyecto. Basándose en los parámetros definidos se procederá a dibujar el chasis con las medidas adoptadas en un software CAD. Una vez este el dibujo finalizado y a partir de las cargas calculadas en este proyecto se llevará a cabo un análisis de elementos finitos, con el que se pre-dimensionará el chasis y permitirá dibujar dicho chasis en detalle para poder mandarlo a fabricar.

3 ANTECEDENTES

Este proyecto surge como consecuencia del diseño de una moto de competición, el cual engloba el diseño de una gran cantidad de sistemas y mecanismos que la componen, entre los que se encuentra el diseño del chasis, objeto particular de este proyecto.

A continuación se va a explicar algo más sobre el origen de este macro-proyecto, para permitir una mejor comprensión del marco en que se desarrolla.

3.1. MOTOSTUDENT

Todo este proyecto se enmarca dentro de la competición MotoStudent promovida por Moto Engineering Fundation. Por ello se encuentra muy influenciado por todo lo establecido en esta competición.

3.1.1. LA COMPETICIÓN

Esta competición es un desafío entre equipos universitarios de distintas universidades españolas, europeas y del resto del mundo. Consiste en diseñar y desarrollar un prototipo de moto de competición de pequeña cilindrada 125 y 2 tiempos, que competirán con su evaluación pertinente, en unas jornadas que se llevarán a cabo inicialmente en las instalaciones de la Ciudad del Motor de Aragón.

3.1.2 EL EQUIPO

El equipo que representa a la UPNA en esta competición, está constituidos por 11 estudiantes de esta misma universidad de las titulaciones de Ingeniería Industrial (II) e Ingeniería Técnica Industrial Mecánica (ITIM):

Nombre	Titulación	Curso
Ángela Cildoiz Guembe	ITIM	3
María Cildoiz Guembe	ITIM	3
Xabier Arteta Erviti	II	5
Ignacio Arenaza Borja	ITIM	3
Maite Apesteguía Amoraza	ITIM	3
Ernesto Limousin Aranzabal	II	5
Unai Zabala Versteeg	II	5
Maite Arbeloa Murillo	II	5
Iria Coba Antón	II	5
Ibai Irigoyen Ulayar	II	5
Miguel Ángel Urgelles Asensio	II	5

Todos ellos cumplen con los requisitos impuestos por la Organización del evento para poder participar en la competición. Además el equipo se encuentra dirigido por dos profesores de la UPNA:

- José Sancho
- Cesar Diaz de Cerio

Y ha sido inscrito en la competición con el nombre de: ETSIIT-UPNaRacing, contando incluso con logotipo propio:



Figura 3.1

Además disponemos de un grupo de apoyo que participa de forma activa en el desarrollo técnico, pero sin estar inscritos oficialmente en la competición, que aportan conocimiento y ayuda al grupo oficial en el desarrollo de toda la competición.

3.1.3. FASES DE LA COMPETICIÓN

La competición tiene una duración de 18 meses en los que debemos plantear todo el escenario real de un equipo de motociclismo de competición.

Para ello los equipos partimos de un planteamiento realista donde, una vez establecidos los componentes del mismo, se debía buscar apoyo externo y, sobre todo patrocinadores que aportaran la financiación necesaria y/o equipos, componentes, apoyo técnico, asesoría, etc.

Una vez obtenido el importe mínimo necesario para asegurar la participación en la competición y justificado dicho soporte económico a la Organización, se ha pasado a la siguiente fase: diseño. En esta fase, en la que nos encontramos actualmente, debemos diseñar completamente la moto de competición (en mi caso únicamente parte del diseño del chasis) ciñéndonos escrupulosamente a un reglamento técnico y organizativo, cumpliendo los plazos fijados por la Organización, y ajustándonos a los recursos puestos a disposición del equipo por los patrocinadores.

Cuando consigamos finalizar todo el diseño en plazo y forma, deberá construirse y llevarse a la realidad dicho chasis y el resto de los componentes de la motocicleta. Con ayuda de nuestros colaboradores técnicos se llevará a cabo el ensamblado de la motocicleta y su correcta configuración o puesta a punto.

Finalmente llegará la fase de pruebas por parte de la Organización previamente a la realización de la carrera en un circuito de velocidad.

A lo largo de todo el proceso también será preciso realizar numerosas pruebas de diseños, componentes, y puesta a punto de un prototipo que permita realizar los ajustes pertinentes que garanticen una mínima competitividad de la moto durante la competición. Además también se deberá estar atento a las posibles modificaciones que pueda realizar la Organización respecto a cualquiera de los aspectos que engloban a la competición, ya que se encuentra abierta a cualquier tipo de reajuste en función de la marcha de los acontecimientos.

Las pruebas fijadas por la Organización son las siguientes:

- Presentación de justificación de sponsors. En la que los equipos participantes deben justificar de forma clara que empresas e instituciones sufragan la construcción del prototipo. Esta justificación debía presentarse antes del 8 de Mayo del 2009.
- Presentación de diseño cerrado. Antes del 31 de Marzo los equipos participantes presentarán a la Organización información gráfica en detalle del prototipo que será guardada por la Organización. Esta información deber permitir a los jurados, sin manipulación informática alguna, verificar los futuros prototipos. Esta documentación sólo será analizada por los jurados en las jornadas de competición y validarán que el prototipo presentado responde a esa información.
- Los grupos presentarán un prototipo para que sea revisado por los inspectores conforme a los aspectos dimensionales y de seguridad que indica el reglamento técnico.
- Por otra parte realiza una mínima prueba de funcionamiento en parque cerrado. La prueba consistirá en una prueba de arranque y parada y de maniobrabilidad a derechas e izquierdas entre 10 conos situados a 3 m de distancia.
- También presentarán en el stand preparado por la organización los paneles informativo que consideren convenientes.
- El proyecto industrial será definido ante un jurado de expertos elegidos por la organización.
- Las pruebas de seguridad en banco pretenden ser una garantía de robustez, fiabilidad y seguridad ante las pruebas en circuito. Así las motos deberán superar las siguientes pruebas:
 - Prueba de resistencia de chasis según especificaciones de reglamento técnico.
 - Prueba de frenada en banco de rodillos según especificaciones de reglamento técnico.
 - Análisis de gases de escape según especificaciones de reglamento técnico.

- Los equipos que hayan superado las pruebas de seguridad pondrán sus motos a disposición de profesionales de pruebas y ensayos elegidos por la Organización que harán una valoración de sus prestaciones en el circuito de velocidad. Cada moto será probada por un mínimo de tres pilotos, los cuales evaluarán:
 - Capacidad de frenada
 - Capacidad de aceleración
 - Maniobrabilidad
 - Estabilidad
 - Velocidad punta
- Carrera en el circuito de Alcañiz en donde las motos serán probadas por pilotos de categoría promoción seleccionados por la organización y sorteadas entre ellos.

Esquema del proceso de validación del prototipo:

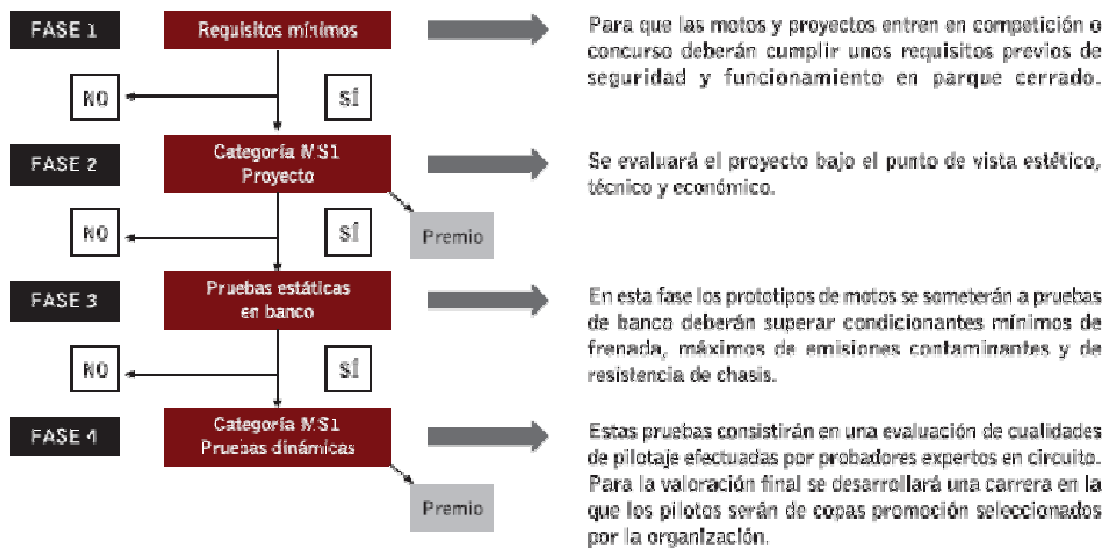


Figura 3.2

Más información a cerca de la competición MotoStudent y sobre todo lo que ello engloba, se encuentra descrito en el Reglamento Funcional redactado por la Organización, que aparece recogido en el Anexo I.

4. DATOS DE PARTIDA

A continuación se van a describir los datos de los que se dispone para iniciar el diseño del chasis de la motocicleta. Todo ello se encuentra relacionado con las pautas establecidas por la Organización, ya que es ella la que establece las especificaciones de partida para el diseño de todas las motos de competición que van a participar en la competición, definiendo las limitaciones y libertades que se poseen para que la moto sea validada y pueda competir en el evento.

4.1 REGLAMENTO TÉCNICO

La Organización ha establecido un reglamento técnico (Anexo II) que contiene la normativa técnica reguladora de la competición. Con él se pretende estandarizar y acotar la gran variedad de posibilidades que existe en la construcción de un prototipo de moto de competición. De este modo todos los proyectos presentados por las diferentes universidades inscritas en la competición se ajustarán a una línea de trabajo orientativa y común, posibilitando una competencia objetiva entre los participantes.

Por todo ello el primer paso a dar en la realización de este proyecto consistirá en el análisis detallado de dicho documento, para ser consciente de qué es lo que se puede y no se puede hacer respecto al diseño de la moto, y más concretamente del chasis estructural. Por tanto este estudio deberá centrarse principalmente, en las partes del Reglamento referentes a todos aquellos aspectos relacionados con las dimensiones o pesos límites de la motocicleta y tengan influencia en la realización de este proyecto.

Una vez analizado todo ello se pueden considerar las siguientes restricciones establecidas por la Organización que afectan directamente a la elaboración de este proyecto:

- **LA MOTOCICLETA.** Orientación general y definición del carácter

El objeto de la competición es un vehículo de dos ruedas a motor de combustión interna. Dicho vehículo será concebido para el pilotaje de un solo ocupante. La motocicleta deberá ser un prototipo diseñado y construido para la competición. La especialidad son las carreras de velocidad.

➤ REQUERIMIENTOS GENERALES DE DISEÑO

Dimensiones

Las dimensiones de la motocicleta son libres exceptuando algunos requisitos básicos:

La anchura mínima entre los extremos de los semimanillares (o manillar en su caso) ha de ser de 450 mm. (Figura 1)

El ángulo mínimo de inclinación lateral de la motocicleta sin que ningún elemento de la misma (exceptuando los neumáticos) toque el pavimento debe ser 50°. Dicha medición se realiza con la motocicleta descargada (sin piloto) pero con todo el equipamiento y líquidos para su funcionamiento. (Figura 1)

La distancia libre al pavimento con la motocicleta en posición vertical ha de ser de un mínimo de 100 mm en cualquier situación de compresión de suspensiones y reglajes de geometrías. (Figura 2)

Límite posterior: Ningún elemento de la motocicleta podrá rebasar la línea tangente vertical trazada a la circunferencia exterior del neumático trasero. (Figura 2)

La distancia de los neumáticos a cualquier elemento de la motocicleta diferente de la rueda no podrá ser inferior a 15 mm. en toda posición de la misma y reglaje de geometría.

La anchura máxima del asiento debe ser de 450 mm. No podrá sobresalir de esa anchura ningún otro elemento de la motocicleta del asiento hacia detrás excepto el sistema de escape. (Figura 3)

Pesos

El peso mínimo del conjunto de la motocicleta en orden de marcha incluido depósito, gasolina y líquidos en ningún momento de las pruebas deberá ser inferior a 90 kg. El peso se podrá verificar tanto al inicio, durante y final de la competición. Está permitido lastrar el vehículo para alcanzar el peso mínimo.

➤ CICLÍSTICA

Bastidor

El diseño, el proceso y el material utilizado para la fabricación del bastidor es libre excepto en las siguientes consideraciones:

No está permitido fabricar el chasis en titanio ni aleaciones de titanio. El bastidor definitivo a presentar en la competición deberá haber superado el proceso de homologación por parte de la organización. (Ver criterios de verificación). No se permite el uso de un chasis comercial ni tan siquiera una unidad modificada. Deberá tratarse de un chasis prototipo de fabricación propia.

➤ PROCEDIMIENTO DE VERIFICACIONES TÉCNICAS

Para el control y verificación de vehículos se creará una ficha para cada prototipo. Este documento será relleno por los verificadores técnicos en la fase previa a la competición. Una vez contrastados todos los apartados se deberá dar la calificación de “apto” para poder participar en las diferentes pruebas. Tras la verificación se fijará un adhesivo de la organización comprobante de la aceptación del prototipo.

Homologación del chasis

La organización se reserva el derecho de verificar el chasis mediante una prueba previa a la competición. Se habrá de presentar previo a la competición un estudio teórico de cargas sobre el chasis. La prueba se realizará en un potro de ensayo. Se aplicarán dos tipos de carga no simultáneas. Una carga horizontal progresiva de 250 daN longitudinalmente a la motocicleta en los ejes de rueda delantera y otra vertical de 200 daN. No se admitirán deformaciones permanentes en la estructura del chasis. Introducir sistema y dibujo de anclaje a las bridas de la tija para aplicar carga sistema de medición.

Verificación de cotas generales

Se medirán y supervisarán las cotas generales de diseño estipuladas en este reglamento.

Verificación de pesos

Se acondicionará un centro de verificaciones y controles donde los participantes podrán verificar su vehículo. Se podrá solicitar por la organización controles de pesos en cualquier fase de la competición. Los controles se realizarán sobre el vehículo en orden de marcha con todos sus sistemas y componentes además de los líquidos necesarios para su uso. Inicialmente se realizará una calibración del sistema de medida. Se realizarán tres pesadas del vehículo y la media de los tres resultados será el valor asignado. La tolerancia en la medida es 1 kg por debajo del mínimo.

Verificación del cumplimiento de la normativa de seguridad

Se realizará una verificación completa de cada uno de los puntos referentes a seguridad de cada uno de los apartados descritos en este reglamento. Por encima de cualquier criterio técnico a nivel de prestaciones o construcción del vehículo deberá prevalecer, como prioritario, la seguridad de los participantes. Para ello, todos los prototipos deberán cumplir los requisitos de seguridad en cualquier fase de la competición. De manera especial se hace hincapié en la verificación del vehículo tras haber sufrido un accidente con el fin de garantizar la seguridad del mismo.

Espacio en el bastidor para adhesivo de verificación técnica

Se deberá proveer al bastidor de un espacio mínimo de 70 mm de ancho por 40 mm de alto para la fijación del adhesivo de verificación de la organización. Si no directamente en el bastidor, se deberá habilitar una placa para la fijación del mismo.

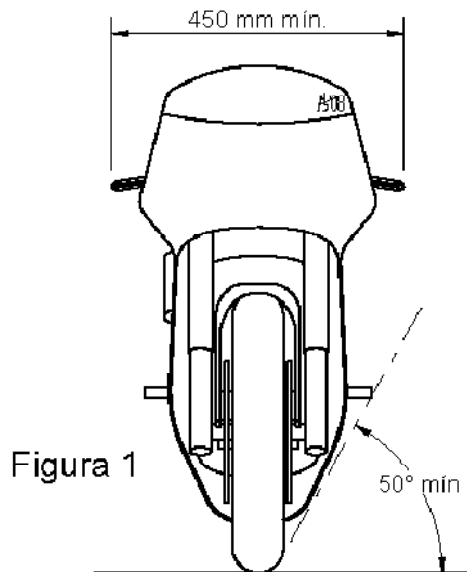


Figura 1

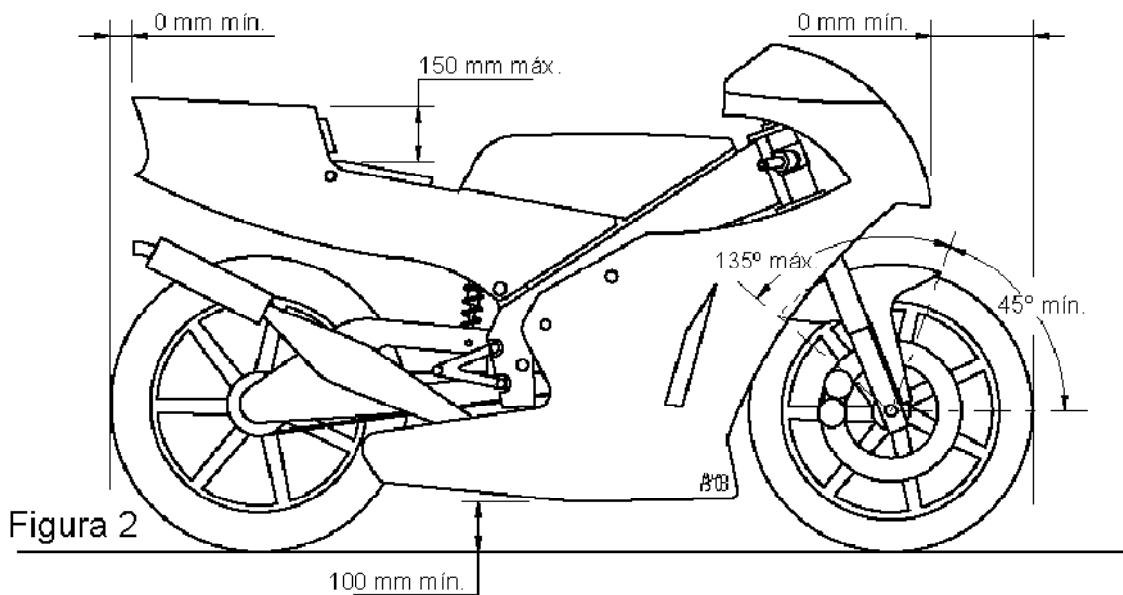


Figura 2

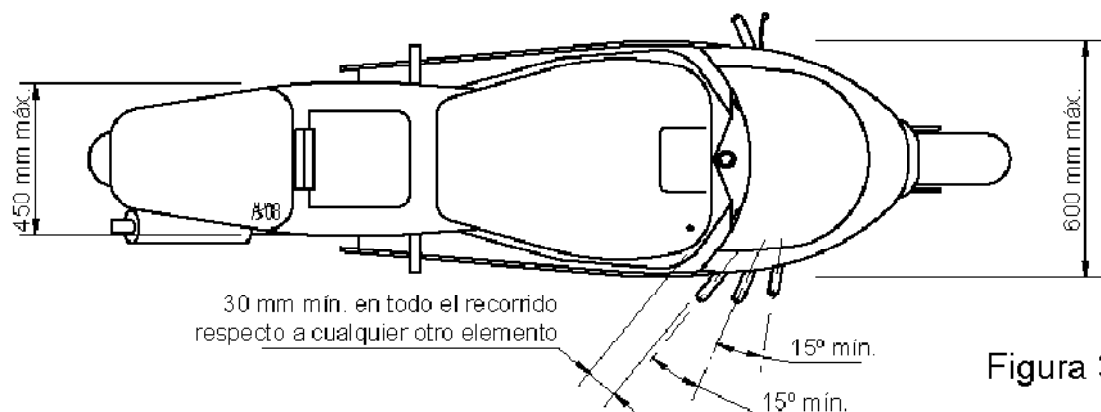


Figura 3:

4.2. PIEZAS

La Organización proporciona una serie de piezas que todos los modelos de motocicletas deben incorporar, en base a las cuales debe desarrollarse el resto del prototipo. Todo ello con el objetivo de proporcionar un punto de partida común para todos los equipos, que facilite el inicio el diseño global de la motocicleta, de modo que todos los prototipos se ajusten a una línea de trabajo orientativa y común, posibilitando una competencia objetiva entre los participantes.

Las piezas proporcionadas por la Organización son:

- Motor
- ECU
- Bujía
- Palanca de cambios
- Bobina
- Pipa
- Horquilla delantera
- Amortiguador trasero
- Sistema de frenos:
 - o Bomba
 - o Pinza delantera
 - o Pinza trasera
 - o Maneta
- Llantas
- Neumáticos

Ninguna de ellas está relacionada directamente con el chasis ya que como especifica el reglamento técnico se trata de realizar un chasis prototipo de diseño y fabricación propia. Por lo tanto no haré más hincapié en las piezas proporcionadas por la competición ya que carecen de importancia en el diseño del bastidor.

4.3. MOTOCICLETA DE REFERENCIA

A la hora de iniciar el diseño de la motocicleta en general, será muy útil analizar primero las características de motocicletas similares. Se deben de coger como referencia motocicletas de competición y no las comerciales ya que las dimensiones de unas y otras varían bastante. Las motos comerciales están pensadas para que sean fáciles y cómodas de conducir, mientras que en las de competición se buscan motocicletas más agresivas en las que el manejo pueda resultar más complicado pero con un mayor rendimiento.

De esta manera el conocimiento de los parámetros generales de las motocicletas de referencia, servirán como base y tendrán carácter orientativo a lo largo de todo el proceso de diseño. Así se podrá comparar los parámetros obtenidos en el diseño con valores de parámetros reales de motocicletas muy competitivas y de un comportamiento excepcional. Las motocicletas de referencia son de 125cc que participan en carreras de velocidad. Se pondrá especial atención en las dimensiones geométricas ya que son las dimensiones a definir en este trabajo.

4.3.1. HONDA RS 125

Esta motocicleta participa en el campeonato PreGP, es un campeonato a nivel nacional en la que la motocicleta ha obtenido unos resultados fabulosos:



A continuación aparece un cuadro con la ficha técnica de la motocicleta correspondiente:

HONDA RS	
Altura general	995 mm
Anchura general	570 mm
Longitud general	1800 mm
Altura asiento	700 mm
Peso (vacío)	71,5 kg
Capacidad tanque	14 litros
Ángulo lanzamiento	23,3º
Avance	84 mm
Inclinación cilindro (vertical)	40º
Batalla	1215 mm

4.3.2. APRILIA RS 125 2008

La siguiente motocicleta participa en el mundial de velocidad y los datos obtenidos son referidos al modelo del 2008. Es una motocicleta que participa en la cilindrada de 125 en la competición de más alto nivel.



A continuación aparece un cuadro con la ficha técnica de la motocicleta correspondiente:

APRILIA RS 2008	
Altura anterior	807 mm
Altura posterior	795 mm
Longitud basculante	530 mm
Altura asiento	720 mm
Offset tija	35mm
Capacidad tanque	14 litros
Ángulo lanzamiento	23,7 °
Avance	88 mm
Batalla	1224 mm

5. GEOMETRÍA GENERAL

Antes de comenzar con los parámetros geométricos de la motocicleta, se realizará una breve descripción sobre conceptos básicos a considerar en la ingeniería de motocicletas.

5.1. FUNCIÓN E HISTORIA

Manejabilidad

La manejabilidad nos indica la facilidad, el estilo y el tacto con que la motocicleta responde a nuestras acciones. Depende fundamentalmente de la geometría, la rigidez del chasis, el peso y su distribución y del tipo de neumáticos y su tamaño. Puede que para algunas personas resulte sorprendente saber que el piloto tiene una gran influencia sobre las características de manejabilidad de una motocicleta. Las respuestas del piloto tienen un gran efecto sobre la interacción global de las fuerzas dinámicas que controlan el movimiento de la moto.

Adherencia o agarre a la carretera

Indica la aptitud de la motocicleta para mantenerse en contacto con el suelo a través de los neumáticos. Depende principalmente del tipo de neumáticos y su tamaño, de las características de la suspensión, del peso y su distribución, y de la rigidez que existe entre ambas ruedas para que puedan mantener la relación correcta entre ellas. En la época en que los neumáticos eran relativamente estrechos, los términos adherencia y manejabilidad normalmente iban cogidos de la mano, por lo que su uso era intercambiable. Hoy en día los requerimientos son a veces contradictorios y es necesario encontrar un compromiso que esté en función del uso que se le quiera dar a la moto.

Estabilidad

Existen muchos tipos de estabilidad o inestabilidad que pueden influir en una moto. La estabilidad referida a “mantener el equilibrio”, la estabilidad aerodinámica, etc. La palabra estabilidad está definida de forma rigurosa en Sistemas de Control. Pero para nuestros propósitos actuales, la estabilidad es:

- La aptitud para mantener la maniobra propuesta (por ejemplo continuar en línea recta o trazar una curva) sin que exista una tendencia inherente a desviarse de la trayectoria elegida. Esto incluye explícitamente la ausencia de wobbles o weaves.
- La aptitud para volver a la maniobra propuesta cuando alguna fuerza externa produce una perturbación (por ejemplo un bache, viento lateral, etc.).

La manejabilidad, la adherencia y la estabilidad pueden verse afectadas por muchos parámetros y por la interacción entre ellos. El tema es complejo pero tampoco es que sea cuestión de magia, y (a juzgar por los diseños de algunos chasis) no ha estado siempre bien comprendido. De todas formas, existen unas cuantas leyes físicas, relativamente simples, que siempre hay que cumplir. En este libro intentaré eliminar la magia, analizando los parámetros principales implicados y estudiando los diversos efectos que producen. Debo subrayar que existen muchas interrelaciones entre estos efectos – no existe la combinación “correcta” o el diseño “perfecto”. Cualquier motocicleta contiene varios compromisos fundamentales.

Movimientos lineales y angulares

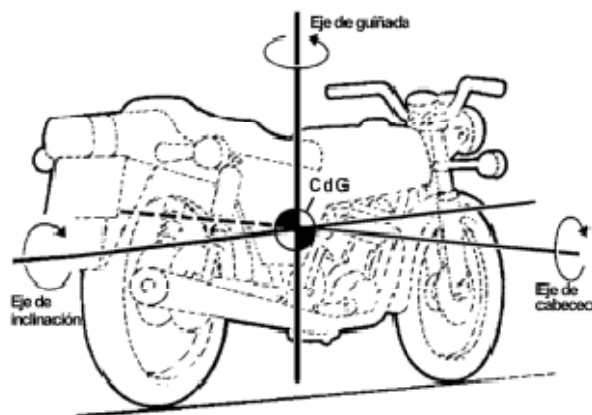
Si vamos a estudiar el comportamiento de cualquier tipo de vehículo, primero necesitaremos considerar cómo se puede mover. Los movimientos lineales se pueden visualizar fácilmente, la moto se puede mover hacia delante y el motor y los frenos son los responsables de controlar el movimiento. Las ondulaciones de la carretera y las subidas y bajadas producen un movimiento en dirección vertical, mientras que el viento lateral produce movimientos laterales. Sin embargo, los movimientos angulares ya no son tan familiares para la mayoría de la gente. El movimiento angular total puede describirse completamente si consideramos el movimiento que tiene lugar alrededor de tres ejes separados. Estos ejes forman ángulos rectos entre ellos y son conocidos como eje de inclinación, eje de cabeceo y eje de guiñada.

Fig. 5.0 Se muestran los tres ejes principales de rotación.

La guiñada es el movimiento angular alrededor de un eje vertical.

El eje de cabeceo es horizontal y atraviesa la moto de lado a lado.

El eje de inclinación también es horizontal y está orientado a lo largo de la moto.



El movimiento de inclinación es probablemente el más familiar de los tres y es el que ocurre de forma más familiar de los tres y es el que ocurre de forma más obvia cuando tumbamos la moto para tomar una curva. La fig. 5.0 muestra el eje de inclinación, que une las huellas de contacto de los neumáticos delantero y trasero. De todas formas, más adelante veremos que la localización de este eje depende de nuestro marco de referencia y por lo tanto puede estar en cualquier lugar en el que nosotros queramos que esté.

La guiñada es el movimiento que tiene lugar alrededor de un eje vertical y ocurre cuando giramos alrededor de una curva, también puede generarse debido a algunas perturbaciones como por ejemplo un viento lateral.

El cabeceo es el movimiento alrededor de un eje horizontal que pasa de lado a lado de la moto, este movimiento tiene lugar al acelerar o al frenar, y también se produce con las irregularidades de la carretera.

Debido a los grandes ángulos de inclinación que se alcanzan al tomar las curvas, los ejes de cabeceo y guiñada se mueven con respecto a las coordenadas verticales y horizontales globales. Por este motivo es importante tener cuidado al especificar el sistema de ejes que se está utilizando. En análisis de vehículos se utilizan diversos sistemas, pero para nuestros propósitos los dos más importantes serán el de coordenadas de la máquina y el de coordenadas fijo, o de tierra, referidos inicialmente en términos de dirección inicial de viaje, antes de que tenga lugar cualquier maniobra.

5.2 CONSIDERACIONES GEOMÉTRICAS

5.2.1. GEOMETRÍA BÁSICA DE LA MOTOCICLETA

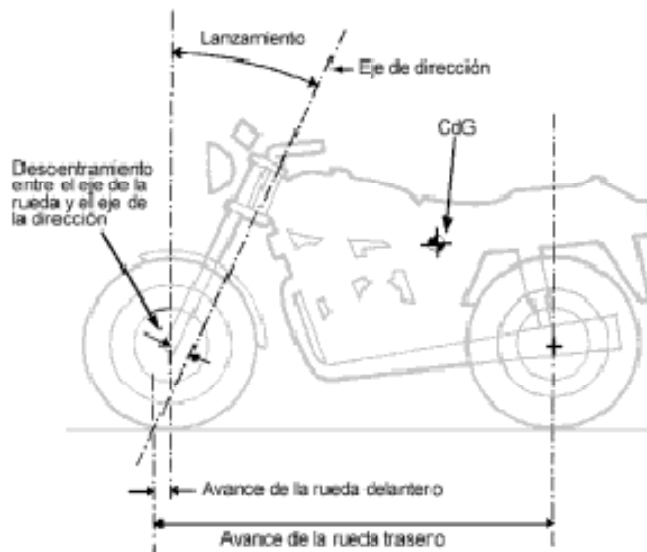


Fig. 5.1 El eje de dirección es la línea sobre la cual gira el sistema de dirección. El lanzamiento es la inclinación hacia atrás que tiene el eje de dirección. El avance es la distancia que existe al nivel del suelo entre el centro de la huella de contacto del neumático y el punto en el cual el eje de dirección intersecta con el suelo. La rueda delantera y la rueda trasera tienen sus propios valores de avance. El descentramiento existente entre el eje de la rueda el eje de dirección se mide en ángulo recto con respecto a este último.

CdG es el centro de gravedad, para casi todos nuestros propósitos nos interesa el centro de gravedad combinado de la moto y el piloto.

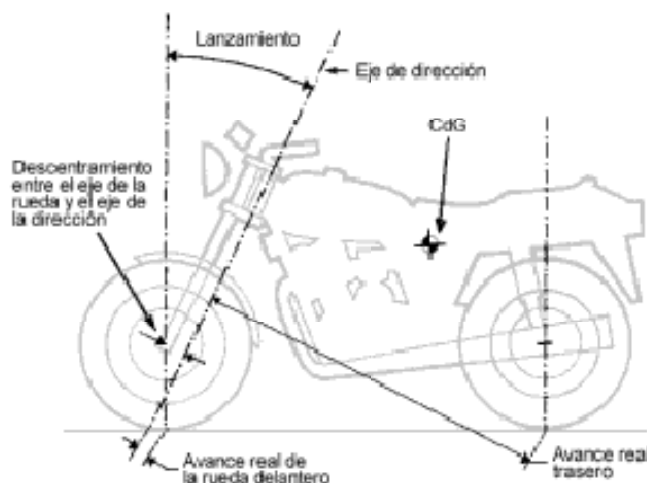


Fig. 5.2 El avance real se mide en ángulo recto con respecto al eje de dirección. El avance real se reduce con respecto al avance en el suelo multiplicándolo por el coseno del ángulo de lanzamiento. Para un ángulo de lanzamiento típico es aproximadamente el 90%.

Podemos compararlo con el avance en el suelo que se muestra en la fig. 5.1

5.2.2. AVANCE

La función principal del avance es proporcionar una cierta estabilidad direccional, y también es de gran importancia en el inicio de la fase de inclinación de la moto al tomar una curva. Podemos ver que tanto el neumático delantero como el trasero tocan el suelo por detrás del punto donde el eje de dirección lo hace, y esto provoca un efecto de autocentrado en ambas ruedas. La distancia que existe entre el eje de dirección y el centro de la huella del neumático, medida a ras de suelo, es lo que se conoce habitualmente como avance.

De todas formas, sería más lógico medir la distancia que existe entre la huella de contacto del neumático y el eje de dirección en ángulo recto con respecto a ese eje de dirección. Para cualquier fuerza que se genere en el neumático crea un momento alrededor del eje de dirección. Para distinguir entre estas dos definiciones de avance, cuando sea necesario, yo sugiero que las llamemos *avance en el suelo* y *avance real*. El *avance real* es aproximadamente el 90 % del *avance en el suelo* cuando tenemos un lanzamiento de cero grados. Comparando las figs. 5.1 y 5.2 podemos ver las diferencias. La importancia de esta distinción quedará clara más adelante en este mismo capítulo. (La SAE denomina al avance real “*Avance Mecánico*” para distinguirlo del *avance en el suelo*. El nombre que usemos no es tan importante como conocer la diferencia que existe entre uno y otro).

En la figura 5.3 podemos comprender cómo el avance causa un efecto de autocentrado. Se muestra la vista superior de una rueda desplazada de su posición de línea recta.

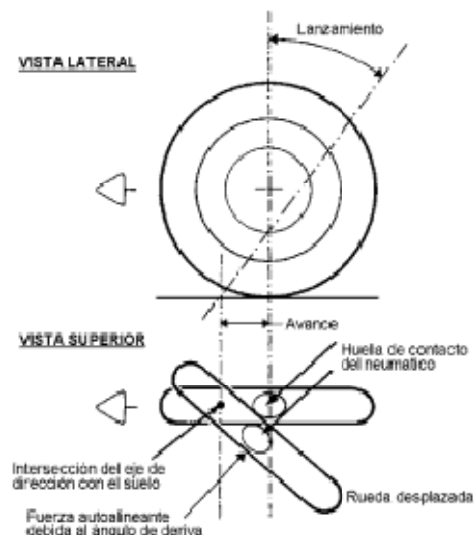


Fig. 5.3 El avance positivo y la fuerza lateral debida al ángulo de deriva se combinan para producir un momento alrededor del eje de dirección que tiende a poner la rueda recta otra vez. Esto proporciona un cierto grado de estabilidad en línea recta.

Debido a que existe cierto ángulo entre la rueda y la dirección de viaje (ángulo de deriva es el término técnico, ver el capítulo sobre neumáticos), se genera una fuerza que forma un ángulo recto con respecto al neumático. Como la huella de contacto queda por detrás del eje de dirección (avance positivo), esta fuerza actúa a través de un brazo de palanca que genera un momento corrector sobre la rueda girada. Este brazo de palanca es igual al *avance real* y distinto del *avance en el suelo*, este es el motivo por el que es más lógico utilizar el *avance real*. A pesar de la lógica el *avance en el suelo* es el más especificado comúnmente. Si la dirección se gira debido a alguna causa (por ejemplo mal estado del firme), el avance positivo automáticamente contrarresta el giro proporcionando cierta estabilidad direccional. Esto también interacciona con los efectos estabilizadores de las reacciones giroscópicas. Si la huella de contacto del neumático estuviera por delante del eje de dirección (avance negativo), el momento generado reforzaría la perturbación original y la motocicleta se volvería direccionalmente inestable.

Sería perdonable pensar que, debido a que el avance positivo de la rueda trasera es mucho mayor que el de la delantera (típicamente entre 50 y 100 mm delante y entre 1300 y 1500mm detrás), la rueda trasera es más importante en este aspecto. Realmente ocurre lo contrario y existen varias razones. Veamos la figura 5.4. Imaginemos que la huella de contacto de cada rueda está desplazada lateralmente la misma distancia, digamos 12mm. La rueda delantera estará girada entre 7 y 10 grados alrededor del eje de la dirección; esto hace que el ángulo de la deriva aumente en la misma medida generando una fuerza lateral que tiene en contra únicamente la inercia, relativamente pequeña de la horquilla y la rueda delantera para volver a girar la rueda a su posición en línea recta. De todas maneras, el ángulo de deriva de la rueda trasera será mucho menor (aproximadamente medio grado) y por lo tanto también será mucho menor la fuerza lateral. No sólo tenemos una fuerza menor, esta fuerza también tiene que actuar sobre una gran parte de la moto y el piloto, que tienen una inercia mucho mayor, de aquí que la respuesta sea mucho menor que en el caso de la rueda delantera.

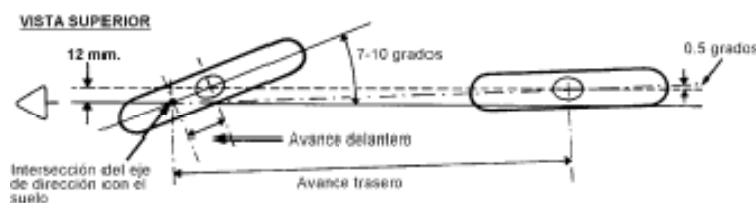


Fig. 5.4 A pesar de que la rueda trasera tiene un avance mucho mayor, su ángulo de deriva es mucho menor que el de la rueda delantera para un desplazamiento lateral dado. Por lo tanto el desplazamiento y el efecto autoalineante del avance tiene una significancia mucho menor.

Dicho esto, podemos ver que si utilizamos el avance como medio para incrementar la tendencia a autoalinearse de las ruedas, encontraremos que el beneficio será cada vez menor par un mismo aumento. También debemos subrayar que cualquier perturbación en la

dirección de viaje de una moto, debida al desplazamiento lateral de la huella de contacto del neumático, está generada en mucha menor medida por la rueda trasera que por la rueda delantera. Esto es así porque el ángulo con respecto a la dirección de viaje que el deslizamiento produce es mucho más pequeño en la rueda trasera que en la delantera. Resumiendo, podemos decir que aunque el gran lanzamiento de la rueda trasera tiene un efecto de autoalineamiento relativamente pequeño, esto queda compensado porque el efecto del desplazamiento de la rueda en la estabilidad direccional también es pequeño.

Las reacciones giroscópicas también tienen una influencia muy importante sobre la estabilidad direccional, y la cantidad de avance puede tener un gran efecto sobre estas iteraciones.

Es importante darse cuenta de que el avance no tiene un valor fijo para una motocicleta determinada, existen varios factores que hacen que el avance varíe durante la conducción. Algunos son el ángulo de inclinación, el ángulo de giro de la dirección, y también el radio del perfil del neumático. La fig. 5.5 nos muestra la variación del avance frente a los ángulos de inclinación y de giro del manillar, para una motocicleta determinada.

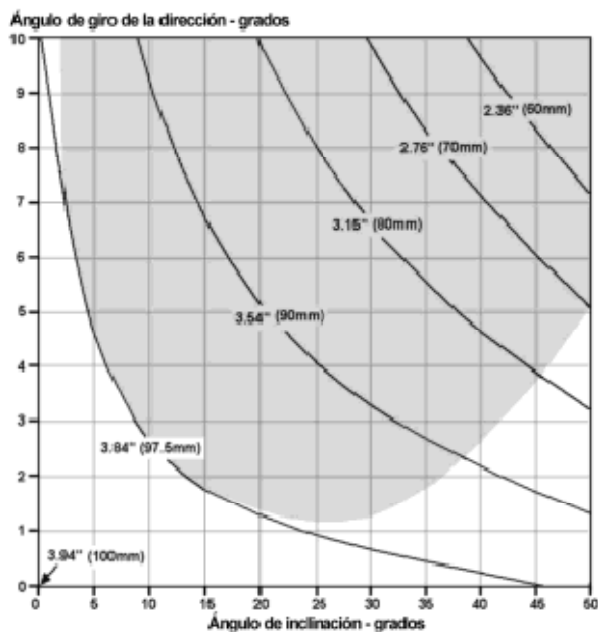


Fig. 5.5 Se muestran valores de avance real efectivo para diferentes combinaciones de ángulos de inclinación y de giro de dirección. Hay que hacer notar que no todas las combinaciones de estos ángulos se dan en la práctica, por ejemplo cuando tomamos una curva con 45 grados de inclinación, sería muy improbable querer aplicar un giro de 10 grados a la dirección. El área oscura es una guía aproximada para conocer aquellas combinaciones que serían muy improbables en la realidad. Considerando solo las combinaciones más probables, puede haber hasta un 25% de reducción en el avance durante la conducción.

La motocicleta de este ejemplo tenía los siguientes parámetros básicos: Distancia entre ejes 1.4m, Decalaje de la tija: 80mm, Lanzamiento: 30 grados, Radio del neumático: 360mm, Perfil del neumático: 55mm, Avance real inicial: 100mm, Avance en el suelo inicial: 115mm

Aunque el propósito general del avance de la rueda delantera es proporcionar un cierto grado de estabilidad direccional, se producen también varios efectos secundarios. Vamos a considerar dos de ellos.

Efecto direccional

Si inclinamos una moto parada hacia un lado y entonces giramos el manillar, la pipa sube o baja dependiendo de la posición de la dirección. El peso de la moto que actúa en la huella de contacto del neumático produce un par alrededor del eje de la dirección que tiende a girar la dirección a la posición en la que la pipa está más baja (la posición de mínima energía potencial).

Para un avance dado, este ángulo de la dirección se ve afectado por el lanzamiento y por el diámetro de la rueda, como veremos después. Si tenemos un avance positivo, como es normal, entonces el efecto de inclinación es hacia el interior de la curva (sería en el otro sentido para un avance negativo). En movimiento, el peso efectivo de la moto y el piloto que soporta la pipa se transmite al suelo a través de la huella de contacto del neumático. El peso y las fuerzas que se generan en las curvas se compensan en gran parte una con las otras y el par resultante en el manillar debido a este aspecto es bastante pequeño. Los neumáticos anchos y el hecho de que el piloto se descuelgue al tumbar muestran que existe un momento residual y de aquí que la cantidad de avance de la rueda delantera (aparte de otros parámetros) afecte al valor del momento que el piloto debe aplicar en el manillar (por lo tanto al tacto de la dirección) para mantener un ángulo de la dirección correcto de acuerdo al radio de la curva y la velocidad de la moto.

Tacto en línea recta

Como todos sabemos, incluso cuando circulamos en línea recta la dirección se siente más suelta en firmes húmedos o resbaladizos que en los que están secos. Esto es debido a que nuestra aparente línea recta está formada por una serie de curvas de corrección, con manillar girando levemente de lado a lado todo el tiempo. Como hemos visto antes, un pequeño desplazamiento de la dirección causa un ángulo de deriva en el neumático, que produce un par autoalineante. Para un ángulo de deriva dado este par depende de las propiedades del neumático, de la adherencia superficial y del avance. Así, a través de la dirección, tenemos una indicación (dependiente del avance) de las condiciones de la carretera y de la cantidad de agarre disponible.

5.2.3 LANZAMIENTO (inclinación del ángulo de la dirección)

El motivo de la existencia del lanzamiento es menos fácil de entender. Todas las motocicletas corrientes que se producen tienen una pipa inclinada entre 23 y 30 grados con respecto a la vertical – a menudo 27 grados, que parece ser una cifra mágica. No hay una explicación simple, existen varios factores que son relevantes. No vamos a negar la gran conveniencia que existe desde el punto de vista de la construcción del chasis (ver figura 5.6).

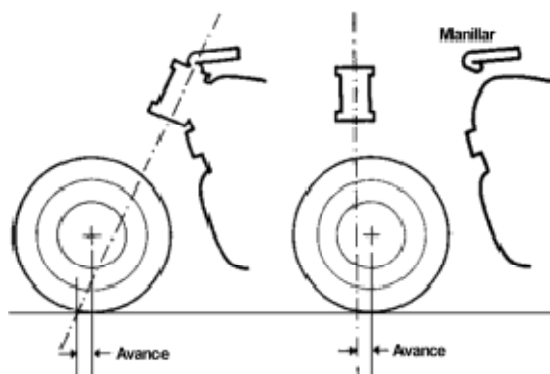


Fig. 5.6 con una pipa de dirección convencional, resulta conveniente tener un lanzamiento normal (izquierda) por facilidad de construcción del chasis y para conseguir un montaje directo del manillar. Para un mismo avance, una pipa de dirección vertical (derecha) da problemas en ambos aspectos.

En muchos diseños de motos con tren delantero alternativo (con el eje de dirección en el buje de la rueda), simplemente por cuestiones de espacio, el eje de la rueda no tiene decalaje con respecto al eje de dirección; o sea que el avance es totalmente dependiente del ángulo de lanzamiento, el cual suele estar normalmente entre 10 y 15 grados para proporcionar el resultado adecuado. Este es un ángulo mucho menor que el habitual, y sin embargo las motos con este tipo de tren delantero son reconocidas por su estabilidad y su buen comportamiento direccional. Esta reputación puede deberse a alguna causa que no sea el ángulo de lanzamiento; pero ciertamente parece que este alejamiento de la norma no es perjudicial y de hecho puede ser beneficioso.

Es interesante hacer notar que desde, ha existido una tendencia gradual hacia el uso de ángulos de lanzamiento pequeños, particularmente en motos deportivas y de competición. Valores de lanzamiento que eran considerados como inestables unas décadas atrás, se emplean ahora de forma habitual, variando entre 20 y 23 grados. De todos modos, parte del motivo de este cambio probablemente viene dado de nuevo por la facilidad de construcción. Durante las últimas décadas se ha tendido a utilizar distribuciones de peso con el tren delantero más cargado, de forma que el piloto se ha movido más hacia delante. Obviamente, estos cambios son más fáciles de llevar a cabo con una pipa de dirección más adelantada y por lo tanto con un lanzamiento menor. Esta reducción del lanzamiento también ayuda a

compensar las mayores fuerzas de dirección que aparecen gracias al aumento de carga sobre la rueda delantera.

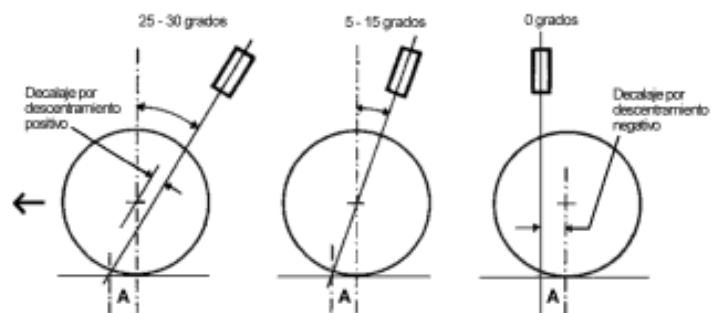
Examinemos los efectos principales del ángulo de lanzamiento también. La fig. 5.7 muestra tres posibilidades que proporcionan un mismo avance de suelo. El avance real se ve reducido en los dos primeros casos. La reducción es de un 10% para los valores de lanzamiento convencionales, y alrededor de un 3% en el caso de 15 grados de lanzamiento.

Fig. 5.7 Tres posibles ángulos de lanzamiento que proporcionan el mismo avance de suelo.

Izquierda: Sistema convencional.

Centro: Ángulo de lanzamiento cuando no existe decalaje (como en muchos tipos de trenes alternativos).

Derecha: Ángulo de lanzamiento de cero grados (eje de dirección vertical) que proporciona un decalaje negativo

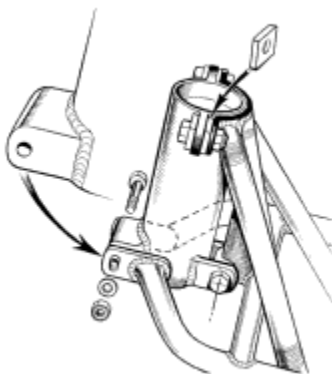


Yamaha utilizó este sistema de ajuste del ángulo de lanzamiento en algunas de sus motos de GP de los años 60.

Las motos de competición actuales suelen utilizar una pipa de dirección formada por un tubo de gran diámetro, en el interior del cual se montan los rodamientos de la dirección alojados en unos insertos excéntricos. El ángulo de lanzamiento se ajusta variando el descentramiento de los insertos excéntricos.

Al igual que ocurre con cualquier otro sistema que varía el lanzamiento en la pipa de dirección, tienen lugar varios efectos secundarios, y cambian otros parámetros como:

- Avance
- Distancia entre ejes
- Distribución de peso



1) Reducción del efecto provocado por el lanzamiento

Para un valor dado de avance en el suelo, el par autoalineante en la ruda delantera y la horquilla depende de la longitud del brazo de palanca desde el centro de la huella de contacto hasta el eje de dirección, medido en ángulo recto con respecto a ese eje. En la figura 3.8 podemos ver claramente que este brazo de palanca se acorta conforme el lanzamiento aumenta. En la práctica, esto significa que necesitamos más avance en el suelo conforme el ángulo de lanzamiento se hace mayor. Con esta base podemos decir que el ángulo de lanzamiento tiene un efecto anti-avance.



Fig. 5.8 Un lanzamiento positivo reduce el par autoalineante para un valor determinado de avance.

Avance real = avance en el suelo multiplicado por el coseno del ángulo de lanzamiento.

Esta reducción en el avance real se acentúa aún más cuando aplicamos cierto ángulo a la dirección. La fig. 5.9 muestra la reducción del avance en el suelo para distintos ángulos de lanzamiento y varios ángulos de giro de la dirección hasta un valor máximo de 80 grados.

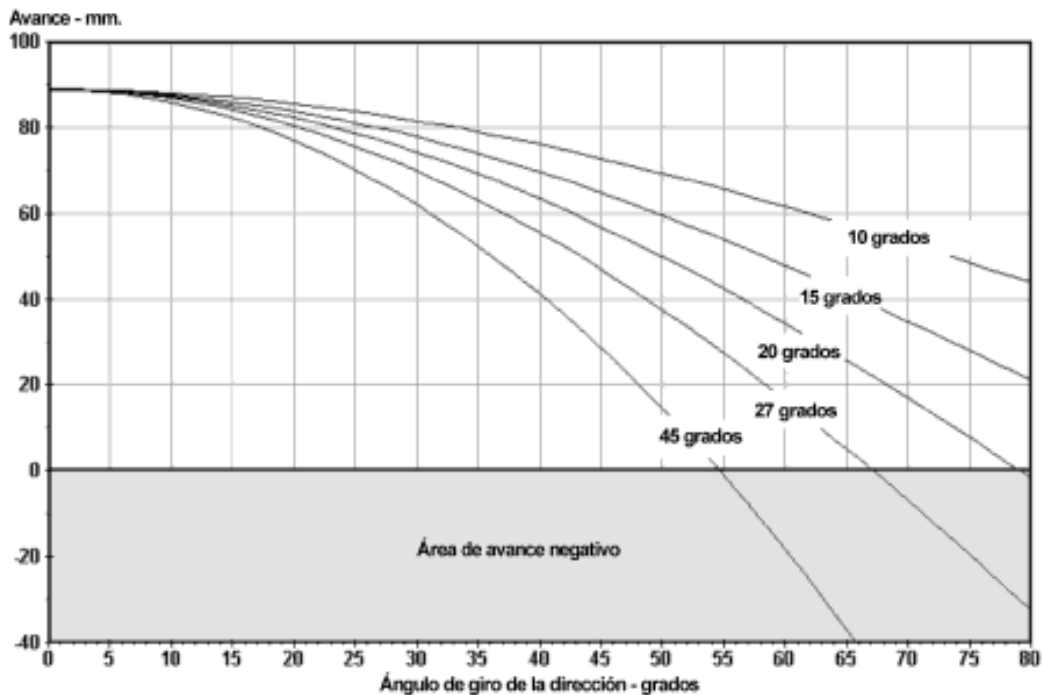


Fig. 5.9 Reducción del avance en suelo para diferentes valores de lanzamiento según el ángulo de giro de la dirección.

Las motos de carretera raramente permiten girar la rueda más de 45 grados, pero esta gráfica muestra que con un ángulo de lanzamiento típico de 27 grados el avance en suelo se ve reducido de 89 mm. A 46 mm. Con un giro de la dirección de 45 grados. La fig. 5.10 muestra los mismos datos en el caso del avance en la rueda trasera. Podemos comparar la diferencia existente entre ambas gráficas con pequeños ángulos de giro. En estos ejemplos se ha utilizado una motocicleta con un neumático de 300 mm. De radio y 89 mm de avance en el suelo.

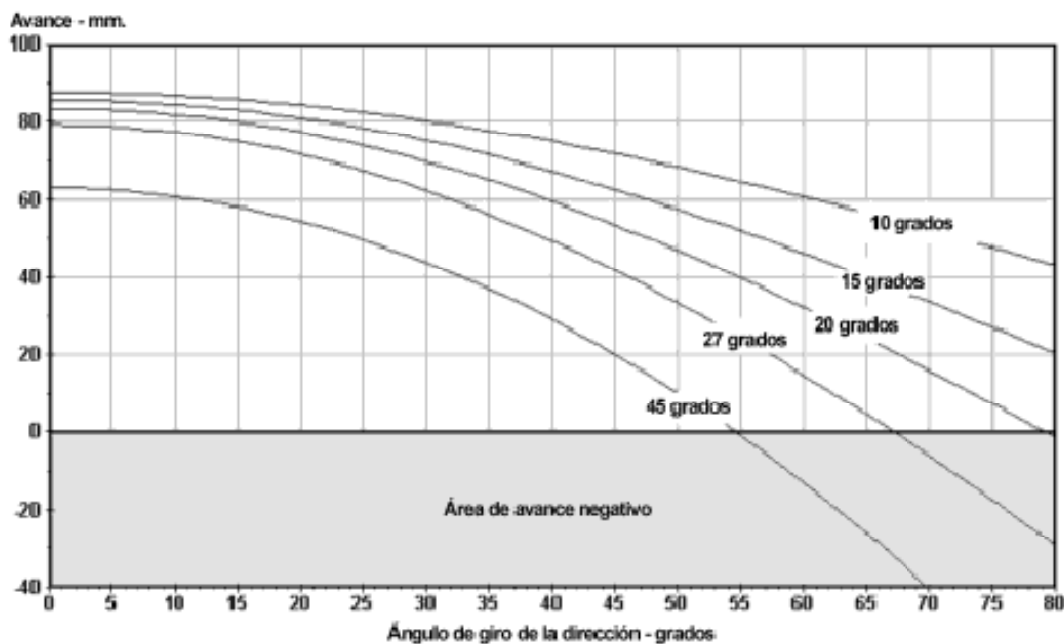


Fig. 5. 10 Gráficos equivalentes a los de la figura 5.9 excepto en que las curvas muestran los efectos en el avance trasero.

2) Avance negativo

Con grandes ángulos de giro de la rueda, el lanzamiento puede llegar a hacer que el avance sea negativo, si bien los ángulos de giro muy amplios sólo pueden conseguirse a muy bajas velocidades. La figura 5.11 muestra claramente qué ocurre físicamente, y las curvas de las figuras 5.9 y 5.10 muestran el rango de valores en el que este fenómeno tiene lugar. Aunque para obtener un avance negativo hacen falta ángulos de giro de la dirección muy grandes, con ángulos de giro pequeños todavía se produce cierta reducción en el avance. Esto puede provocar la necesidad de utilizar un avance inicial grande. Se puede conseguir una demostración convincente de este efecto levantando la rueda delantera de una bicicleta y girando el manillar lo suficiente para obtener un avance negativo, con lo cual la rueda intentará girar aún más. Esta es una de las razones por las que las motos de trial suelen utilizar ángulos de lanzamiento muy pequeños, ya que sus maniobras a baja velocidad generalmente

implican grandes ángulos de giro del manillar. Con un ángulo de lanzamiento tan pequeño se produce una reducción menor del avance efectivo.

Fig. 5.11 En el dibujo la dirección está girada 90 grados hacia la izquierda. Tenemos un avance totalmente positivo con cero grados de lanzamiento y el efecto de avance negativo que puede ocurrir con un ángulo lanzamiento normal.



3) Caída de la pipa de dirección

Con una motocicleta normal (esto es, con avance positivo) en posición vertical, la pipa de dirección bajará conforme giremos el manillar hacia un lado (con un avance negativo, lo cual no es normal, la pipa subiría). Cuanto mayor sea el ángulo de lanzamiento, mayor será la caída. Esto puede apreciarse mejor observando un ángulo de lanzamiento exagerado, como se muestra en la figura 5.12.

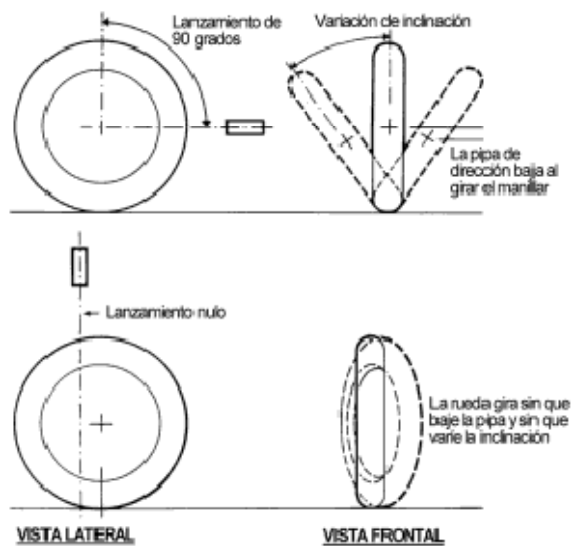
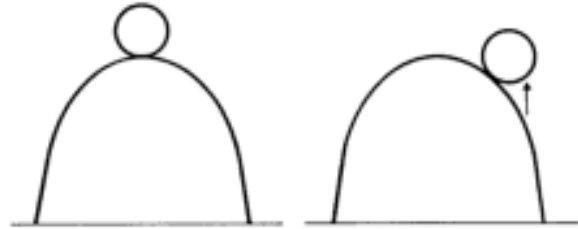


Fig. 5. 12 Con un ángulo de lanzamiento de 90° (arriba), si giramos el manillar podremos ver fácilmente la caída de la pipa y la variación del ángulo de comba de la rueda. Con cero grados de lanzamiento (abajo) estos efectos no tienen lugar.

Esta caída tiende a trabajar contra el efecto autoalineante del lanzamiento, porque para volver a girar el manillar hasta la posición de línea recta, debemos levantar el considerable peso que soporta la pipa de dirección.

Fig. 5.13 Una bola en un montículo sería un caso análogo a la caída de la pipa de dirección. Teóricamente no hace falta ninguna fuerza para mantener la bola en la cima. Si permitimos la caída, debemos levantar su peso para volver a la situación de equilibrio. Esta condición es conocida como equilibrio inestable, debido a que cualquier desviación del estado de equilibrio provoca fuerzas que desestabilizan el sistema.



Este efecto es perjudicial para el equilibrio (esta es otra razón para que las motos de trial tengan ángulos de lanzamiento pequeños) y para la estabilidad direccional mientras viajamos en línea recta, sin embargo, ayuda a girar la rueda cuando nos inclinamos al tomar una curva. De todos modos, es importante no sobrevalorar tales efectos. La fig. 5.14 y 5.15 ponen los valores reales en perspectiva. La primera muestra la caída de la pipa, y la segunda muestra el par que hay que aplicar en el manillar para volver a levantar la moto. Con un lanzamiento de 27 grados y un ángulo de giro del manillar de 45 grados, la caída de la pipa es de sólo 8.5 mm. Aproximadamente, y el par necesario está por debajo de 5 Nm por cada 50 kgf. En el tren delantero. Con ángulos de giro del manillar menos extremos el efecto es mucho menor. Por ejemplo con un lanzamiento de 27 grados y 10 grados de giro del manillar, la caída es inferior a medio milímetro.

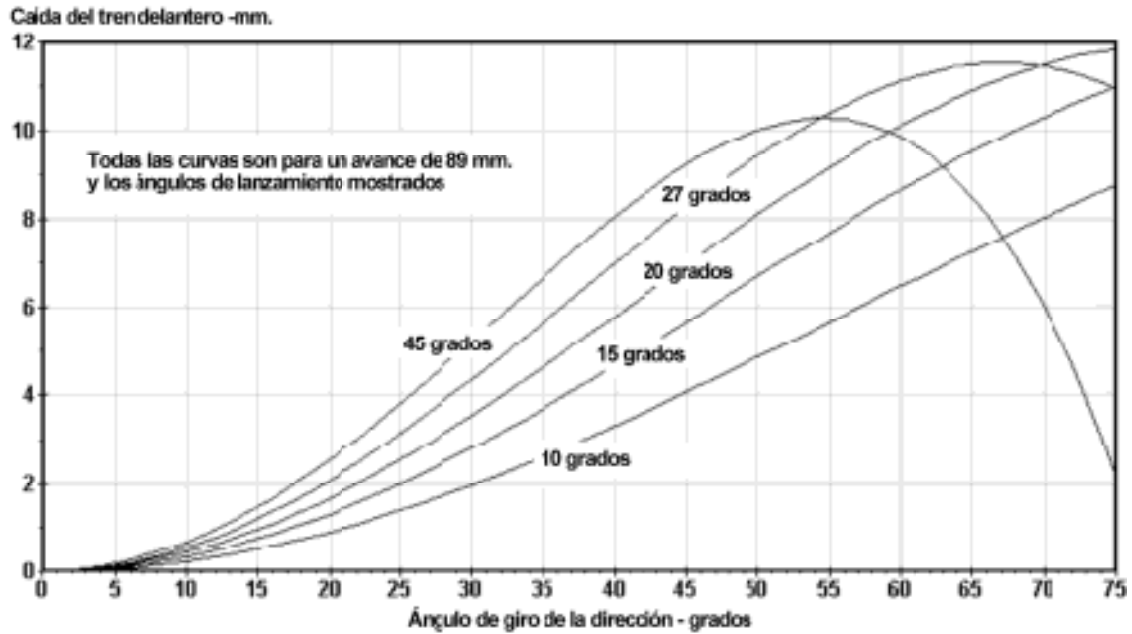


Fig. 5.14 Caída de la pipa para una moto en posición vertical, para distintos ángulos de lanzamiento y varios ángulos de giro de la dirección.

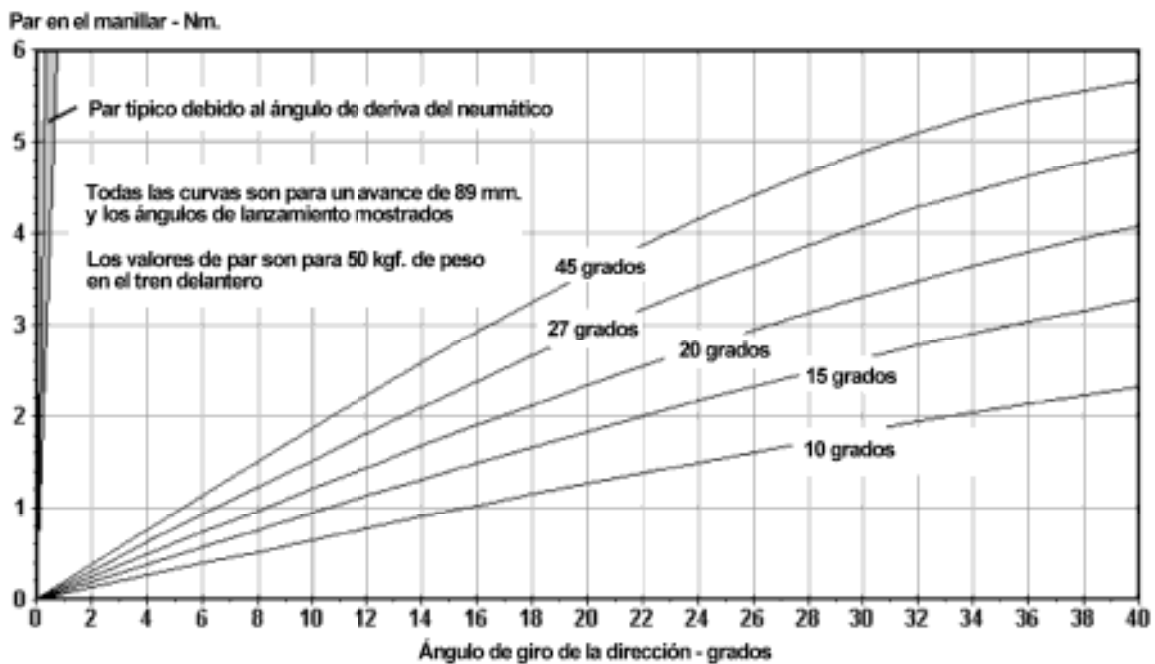


Fig. 5.15 Par adicional medio necesario para volver a colocar la dirección en la posición de línea recta, debido a la caída de la pipa. Nótese que este par es aproximadamente un 1% del par debido al ángulo de deriva en el caso de pequeños ángulos de giro de la dirección.

4) Ángulo de comba

La figura 5.12 muestra qué ocurre con el ángulo de comba si tenemos un lanzamiento de 90 grados. A pesar de que este efecto es menos pronunciado con ángulos de lanzamiento convencionales, todavía persiste y eso significa que, cuando una motocicleta está negociando una curva con la dirección apuntando hacia el interior, la rueda delantera se inclina más que la trasera.

5) Descentramiento del eje de la rueda

La figura 5.7 muestra la diferencia en el descentramiento requerido para conseguir un cierto valor de avance, con distintos ángulos de lanzamiento. Un lanzamiento de cero grados necesita el mayor descentramiento. De todos modos, aunque un ángulo de lanzamiento normal tiende a reducir el valor del avance en el suelo, un lanzamiento de cero grados requeriría menos avance y por lo tanto menos descentramiento. En general, siendo el resto de valores igual, es una ventaja tener un descentramiento mínimo, ya que esto normalmente proporciona una menor inercia alrededor del eje de dirección. A este respecto, los sistemas con el eje de dirección en el buje de la rueda (hub-centre en inglés) parecen tener mucho a su favor.

Un comentario habitual suele ser que, debido a que el decalaje desplaza el centro de gravedad de la rueda y la horquilla por delante del eje de giro de la dirección, se produce un par que tiende a girar la rueda hacia el interior de la curva mientras la moto está inclinada. Esto es cierto sólo cuando la moto está parada. La fig. 5.16 muestra lo que ocurre al tomar una curva, la fuerza centrífuga intenta girar la rueda hacia el exterior de la curva, pero la fuerza de gravedad a su vez intenta girar hacia el interior, de forma que equilibra casi totalmente este efecto. Con unos hipotéticos neumáticos con anchura cero y el piloto situado en el plano medio de la moto, estos dos efectos estarían perfectamente equilibrados. Así que el efecto resultante del decalaje influye muy poco en las características de autoalineamiento de la máquina, excepto cuando los neumáticos son muy anchos.

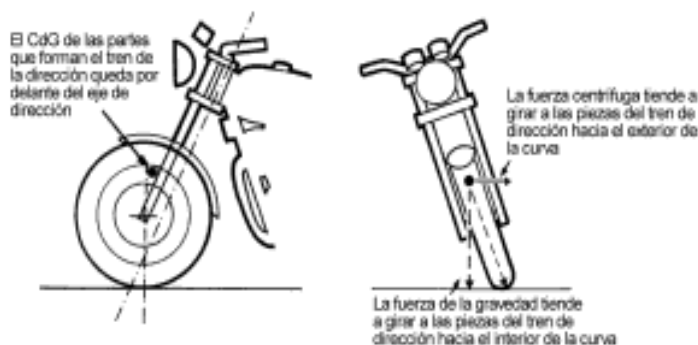


Fig. 5.16 Si el centro de gravedad de las piezas que giran alrededor del eje de dirección está adelantado con respecto a este eje, se producen momentos de giro debidos a la fuerza centrífuga y a la fuerza de gravedad. Estos momentos se contrarrestan el uno con el otro siempre que el centro de gravedad del piloto se encuentre en el plano medio de la motocicleta. Si el piloto se descuelga de la moto se reduce el momento gravitacional y se incrementa el momento centrífugo, por lo que la dirección tiende a girar hacia el exterior de la curva.

6) Efectos giroscópicos

Cuando explicamos los efectos producidos por la precesión giroscópica, el asunto fue tratado como si el eje de la dirección fuera vertical (esto es, lanzamiento cero). En el caso de un ángulo de lanzamiento normal esta situación se modifica: las componentes de las fuerzas de precesión que actuaban como describimos se reducen y aparecen otras nuevas que actúan en sentido contrario, con lo que se reduce el efecto de las fuerzas giroscópicas.

7) Ángulo de giro de la dirección

El lanzamiento reduce el ángulo de giro efectivo que existe entre el neumático y el suelo, comparado con el ángulo que giramos el manillar. Esto se puede ver fácilmente con nuestro habitual truco de visualizar un lanzamiento exagerado de 90°. En la figura 5.17 no existe un verdadero ángulo de giro de la rueda con respecto al suelo, en cambio el ángulo de comba es mucho más pequeño (tal y como hemos visto en el punto 4), y para un lanzamiento de 27 grados, el ángulo efectivo de giro de la rueda queda reducido aproximadamente a un 90% del ángulo que gira el manillar. La figura 5.18 es un dibujo de contorno que muestra los ángulos de giro efectivos en un rango de ángulos de inclinación, para lanzamientos de 0 y 27 grados. Nótese que el ángulo de giro efectivo aumenta conforme aumenta el ángulo de inclinación.

Fig. 5.17 Este ejemplo extremo muestra cómo el lanzamiento reduce el ángulo de giro efectivo al nivel del suelo.



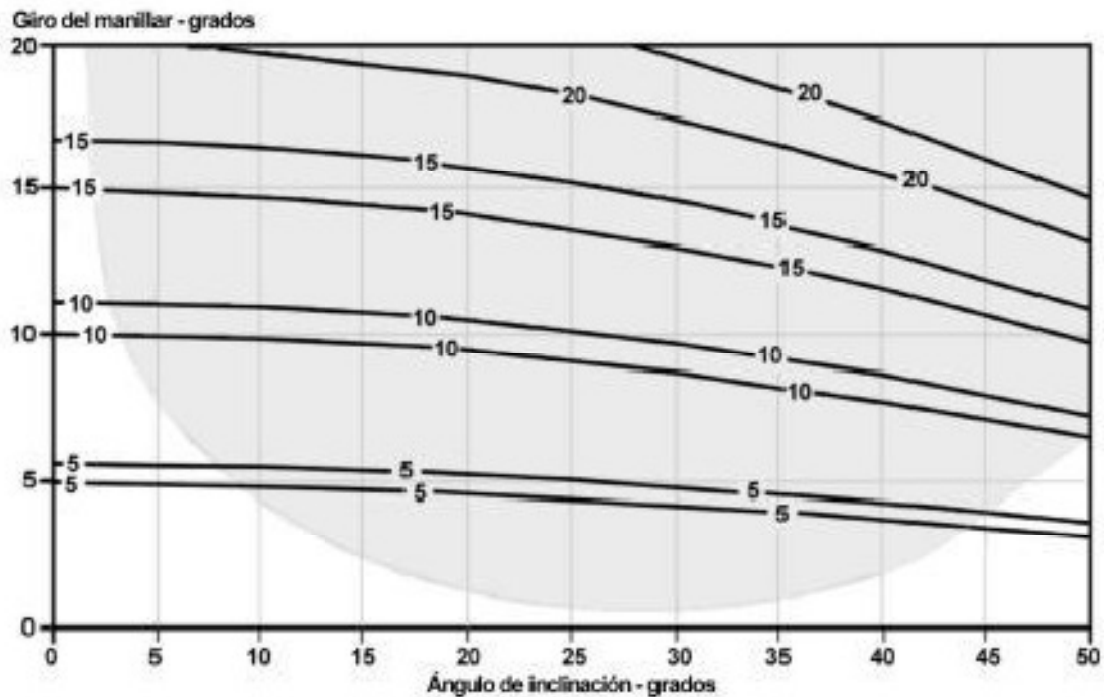


Fig. 5.18 Se muestra el ángulo de giro efectivo al nivel del suelo en función del ángulo de giro del manillar en un rango de ángulos de inclinación. La curva superior de cada pareja es para un lanzamiento de 27 grados, mientras que la línea inferior es para un lanzamiento cero. Por ejemplo, para cero grados de inclinación, con 27 grados de lanzamiento, el ángulo de giro del manillar debe aumentar para conseguir el ángulo de giro efectivo deseado. Para conseguir un ángulo de giro de 10 grados de la rueda con respecto al suelo, necesitamos girar el manillar aproximadamente 11 grados.

Por otro lado, el aumento del ángulo de inclinación tiende a aumentar el ángulo de giro efectivo, a pesar de que esto no es muy importante dentro del rango normal de uso. La zona oscura indica el área aproximada de combinaciones de inclinación y giro que tienen un uso muy improbable.

Resumen de efectos debidos al lanzamiento

Excepto para el caso de mínimo descentramiento (tratado en el punto 5), parece que un lanzamiento distinto de cero grados no es una buena cosa. Si esto es así, ¿por qué las motocicletas convencionales se manejan y giran tan bien? La respuesta reside en los pequeños ángulos de giro que se utilizan en una conducción normal. Los efectos perjudiciales del lanzamiento son más pronunciados con grandes ángulos de giro de la dirección. El efecto autoalineante debido al peso puede o no puede ser beneficioso – es posible tener demasiado de una cosa buena. Cuando tomamos una curva necesitamos una velocidad y un ángulo de inclinación determinados. Si son demasiado grandes el piloto deberá aplicar un esfuerzo contrario en el manillar, si son demasiado pequeños necesitará girar hacia el interior de la curva. El ángulo de giro de la dirección necesario para un determinado ángulo de inclinación depende de muchos parámetros, y por lo tanto no es posible construir un efecto autoalineante que sea perfecto en todas las condiciones – lo cual es otro ejemplo de la inevitable necesidad

de llegar a un compromiso. Un cambio del tipo de neumático sería suficiente para alterar las cosas.

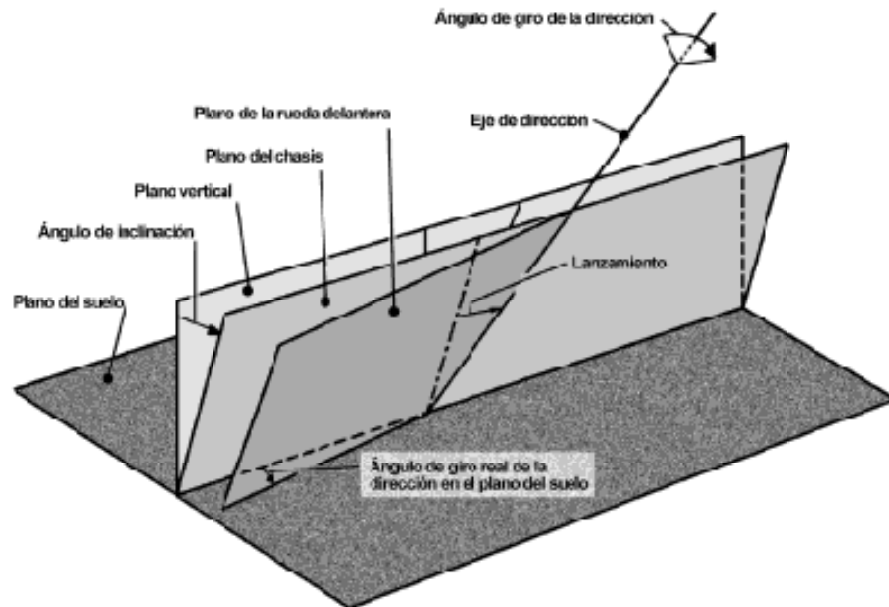


Fig. 5.19 Esta representación de una moto, como dos planos que intersectan a lo largo del eje de dirección, puede ayudar a visualizar varios efectos geométricos debidos a la inclinación y el giro. Uno de los planos representa la mayor parte del chasis incluyendo la rueda trasera, el otro es el plano central de la rueda delantera. El plano frontal puede rotar alrededor del eje de dirección contenido en el plano trasero y el plano trasero puede inclinarse respecto a la vertical.

5.2.4. DISTANCIA ENTRE EJES

La distancia entre los ejes de las ruedas tiene diversos efectos, pero en general, cuanto mayor es esta distancia mayor es la estabilidad direccional y mayor el esfuerzo necesario para negociar las curvas. Existen tres razones principales para esto.

1) Ángulo de giro requerido

La figura 5.20 muestra cómo, para una curva dada, una motocicleta con una gran distancia entre ejes necesita girar más la rueda delantera hacia el interior de la curva.

Consecuentemente es necesario un mayor esfuerzo para negociar las curvas; también, una determinada flexión de la rueda delantera (por ejemplo debido a los baches) tendría un efecto menor en la estabilidad direccional.

Una consideración práctica en el caso de las motos de trial es que, para un nivel máximo de giro del manillar debido a los topes de dirección, el círculo de giro mínimo es

menor con una distancia entre ejes corta. Por este motivo, las motos de trial tienen distancias entre ejes tan cortas como 1240-1270 mm.

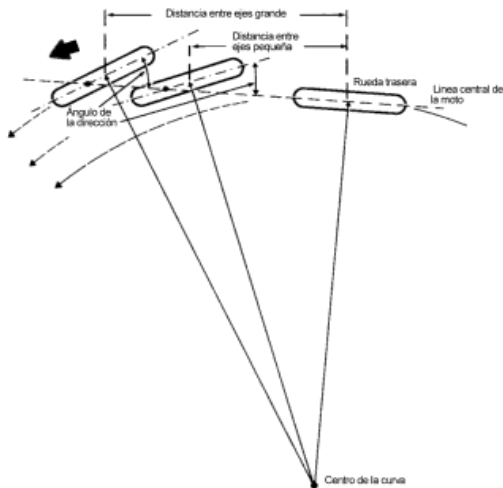


Fig. 5.20 Para un radio de curva dado, una distancia entre ejes mayor necesita un ángulo de giro mayor. Este diagrama muestra esto para un sistema de giro basado en Ackerman, pero se pueden aplicar consideraciones similares a casos más reales con ángulos de deriva reales.

2) Ángulo de la rueda trasera

También está claro en la figura 5.21 que, para una determinada flexión lateral, el ángulo formado entre la rueda trasera y la dirección de viaje es menor con una distancia entre ejes grande, lo cual mejora la estabilidad direccional.

Fig. 5.21 Una distancia entre ejes grande mejora la estabilidad direccional al reducirse los desplazamientos laterales de la rueda trasera.



3) Efectos de inercia

La distancia entre ejes tiene un efecto sobre la transferencia de peso que tiene lugar durante la frenada y la aceleración. Para una altura dada del centro de gravedad, cuanto mayor sea la distancia entre ejes, menor será la transferencia de peso. También, los momentos de inercia de los planos de cabeceo y guiñada se incrementarán, lo cual hará que la moto sea más estable y perezosa.

Resumen de efectos relacionados con la distancia entre ejes

Al igual que con otros muchos aspectos de diseño, la distancia entre ejes es un compromiso y varía con el uso que pretendamos darle a la motocicleta. Las motos de trial necesitan una buena manejabilidad, principalmente a baja velocidad, y por lo tanto tienen una distancia entre ejes pequeña. Las grandes motocicletas de turismo necesitan una buena estabilidad direccional para conseguir una conducción relajada, por ello estas motos tienen mayores distancias entre ejes (alrededor de 1470 – 1520 mm.), aunque una distancia entre ejes demasiado larga reduce la manejabilidad entre el tráfico. Algunas motos tipo FF, como por ejemplo la Quasar (fuera de producción), tienen distancias entre ejes de 1950mm. O más. Una deportiva debe llegar a un compromiso entre la necesidad de tener una buena estabilidad a alta velocidad, y ser ágil a la entrada de las curvas. La tendencia actual está entre 1270 mm en las motos más pequeñas y 1400 mm para las motos más grandes y rápidas.

5.2.5. DIÁMETRO DE LAS RUEDAS

Como se ha comentado antes tanto las llantas como los neumáticos son proporcionados por la competición y todos los participantes deben usar estos elementos. Las llantas facilitadas son de aluminio de un diámetro de 17”.

Son algo más pequeñas que las llantas de las motos comerciales y de las que se usaban en décadas anteriores. Mientras que los neumáticos de que disponen son Dunlop Motorsport:



Rueda delantera: 95/70

Rueda trasera: 115/70

El numerador representa la anchura del neumático y el denominador la relación “altura de la sección/anchura”. La altura de la sección se considera la distancia entre el perímetro de la llanta hasta el perímetro del neumático. Por lo tanto el radio de la rueda será el radio de la llanta (conocido) + altura de la sección.

Altura de la sección delantera: $0,7 = x / 95 \Rightarrow x = 66,5 \text{ mm}$

Altura de la sección trasera: $0,7 = x / 115 \Rightarrow x = 80,5 \text{ mm}$

Diámetro de la llanta: $17 \cdot 25,4 = 431,8 \text{ mm}$

Radio de la llanta: $431,8 / 2 = 215,9 \text{ mm}$

Radio de la rueda delantera: $215,9 + 66,5 = 282,4 \text{ mm}$

Radio de la rueda trasera: $215,9 + 80,5 = 296,4 \text{ mm}$

Son unos neumáticos estándares usados en motocicletas de competición de pequeña cilindrada. Debido a que no se pueden usar otros elementos que no sean los proporcionados por la organización, no se profundizará mucho en los diferentes efectos que puedan tener las ruedas en el comportamiento de la motocicleta ya que no sería de gran utilidad.

5.2.6. PESO (MASA) Y SU POSICIÓN

Hablando en general, cuanto menos masa tenga una moto, mucho mejor. Bajo la influencia de una fuerza dada, cuanto menor sea la masa más rápido acelerará. Esto no sólo significa una enérgica respuesta para un motor con una potencia dada; también implica obtener una motocicleta mucho más sensible a cualquier fuerza que haga el piloto. Tan

importante como la masa que tenga la motocicleta es su distribución y la ubicación del centro de gravedad, tal y como muestran las siguientes consideraciones. En este caso el reglamento funcional de la competición Motostudent, exige que el peso de la motocicleta en vacío sea de al menos 90 kgr.

Equilibrio. Un peso contenido y un centro de gravedad bajo ayudan a tener un buen equilibrio. La figura 5.23 muestra cómo, para un determinado grado de inclinación, el par desestabilizador es directamente proporcional al peso y a la altura del centro de gravedad.

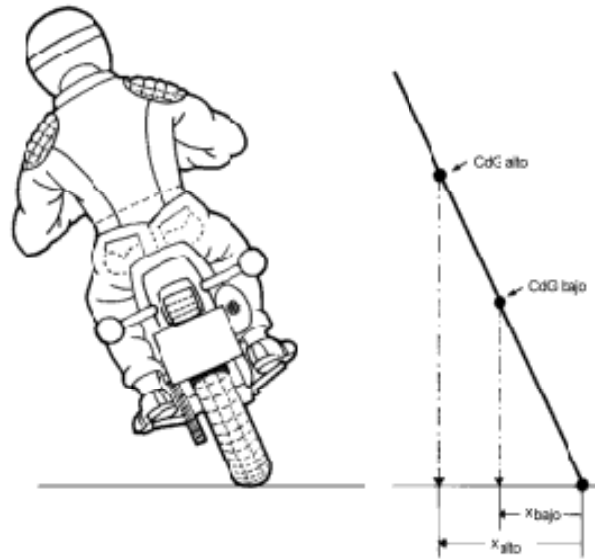


Fig. 5.23 El par desestabilizador es igual a $Wt \cdot x$, o sea el peso (Wt) multiplicado por el brazo de palanca (x). Dado que el brazo de palanca es proporcional a la altura del centro de gravedad, un centro de gravedad alto proporciona un mayor efecto desestabilizador.

Transferencia de carga. Durante la frenada, la carga vertical se transfiere desde la rueda trasera hacia la delantera. Durante la aceleración la transferencia es en sentido contrario. Aumentando la distancia entre ejes disminuye la transferencia de carga, lo mismo ocurre si bajamos el centro de gravedad o reducimos la masa. La transferencia de carga no se ve afectada por la localización longitudinal del centro de gravedad, aunque esto como es obvio controla la carga estática que soporta cada rueda.

Tracción. Dado que la fuerza propulsora que la rueda trasera puede transmitir al suelo es proporcional a la carga que soporta la rueda, una distribución de peso cargada atrás mejora la tracción. De todas formas, debemos tener en cuenta que también es necesario que la rueda delantera se mantenga en contacto con el suelo para poder girar. Una distribución de peso que cargue más el tren delantero ayuda a mejorar la estabilidad direccional, como ocurre por ejemplo con un dardo o una flecha.

Ángulo de inclinación. El ángulo de inclinación necesario para equilibrar la fuerza centrífuga cuando damos una curva se ve afectado un poco por la altura del centro de gravedad. Ver figuras 5.24 y 5.25.

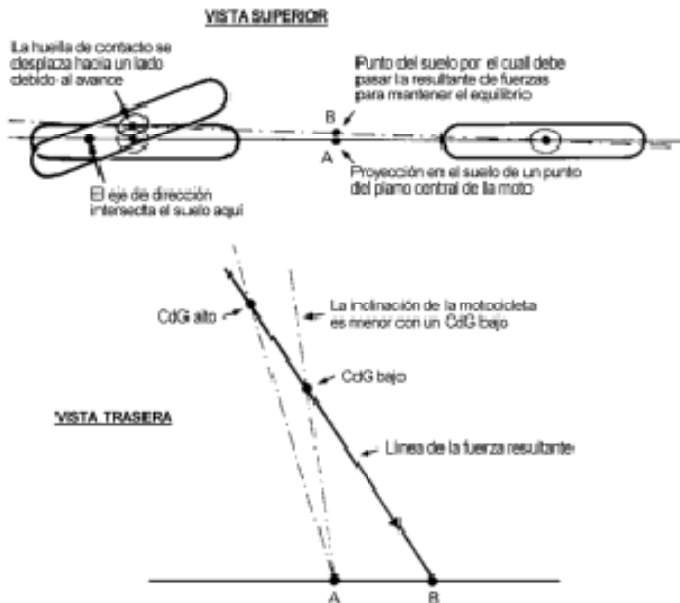
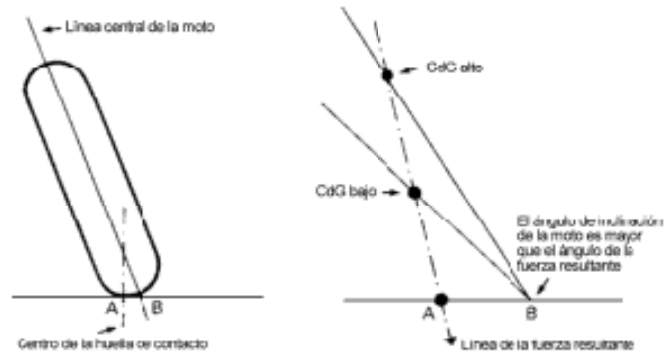


Fig. 5.24 Aunque un centro de gravedad bajo requiere un menor grado de inclinación, en la práctica el efecto es menor al verse contrarrestado por un efecto opuesto debido a la anchura de los neumáticos.

Fig. 5.25 Podemos ver diferentes ángulos de inclinación requeridos con distintas alturas del centro de gravedad, debido a la anchura del neumático. Este efecto es opuesto al mostrado anterior.



Movimientos angulares. En lo que concierne a movimientos lineales; es la cantidad de masa de la motocicleta la que es importante. Pero cuando se originan los movimientos angulares de cabeceo (alrededor de un eje transversal), guiñada (alrededor de un eje vertical) e inclinación (alrededor de un eje longitudinal), la distribución de la masa es importante porque es la que gobierna lo que llamamos momentos de inercia. Estos son una medida del efecto de inercia alrededor de cada eje en particular y su valor determina la facilidad con que podemos aplicar una aceleración angular a la moto alrededor de cada eje en particular y su valor determina la facilidad con que podemos aplicar una aceleración angular a la moto alrededor de ese eje.

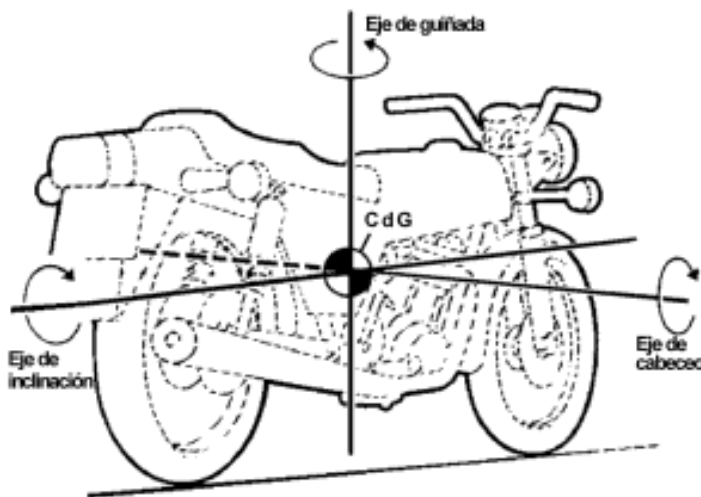


Fig. 5.26 Los tres ejes principales alrededor de los cuales una moto puede rotar. El dibujo sólo muestra la dirección de estos ejes, dibujados a través del centro de gravedad. Su ubicación real depende de muchos factores dinámicos que se muestran en otros capítulos.

Cabeceo. La inercia de cabeceo controla la velocidad con que la motocicleta se hunde hacia adelante o hacia atrás ante diversas situaciones como frenar, acelerar o circular por un firme bacheado. Excepto en trial y motocross, no existe gran necesidad de una respuesta rápida de giro alrededor del eje por lo que una gran inercia de cabeceo no es muy dañina. De hecho, puede contribuir a mejorar el confort al acelerar o al pasar sobre baches. No es fácil definir geoméricamente el eje alrededor del cual una moto cabecea debido a que varía con la configuración de la moto. Por ejemplo, si la motocicleta tiene suspensión delante y no la tiene detrás, girará alrededor del eje de la rueda trasera, mientras que una moto con la configuración contraria (muelle detrás, rígida delante) rotaría alrededor del eje de la rueda delantera. En el caso de una moto convencional, con muelles en ambos trenes, el eje de cabeceo depende de la geometría de la suspensión y de la dureza de los muelles. De los tres posibles movimientos angulares, el cabeceo es el único que supone fundamentalmente un movimiento de la masa suspendida con respecto a las ruedas, ya que la inclinación y la guiñada son movimientos relativos a las coordenadas de la tierra.

Guiñada. Cualquier vehículo está sujeto a cierto grado de aceleración de guiñada al entrar en una curva. En este caso, la elección entre un momento de inercia grande o pequeño tiene efectos contrapuestos. Por ejemplo, un valor alto mejora la estabilidad direccional mientras que un valor bajo facilita los cambios rápidos de dirección y minimiza los efectos de un derrapaje. Dentro de los límites prácticos, parece mejor conseguir un bajo momentos de la misma. Naturalmente, esto hace que se reduzca el momento de cabeceo también.

Inclinación. El momento de inercia alrededor del eje de inclinación es la suma de las componentes individuales de todas las masas multiplicada por el cuadrado de la distancia que las separa de un eje de inclinación que pase por el centro de gravedad. Un momento de inercia bajo alrededor del eje de inclinación es deseable para conseguir sin mucho esfuerzo cambios rápidos en el ángulo de inclinación de la moto.

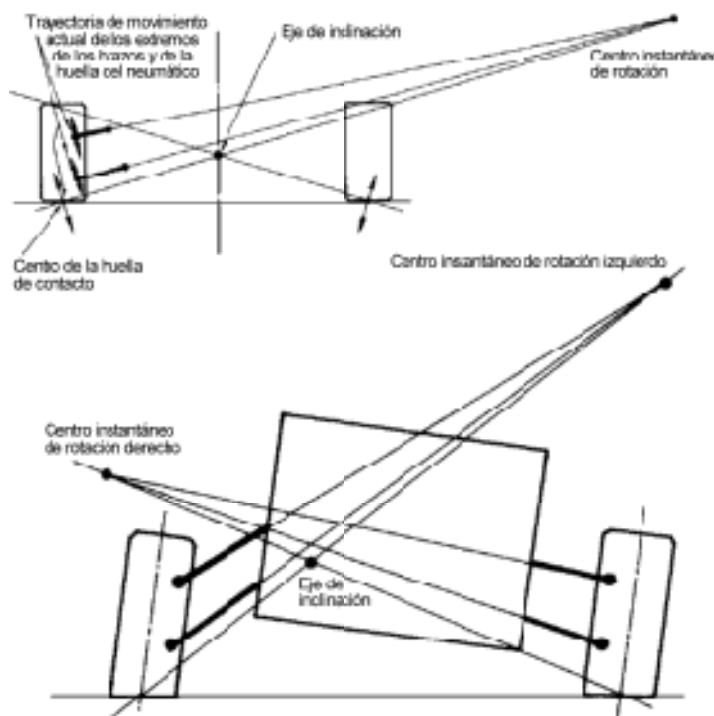


Fig. 5.27 El dibujo superior muestra cómo, con un sistema de dos brazos articulados, se define un centro instantáneo de rotación.

El movimiento instantáneo de la huella de contacto del neumático forma un ángulo recto con la distancia que lo separa de su centro instantáneo de rotación. El punto donde se encuentran los radios derecho e izquierdo se define como Centro de inclinación. Este es el único punto que satisface el movimiento del lado derecho y del izquierdo, en cualquier posición de inclinación.

El dibujo inferior muestra cómo se mueve el centro de inclinación conforme el coche rota y los ángulos de los brazos articulados son distintos en ambos lados.

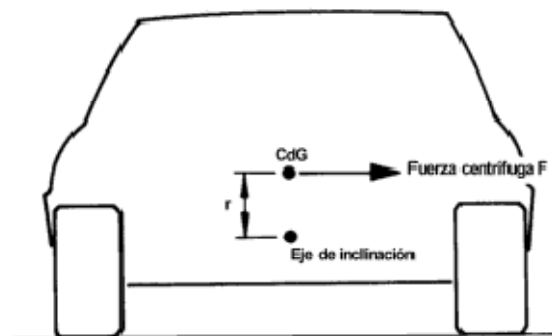
Los términos eje de inclinación y centro de inclinación se han usado desde hace mucho tiempo en el mundo de los automóviles y están geoméricamente definidos. La vista lateral de la suspensión define el eje para cualquier ángulo de inclinación de la moto. La fig. 5.27 muestra el concepto de centro de inclinación de un coche. El eje de inclinación es simplemente el eje que une los centros de inclinación delantero y trasero, los cuales suelen estar normalmente a diferentes alturas. Puede resultar de ayuda visualizar el movimiento del cuerpo con respecto a las ruedas y al CdG. En esta época del diseño mediante ordenador el uso del concepto de centro de inclinación (roll) está ya algo anticuado en el mundo de las cuatro ruedas.

Resulta algo irónico y poco afortunado, que estos términos se hayan puesto de moda recientemente en el mundo del motociclismo, cuando no tienen nada que ver. Las motos, al ser vehículos con tracción a una rueda no tienen mecanismos de suspensión similares a los de los coches, que van de lado a lado y por lo tanto el significado de este término al hablar de motos es a menudo completamente malentendido.

La fig. 5.28 muestra cómo la fuerza centrífuga actúa sobre el centro de gravedad, que suele estar siempre por encima del centro de inclinación. La distancia entre el centro de inclinación y el centro de gravedad produce un par (normalmente llamado momento de inclinación) que hace que el coche se incline.

Fig. 5.28 En las curvas la fuerza centrífuga produce un par alrededor del eje de inclinación igual a $F \cdot r$, llamado momento de inclinación o par de inclinación.

Si $r = 0$ entonces no existe giro lo cual produce otros efectos indeseables como una extensión excesiva de la suspensión.



Al comparar los coches y las motos, se ve claramente que en este tema los conceptos no son equivalentes. Al contrario que en un coche, en una moto el momento de inclinación que crea la fuerza centrífuga se equilibra exactamente con el momento de inclinación opuesto creado por la acción de la fuerza de la gravedad que se genera al inclinar la moto. Sólo durante la fase transitoria de inclinación existe un momento de inclinación que no está equilibrado, y su origen es distinto que en el caso de los coches. Si tuviéramos que aplicar el criterio basado en los coches para determinar el eje de inclinación en una motocicleta, tendría

que estar al nivel del suelo, a través de las huellas de contacto de los neumáticos, para producir un par de inclinación adecuado.

Quizás lo mejor sería desarrollar un eje de inclinación específico para motocicletas, pero en realidad el eje de inclinación puede estar donde queramos, todo depende de nuestro punto de referencia. Podemos estar mirando desde el espacio exterior, desde la superficie de la tierra en un punto fijo, desde la superficie de la tierra siguiendo a la moto, o desde distintas posiciones de la propia moto. Cada punto de vista produce un eje de inclinación distinto. Imaginemos que miramos la moto por detrás desde un punto fijo en el suelo, y que la dejamos a medio camino durante la fase de inclinación. En ese punto la moto se estará moviendo lateralmente hacia el centro de la curva, pero también tendrá un movimiento de rotación tal y como se muestra en la figura 5.29

Estos dos movimientos juntos producen un movimiento combinado en el centro de gravedad, como indica la figura 5.30. Claramente entonces, el centro de rotación de este gran arco está en algún sitio por debajo del nivel del suelo. Debido a que las componentes relativas de los movimientos lateral y longitudinal varían a lo largo del proceso de entrada en la curva, el eje de inclinación definido de esta forma variará de posición también. Esta es una forma válida de observar los movimientos de inclinación, pero ciertamente tiene muy poca utilidad para nosotros. Volviendo a la figura 5.29, vamos a considerar las cosas de otra forma. Vistos desde el suelo, todos los puntos de la moto tienen una combinación de movimiento lateral y el resto de puntos están rotando alrededor de él. Visto así, si necesitamos un eje de inclinación teórico, este sería el más lógico.

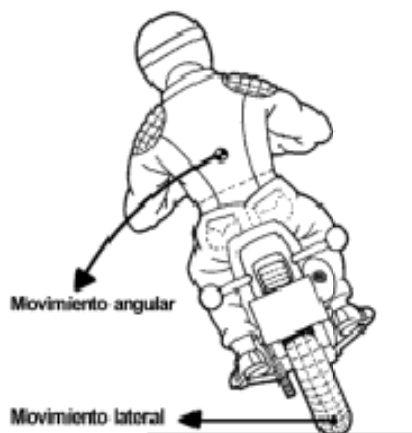


Fig. 5.29 Se muestran los movimientos lateral y angular.



Fig. 5.30 Al añadir los dos movimientos se produce un movimiento combinado con un radio más grande.

Otras opiniones sugieren que la moto rota alrededor del centro de gravedad, no es difícil ver que si esto fuera así, la huella de contacto del neumático perdería el contacto con el suelo conforme la moto fuera rotando. Aunque para estimar el comportamiento de inclinación normalmente calculamos el momento de inercia de inclinación alrededor del centro de gravedad, tal y como vemos cuando estudiemos la dinámica en curva, esto no quiere decir que este tenga que ser considerado el eje de inclinación. En la práctica parece que no hay ninguna razón útil para desarrollar conceptualmente un eje de inclinación para motocicletas.

5.3. ELECCIÓN INICIAL DE LOS PARÁMETROS

Tras observar la base teórica sobre la influencia de cada parámetro se llega a la conclusión de que no existe un diseño perfecto. Hay muchas opciones que son válidas y pueden dar un muy buen resultado.

Antes de empezar con la optimización de dichos parámetros se debe elegir unos parámetros iniciales para tener un modelo con el cual empezar a trabajar. Viendo la gran diferencia entre las motocicletas comerciales y las de competición, partiremos de los parámetros de la Aprilia RS. Se podría perfectamente haber escogido los valores de la Honda RS, pero teniendo en cuenta que la Aprilia RS corre en el mundial, la cual es una competición más exigente que donde corre la Honda RS, se partirá de la Aprilia.

Se sabe con certeza que una motocicleta con estos valores tendrá un buen comportamiento ya que son valores reales de mundo profesional de motociclismo. Las grandes marcas de motocicletas que compiten como Aprilia, Honda, etc. Tienen una larga experiencia en el diseño y construcción de vehículos de dos ruedas por lo que su fiabilidad es más que reconocida. Lo lógico sería obtener en este trabajo unos valores finales no muy alejados de los de partida.

Parámetros principales	Iniciales
Rr (Radio de la rueda posterior [m])	0,296
Rf (Radio de la rueda anterior [m])	0,282
M (Masa total del vehículo con el piloto [kg])	155
B (Posición horizontal del CDG total [m])	0,612
H (Posición vertical del CDG total [m])	0,51
p (Batalla [m])	1,224
epsilon (Ángulo de lanzamiento [rad])	0,4014
an (avance normal [m])	0,088

Todos los datos menos los referidos a los CDG han sido tomados de la Aprilia tal y como se ha comentado. Pero al no poder conseguir información detallada sobre el centro de gravedad de la misma se ha realizado un cálculo sencillo del mismo, teniendo en cuenta una serie de consideraciones.

5.3.1. CENTRO DE GRAVEDAD ÓPTIMO

Para el cálculo del centro de gravedad óptimo, se supone que la situación ideal en aceleración consiste en que la rueda trasera empiece a patinar precisamente cuando la delantera empieza a despegar del suelo (y, durante la frenada, que la rueda delantera se bloquea precisamente cuando la trasera empieza despegar), entonces se puede diseñar la geometría de la moto para estas situaciones ideales.

Si la moto tiene una masa m , su centro de gravedad está a una distancia x por detrás de la rueda delantera y a una distancia y de suelo y la batalla es w , entonces se pueden calcular las fuerzas que actúan sobre la moto. Las reacciones entre el suelo y los neumáticos son $F1$ (delantero) y $R1$ (trasero), y el coeficiente de rozamiento entre el neumático y la carretera es μ .

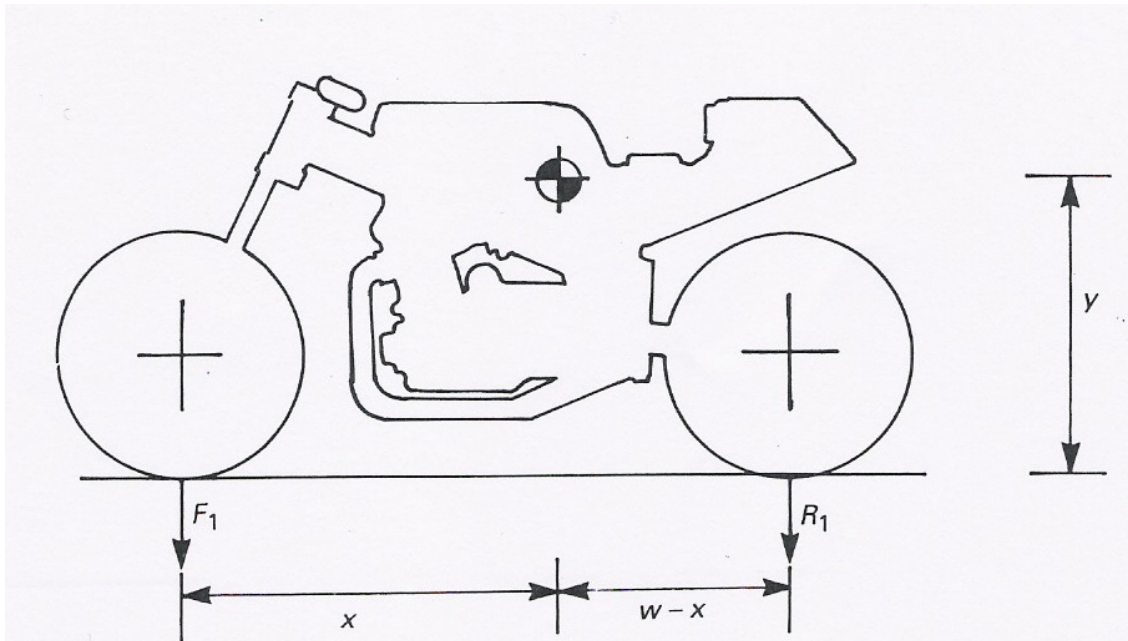


Fig. 5.31

Aceleración

La máxima fuerza que puede transmitir la rueda trasera es $R_1 = m \cdot g$; a partir de dicho valor, el neumático patinaría. Si la rueda delantera empieza a despegar del suelo en este punto, entonces $R_1 = m \cdot g$, es decir, ahora todo el peso se carga sobre la rueda trasera.

El par que actúa en el sentido de hacer volcar la moto es $R_1 \cdot \mu \cdot y = m \cdot g \cdot \mu \cdot y$, y el efecto del peso de la moto, que se opone a dicho par, es $m \cdot g \cdot (w - x)$; los dos están en equilibrio, por lo tanto:

$$m \cdot g \cdot \mu \cdot y = m \cdot g \cdot (w - x)$$

$$w - x = \mu \cdot y$$

Frenada

La fuerza máxima que puede transmitir la rueda delantera es $R \cdot \mu$, que se iguala con $m \cdot g \cdot \mu$ en el punto en el que la rueda trasera empieza a despegarse del suelo. El par de volcado es $m \cdot g \cdot \mu \cdot y$, (como antes pero en sentido contrario), y el efecto estabilizador del peso de la moto es $m \cdot g \cdot x$. Por lo tanto:

$$m \cdot g \cdot \mu \cdot y = m \cdot g \cdot x$$

$$x = \mu \cdot y$$

A partir de las ecuaciones anteriores:

$$y = w/2 \cdot \mu = 1224/(2 \cdot 1,2) = 510 \text{ mm}$$

$$x = w/2 = 1224/2 = 612 \text{ mm}$$

Por lo tanto, el centro de gravedad debe estar a mitad de camino de la batalla, y su altura depende de la batalla y la fricción que den sus neumáticos. Si el coeficiente de rozamiento es $\mu=1,2$ (máximo adherencia para neumático deportivo, pista seca), entonces y será algo menor que la mitad de la batalla. Si por el contrario $\mu= 0,5$ (mínima adherencia de neumáticos de carretera, carretera mojada), entonces lo ideal sería que y fuese la batalla.

Estos valores no son perfectamente aplicables, pero cuando los niveles de fricción son bajos, el piloto puede mejorar la tracción (a) elevando el centro de gravedad (levantando el cuerpo en una moto de carreras en pista, poniéndose de pie) y echándose hacia atrás en las aceleraciones, hacia delante en las frenadas (así modifica el valor de x). Lo más probable es que los factores que marquen el límite sean el patinado de la rueda trasera o que se bloquee la delantera; habrá solo peso sobre la rueda trasera, por lo que se puede mejorar el esfuerzo de frenada utilizando también el freno de la rueda trasera, además del delantero, cuando estamos en condiciones de poca adherencia. (De esta manera se aumentará la transferencia de pesos, lo que permitirá transmitir más fuerza de frenado de la rueda delantera).

Por último comentar que, estas proporciones de x e y no tienen en cuenta los desplazamientos de la suspensión debidos a la transferencia de pesos. Por lo tanto, las dimensiones x e y nos dan la posición del centro de gravedad durante la aceleración o frenada. Con la frenada la suspensión delantera se comprime, y el centro de gravedad baja (también se reducirá la batalla, si la horquilla es telescópica, como es el caso); por ello, los valores de x e y con la moto en situación estática serán algo superiores a los que se desprenden de las ecuaciones citadas arriba. De la misma manera, la suspensión trasera se comprime durante la aceleración.

6. OPTIMIZACIÓN DEL LAYOUT DE LA MOTO POR EL MÉTODO DE MANIOBRA ÓPTIMA

Para comenzar con el diseño de la motocicleta, primero se deben determinar los parámetros de diseño más importantes relacionados con la distribución de masas y con la geometría general de la motocicleta. El software del *Método de Maniobra Óptima* es un potente programa informático que esencialmente simula un piloto ideal y calcula el mínimo tiempo de una vuelta rápida para una motocicleta y circuito dados.

Para justificar la credibilidad de este software en su aplicación en el diseño de la motocicleta, se realizará una comparación entre los primeros resultados obtenidos en la simulación con los datos adquiridos de una telemetría real. Una vez dada la comparación por válida se realizará la optimización de la motocicleta para el circuito de Alcañiz, que es el circuito donde correrá la moto a diseñar.

En el análisis paramétrico se realizará un diseño de experimentos para descubrir la influencia de cada parámetro en los resultados finales, mediante este estudio estadístico se asegurará que se hacen solo las simulaciones necesarias y con un criterio a seguir. Una vez comprobado la importancia de cada parámetro y su influencia, de fijarán dichos parámetros para obtener el mínimo tiempo posible en la vuelta rápida del circuito. Para profundizar en mayor medida con el programa consúltese el Manual del Xoptima (anexo 3).

6.1. INTRODUCCIÓN

El diseño de una nueva motocicleta de competición y la optimización del comportamiento es un largo proceso que empieza con las especificaciones ingenieriles (maniobrabilidad o mínimo tiempo por vuelta, máxima velocidad, índices de manejabilidad, etc.) y acaba con el vehículo corriendo en un circuito de velocidad. El proceso de diseño se desarrolla a través de múltiples pasos en los que los test de puesta a punto en carretera del prototipo serán probablemente los más importantes. Gran información cinemática y dinámica del vehículo es monitorizada y registrada para ser comparada con las especificaciones iniciales y el tiempo por vuelta, que es el índice de comportamiento más importante.

Modificaciones más a fondo y posteriores tests son siempre necesarios y el juicio del piloto son siempre de gran importancia para desarrollar la máquina en la buena dirección. De todas maneras los test en carretera de puesta a punto requieren de mucho tiempo y bastantes medios o recursos, por lo tanto es conveniente usar simulaciones numéricas para al menos

identificar un pequeño subconjunto de parámetros y planificar los correctos cambios en los que trabajar.

Las simulaciones numéricas están reconocidas como una herramienta útil siempre que el modelo matemático este bien validado y esté disponible un modelo del piloto. De hecho, así como en la vida real la destreza y la sensibilidad del piloto en los test de pilotaje pueden dirigir al equipo de ingenieros en la correcta dirección, en simulaciones el modelo del piloto puede influenciar en la optimización de los parámetros. Un piloto ideal siempre debería de ser capaz de conducir el vehículo en este comportamiento máximo, sacando el máximo provecho al escenario de la carretera (adherencia superficial, geometría de la carretera, etc.) y adaptar su estilo de conducción tanto al vehículo dinámico, debido a los cambios de la máquina, como a los diferentes contextos del entorno.

Existen evidencias experimentales de que el ser humano se vale del *control previo* para anticiparse a la trayectoria que tiene delante y a un bajo nivel de un bucle cerrado con retroalimentación para compensar los errores realizados en la trayectoria trazada. En el control previo el piloto decide la “mejor” *maniobra* a llevar a cabo para alcanzar un criterio dado, que para pilotos de velocidad definitivamente es el mínimo tiempo por vuelta. La selección de las apropiadas acciones de control se basa en el “*modelo de vehículo mental*” que acumula una larga experiencia en conducción. En el proceso cognitivo del ser humano el modelo representa de alguna manera la dinámica de la motocicleta y su respuesta a un amplio rango de inputs visuales, vestibulares y sinestésicos en diferentes condiciones y modelos de carretera/circuito (*modelo escenario*).

El paradigma del modelo-escenario del vehículo y modelo-mejor inputs de control tiene su equivalencia en la formulación de control óptimo. De hecho, desde el punto de vista de la teoría de control óptimo, la simulación del problema de mínimo tiempo por vuelta de la moto se representa como la minimización de la integral de la función objetivo (el tiempo en este caso) sujeto a un conjunto de restricciones. Las restricciones incluyen las ecuaciones de movimiento en el sistema de piloto-motocicleta, las iniciales y finales o condiciones cíclicas (por ejemplo posiciones y velocidades del vehículo en la línea de salida y meta en la pista de velocidad) y un amplio rango de inecuaciones. Las inecuaciones comprenden las limitaciones físicas de la motocicleta (como la saturación por las fuerzas del neumático, par máximo del motor, etc.), las limitaciones fisiológicas del piloto y la geometría de la pista y las condiciones de adherencia de la superficie de la carretera. Por lo tanto las ecuaciones y las inecuaciones implementan los modelos de vehículo y escenario y la función objetivo y las condiciones necesarias de los campos optimizables para el control óptimo.

Los resultados de la formulación del control óptimo es toda la maniobra del sistema piloto-motocicleta durante el mínimo tiempo por vuelta (incluyendo trayectorias) y los inputs que produce el piloto como la maniobra. Una de las ventajas de este método es que las “reglas de pilotaje” (a diferencia con otros métodos como la lógica difusa o el enfoque de red neural)

no tienen que predefinirse: simplemente emergen del criterio de optimización y de la propia solución del problema de control. Las limitaciones de las actuaciones neuromusculares del ser humano (e igual las preferencias de pilotaje) podrían tenerse en cuenta añadiendo apropiadas funciones transferencia de respuesta humana en términos de ecuaciones diferenciales e inecuaciones de restricciones en los inputs de control como por ejemplo el máximo par de dirección y el ratio de par de dirección. En cualquier caso la maniobra producida lleva al vehículo a sus límites aplicando un conjunto de controles óptimos que cumplen con los que un humano puede ejercer.

Como segunda ventaja importante del método, el valor escalar de la integral (llamado índice de comportamiento) es un objetivo medido del comportamiento piloto-motocicleta en una específica pista de velocidad. El método garantiza que si algún parámetro de diseño (como las masas, geometría del chasis, etc.) se cambia, el modelo del vehículo siempre será conducido como un piloto ideal lo hiciese. Como consecuencia, basándose en el índice de comportamiento diferentes motocicletas pueden ser comparadas e identificadas los mejores parámetros de diseño. El significado del índice de comportamiento puede cambiar para una moto dada si los límites de actuación neuromusculares del ser humano están incluidos como restricciones o no. En el primer caso el comportamiento mide el esfuerzo que debe realizar el piloto para conducir la motocicleta en su mejor comportamiento (conocido como manejabilidad). En el segundo caso si los límites del piloto no están considerados en la formulación, el comportamiento intrínseco de la motocicleta es medido, conocido como maniobrabilidad.

Todo este marco (formulación e índice de comportamiento relacionados con la maniobrabilidad y manejabilidad) se llama *Método de la Maniobra Óptima* y representa una manera unificada de evaluar el comportamiento de la máquina sola o el sistema de piloto-máquina.

6.1.1. SOLUCIÓN AL PROBLEMA DE CONTROL ÓPTIMO

El problema de control óptimo está formulado matemáticamente mediante las siguientes fórmulas:

$$\int_0^L J(x(s), u(s)) \cdot ds \quad (1)$$

$$A(x(s))\dot{x}(s) - f(x(s), u(s)) \quad (2)$$

$$bci(x(0)) = 0 \quad (3)$$

$$bcf(x(L)) = 0$$

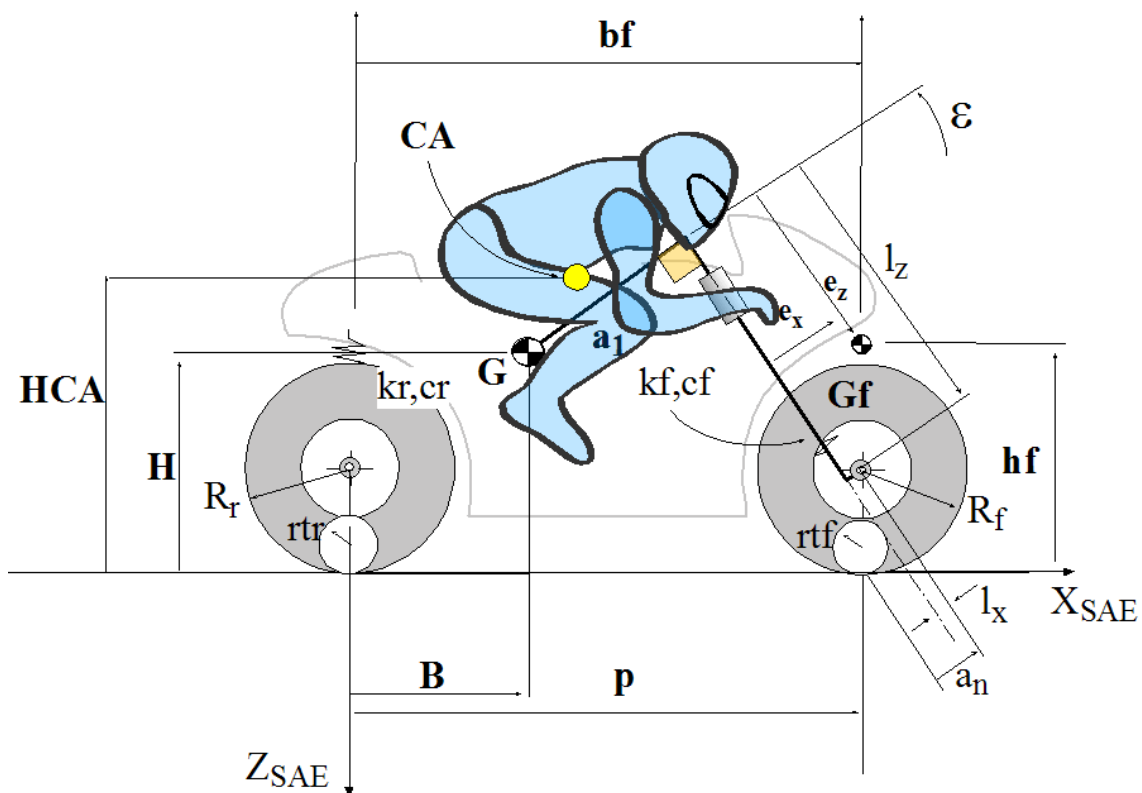
$$g(x(s), u(s)) \leq 0 \quad (4)$$

La ecuación (1) es la función objetivo (en este caso el mínimo tiempo) y las ecuaciones (2), (3) y la inecuación (4) describen la motocicleta multi-body y el modelo escenario. El modelo escenario en este caso corresponde al circuito donde se realiza la simulación. A continuación se darán más detalles.

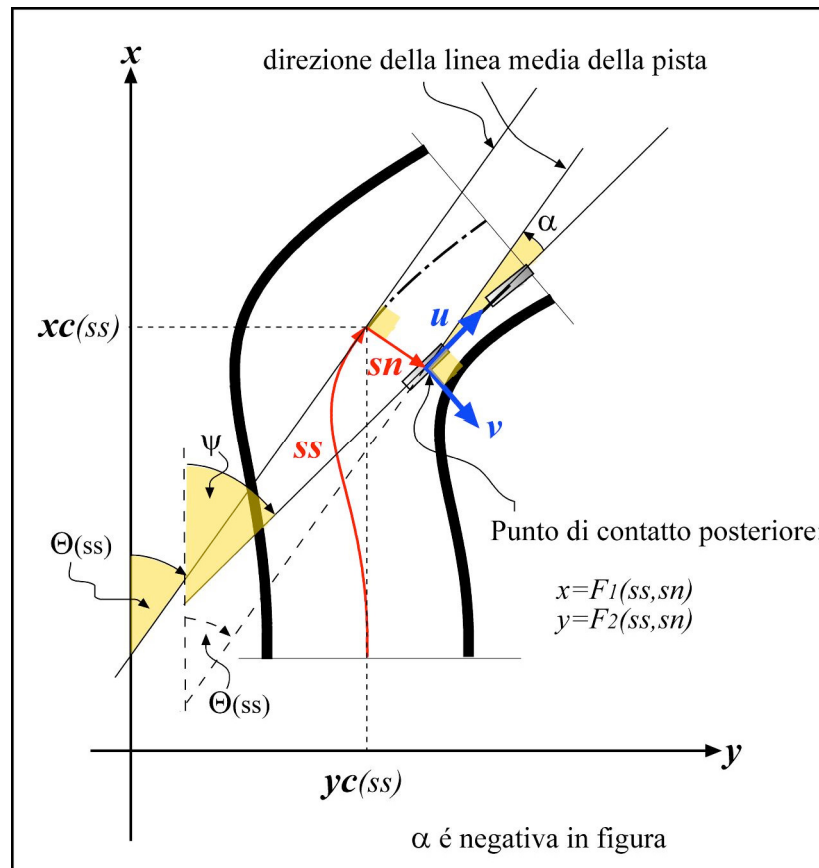
Al menos dos grupos de métodos se pueden aplicar para resolver un problema de este tipo: métodos directos e indirectos, en este caso se ha adoptado el método indirecto. De acuerdo a los métodos indirectos, el problema se resuelve calculando la primera variación del incremento funcional mediante multiplicadores de Lagrange para eliminar las restricciones de igualdad. El problema de valor condicionado (BVP, Boundary Value Problem) puede resolverse de tres maneras numéricas distintas: con una sola iteración, con múltiples iteraciones y con métodos de discretización como la aproximación por elementos finitos. Para este trabajo se escogió la aproximación por elementos finitos por ser más robusto en las estimaciones iniciales de las variables planteadas y multiplicadores de Lagrange. Para la solución de un gran sistema no lineal que deriva de una discretización del BVP se desarrollaron un algoritmo numérico y funciones de penalización. Las ecuaciones del BVP y sus jacobianos son hallados simbólicamente para mejorar la precisión de la solución y la velocidad de convergencia del método.

El modelo de la motocicleta adoptado consta de cuatro cuerpos rígidos unidos entre ellos: los ensamblajes delantero y trasero y las ruedas delantera y trasera como puros momentos de inercia. El ensamblaje delantero consta de: horquilla delantera, manillar, masa de la rueda delantera y su momento de inercia radial. El ensamblaje trasero está compuesto por: motor, chasis, basculante, masa de la rueda trasera y su momento de inercia radial y cuerpo del piloto. Las ruedas delanteras y traseras están consideradas como cuerpos adicionales pero sólo tienen en cuenta los momentos de inercia sobre el eje de giro y la velocidad de giro es aproximadamente proporcional a la velocidad de avance de la moto. De este modo el modelo de la motocicleta tiene 5 grados de libertad: velocidad de avance y

lateral $u(t)$, $v(t)$, ángulo de inclinación y guiñada $\phi(t)$, $\psi(t)$ y el ángulo de la dirección $\delta(t)$. Los neumáticos están modelados con sección transversal toroidal y generan tres fuerzas en el punto de contacto. Las fuerzas laterales de los neumáticos están modelados con la simplificada versión de la fórmula de Pacejka como una función del ángulo de deriva λ y ángulo de inclinación de las ruedas ϕ , el retraso de tiempo está modelado mediante una ecuación diferencial de primer orden. El modelo de las suspensiones es muy simple y consiste en una ecuación de primer orden que aproxima el retraso de tiempo de la transferencia de cargas entre las ruedas delantera y trasera debido a la presencia de las suspensiones. Los inputs de dirección son respectivamente las fuerzas longitudinales en las ruedas delantera y trasera y el par de dirección aplicado en el manillar.



El escenario de la carretera, el del circuito, está descrito en coordenadas curvilíneas como una lista de segmentos de una longitud y curvatura dada que cambian linealmente en una superficie plana con el coeficiente de adherencia dado. Para cada segmento la distancia desde la línea central de la carretera hasta los bordes izquierdo y derecho pueden ser diferentes o cambiar linealmente.



6.2. VALIDACIÓN DEL MODELO DEL PROTOTIPO

Para validar nuestro modelo de la motocicleta y comprobar que las bases teóricas y los resultados del Método de Maniobra Óptima son válidos, se realizará una comparación con una telemetría dada. Esta telemetría se obtuvo de una moto Metrakit de 125 cc. Se escogió esta motocicleta porque las características de la motocicleta a diseñar y la Metrakit son bastante similares. Por lo tanto el comportamiento de ambas motocicletas será muy parecido y se asegura así que la validación del modelo sea lo más preciso posible.

La telemetría fue adquirida en el Circuito de Albacete y la Metrakit fue pilotada por un piloto federado que competía con dicho vehículo. Se considera que el piloto pilota la motocicleta de manera eficiente y casi perfecta de manera que la información adquirida mediante la telemetría no debería de ser muy diferente a la obtenida mediante la simulación

óptima. El circuito de Albacete se caracteriza por ser un circuito no muy largo con una longitud de 3539m y una anchura de 10m.

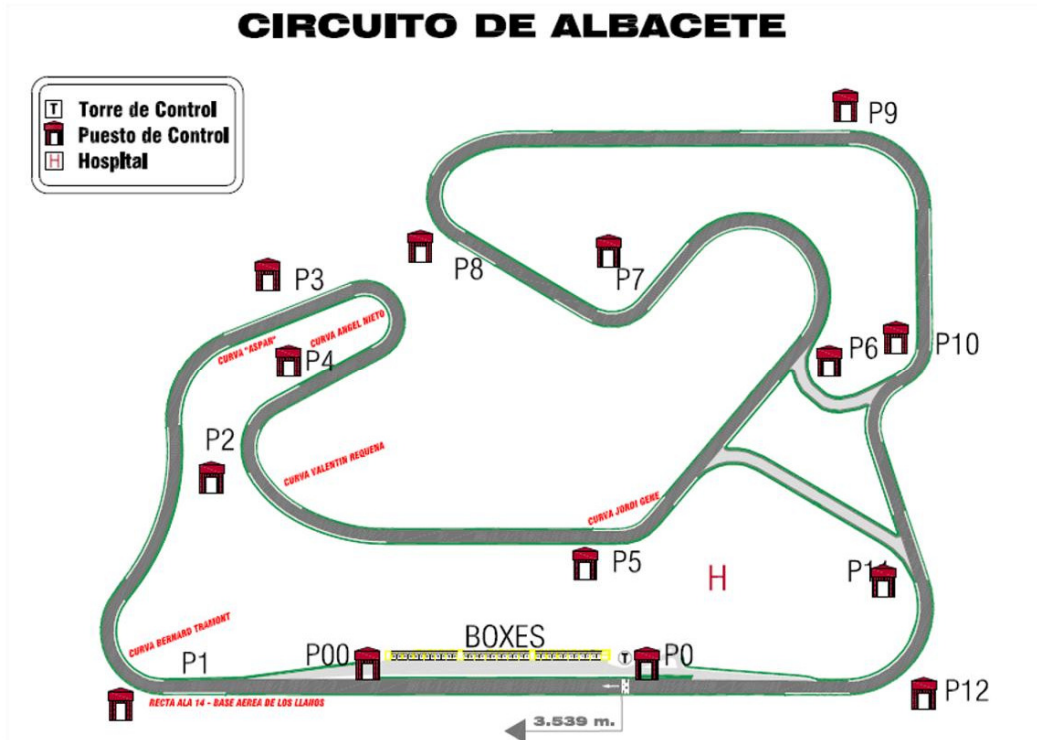


Figura 6.3

6.2.1. INPUTS

Para realizar la simulación con el XÓptima había que introducir dos archivos en un formato (.lua) legible por el programa, que correspondían al modelo del prototipo y el circuito para el que se quería optimizar la simulación.

6.2.1.1. Motorcycle

La geometría general del modelo fue cogida de la Aprilia RS del Mundial de 125. Las inercias tanto de la moto al completo como del chasis delantero (que comprende horquilla, manillar, tija, etc.) fueron calculados mediante Catia. Para ello se realizó en Catia unos dibujos aproximados de la moto con los elementos más importantes de la misma y con el piloto incluido.

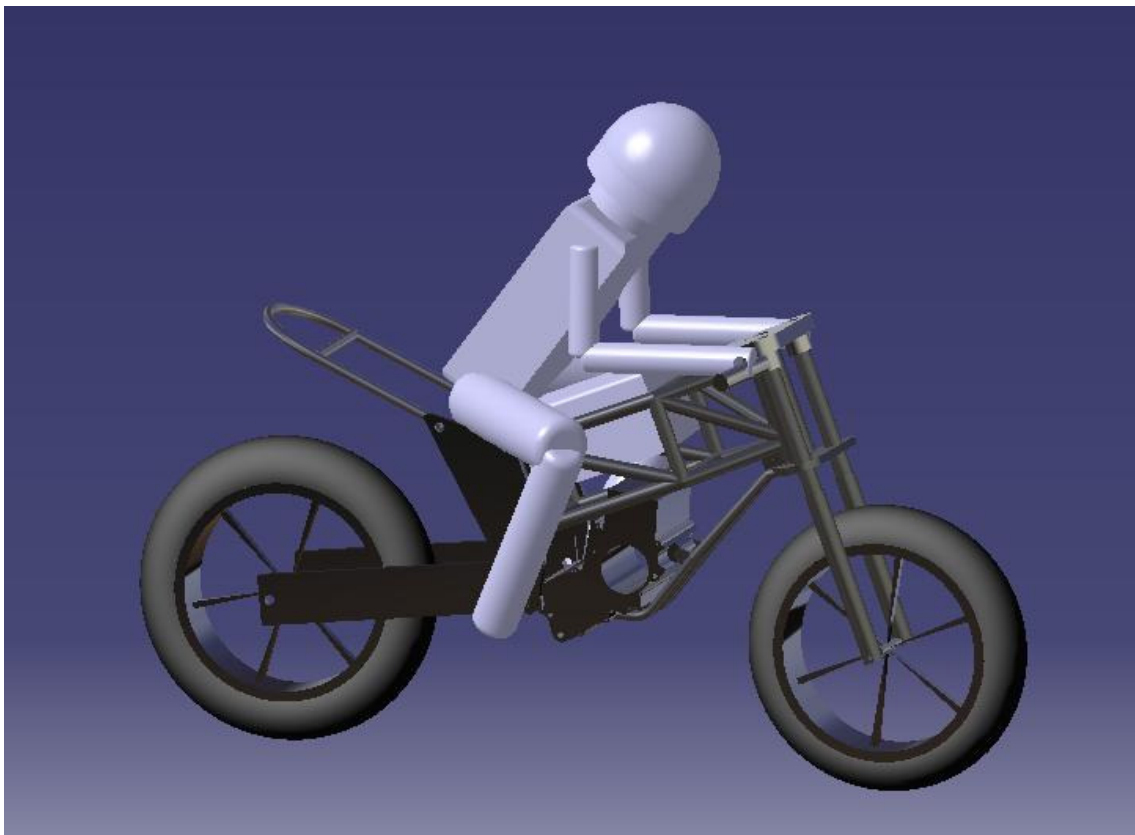


Figura 6.4

Los valores aerodinámicos fueron elegidos aproximadamente teniendo en cuenta las características de nuestra motocicleta. Debido a la falta de información de los restos de los elementos como, neumáticos, suspensión delantera y suspensión trasera, se partieron de los datos dados por parte de los colaboradores. Cabe destacar que estos datos son de fiar, la larga experiencia de los colaboradores en el campo de la ingeniería de motociclismo lo confirma. Los datos correspondientes a los neumáticos por ejemplo, eran de unas Pirelli Diablo de 125, muy

similares a las Dunlop motorsport proporcionadas por la competición. Mientras que los correspondientes a las suspensiones eran de una Superbike con la que ellos habían estado haciendo pruebas en el circuito de Santa Mónica.

Esto correspondería a una primera iteración. Una vez hecho el primer prediseño se puede realimentar el modelo y hacer los cálculos de nuevo.

Todos los inputs necesarios del modelo de la motocicleta son los siguientes:

Parámetros principales	
Rr (Radio de la rueda posterior [m])	0,3
Rf (Radio de la rueda anterior [m])	0,2824
M (Masa total del vehículo con el piloto [kg])	152,386
B (Posición horizontal del CDG total [m])	0,612
H (Posición vertical del CDG total [m])	0,510
p (Batalla [m])	1,224
epsilon (Ángulo de lanzamiento [rad])	0,4014
an (avance normal [m])	0,088
g (Aceleración de la gravedad [m/s ²])	9,807
hf (Posición vertical del CDG del eje delantero [m])	0,479
bf (Posición horizontal del CDG del eje delantero [m])	1,131
factor (coeficiente multiplicativo de la curva par del motor [defecto=1])	1
mu (coeficiente de adherencia)	1,2
Constantes	
tau_stab (coeficiente útil para la estabilidad de las ecuaciones [defecto=0,01])	0,01
tauF (coeficiente que regula el filtro de velocidad de dirección)	0,0531
tauN (retraso en el tiempo de la fuerza vertical[s])	0,1

Momentos de inercia totales	
CXZ (momentos de inercia misto entorno a los ejes X y Z del vehículo [kg*m ²])	1,53
IX (momento de inercia principal alrededor del eje X [kg*m ²])	11,215
IY (momento de inercia principal alrededor del eje Y [kg*m ²])	25,505
IZ (momento de inercia principal alrededor del eje Z [kg*m ²])	18,08
Eje delantero	
mf (masa del eje delantero [kg])	23,6165
lfx (momento de inercia principal alrededor del eje X [kg*m ²])	1,379
lfy (momento de inercia principal alrededor del eje Y [kg*m ²])	1,6255
lfz (momento de inercia principal alrededor del eje Z [kg*m ²])	0,531
Rueda y neumático posterior	
KlambdaR (Cλ neumático posterior [1/rad])	18,72
KphiR (Cφ neumático posterior [1/rad])	2,08
Rear_DX (Límite de adherencia longitudinal del neumático posterior)	1,45
Rear_DY (Límite de adherencia lateral del neumático posterior)	1,3
umr (masa no suspendida rueda trasera, rotativos y no rotativos, [kg])	15
mwr (masa rotativa equivalente de la rueda posterior [kg], Iax=mwr*Rr ²)	3,88888889
sigmaR (longitud de relajación del neumático del neumático posterior [m])	0,0312
rt1 (radio reducido de la rueda (radio rueda - radio toroide [m])	0,098
rho1 (radio del toroide del neumático posterior [m])	0,202
kpr (rigidez de la rueda trasera)	130000
Rueda y neumático anterior	
KlambdaF (Cλ neumático anterior [1/rad])	18,122

KphiF (Cφ neumático posterior [1/rad])	2,132
Front_DX (Límite de adherencia longitudinal del neumático anterior)	1,45
Front_DY (Límite de adherencia lateral del neumático anterior)	1,3
umf (masa no suspendida rueda delantera, rotativos y no rotativos, [kg])	14
mwf (masa rotativa equivalente de la rueda delantera [kg], $I_{ax}=mwr \cdot Rr^2$)	3,76176681
sigmaF (longitud de relajación del neumático del neumático posterior [m])	0,03198
rt4 (radio reducido de la rueda (radio rueda - radio toroide [m])	0,058
rho4 (radio del toroide del neumático anterior [m])	0,2244
kpf (rigidez rueda delantera)	100000
rtm (radio medio del <i>thorus</i> de la rueda anterior [m])	0,077
Suspension posterior	
RSZO (Precarga muelle trasero [N])	-529
cre (coef de amortiguamiento en extensión para la suspensión trasera [KG/s])	1043
crc (coef de amortiguamiento en compresión para la suspensión trasera [KG/s])	1043
kr (rigidez reducida trasera [Nm])	20597
Suspension anterior	
FSZO (Precarga muelle trasero [N])	-529
cfe (coef de amortiguamiento en extensión para la suspensión delantera [KG/s])	948
cfc (coef de amortiguamiento en compresión para la suspensión delantera [KG/s])	948
kf (rigidez reducida delantera [Nm])	17023
Fuerza aerodinamica	
HCA (posición vertical del punto de aplicación de la fuerza aerodinámica [m])	0,664
KD (coeficiente de resistencia aerodinámico de la moto [kg/m])	0,2

Otros parametros	
Cdelta (amortiguación de la dirección [Nms/rad])	10
minimumSpeed (velocidad mínima [m/s])	5

6.2.1.2. Track

Para la validación del modelo se cogió el Circuito de Albacete, ya que se disponía de la telemetría real de una moto (Metrakit) de las características similares de la moto a diseñar. De esta manera se podría comparar la primera simulación obtenida del modelo con información de una motocicleta real para poder corroborar la similitud entre ambos y darle veracidad a las simulaciones que realiza el software empleado.

Debido a la imposibilidad de obtener el plano acotado de dicho circuito, se vio la necesidad de dibujarlo en Catia sobre una imagen del Circuito de Albacete. Así se obtuvieron todas las longitudes de cada recta y los ángulos y radios de cada curva, necesarios para introducirlos en el software.

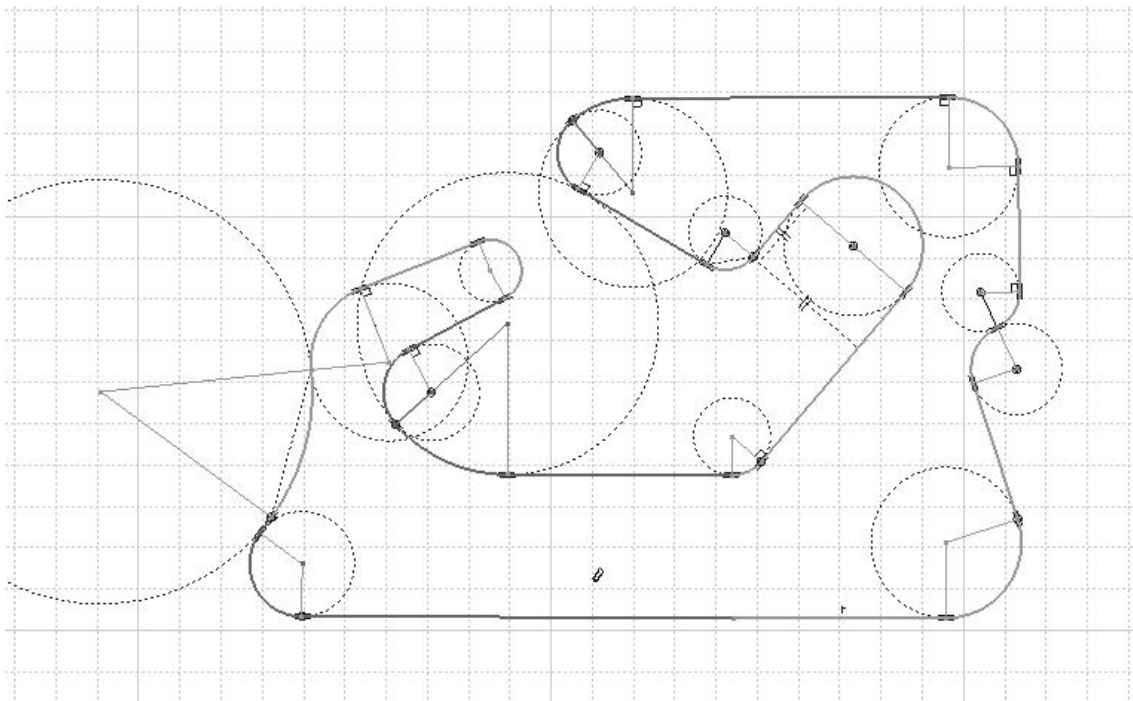


Figura 6.5

Los tramos introducidos en el software no correspondían desde la línea de salida hasta la línea de meta. Para la simulación de la vuelta rápida es necesario que la moto pase por la línea de salida con gran velocidad y no puede llegar a la línea de meta con velocidad nula, tal y como ocurre en la realidad. Es decir que el inicio y final no puede estar condicionado, por ello añadieron tramos tanto al inicio como al final de la vuelta al circuito. Esta era la única manera de obtener resultados comparables con una telemetría real.

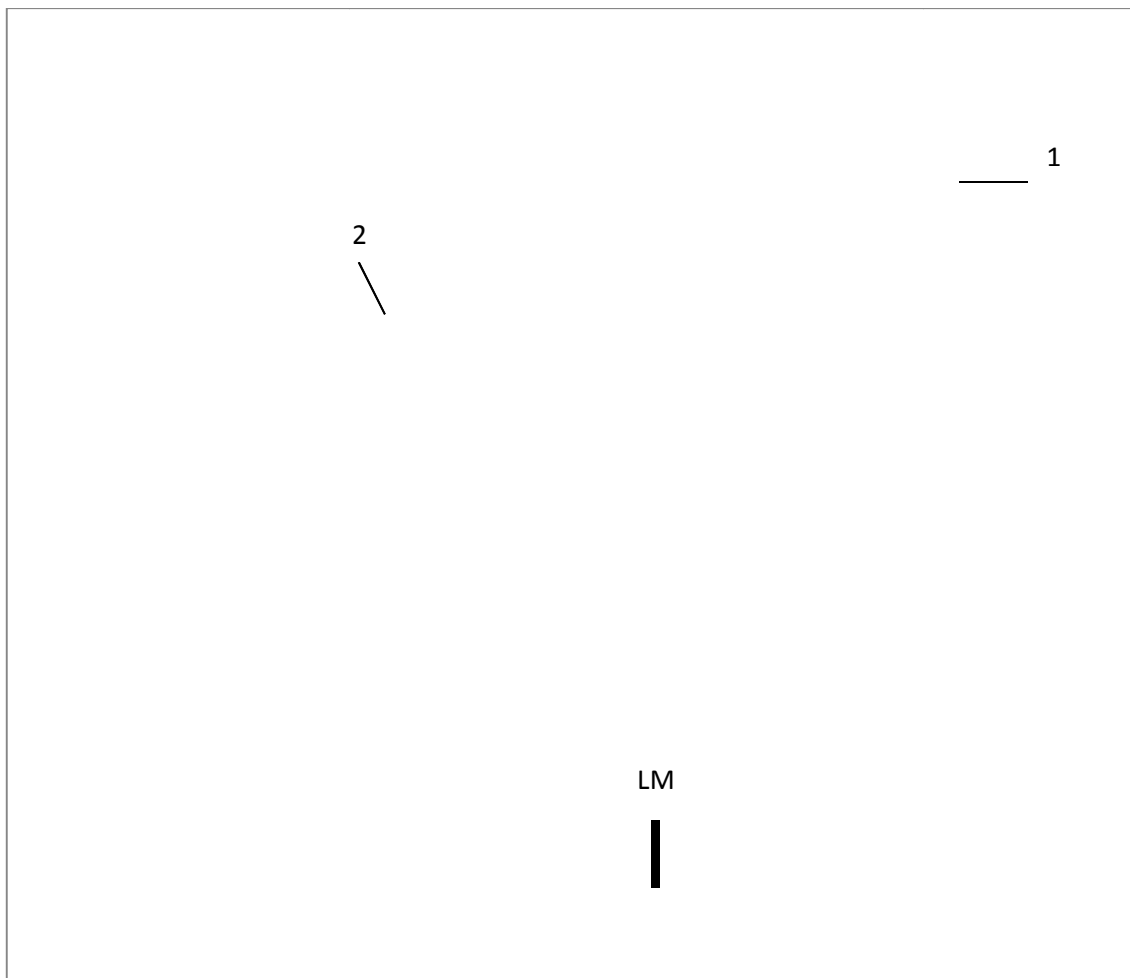


Figura 6.6

Tal y como se ve en la imagen antes y después de la línea de meta se tuvo que trazar un tramo más (1 y 2) para simular en el programa que el piloto estaba dando vueltas consecutivas al circuito. De esta manera se logra que el piloto pase por la línea de salida con gran velocidad, la correspondiente de la vuelta anterior. Al final del tramo 2 el vehículo llegará con velocidad nula pero esto no influirá en el tiempo de la vuelta rápida ya que está suficientemente lejos de la línea de meta.

Esto último había que tenerlo en cuenta a la hora de estudiar los resultados obtenidos. Había que filtrar los datos obtenidos por el software y seleccionar únicamente los que correspondían a la vuelta rápida del circuito.

La distancia entre nodos fijada en el circuito es de 2 metros, aunque al primer y último tramo se le disminuyó dicha distancia, (hasta 0,1 m en los 5 metros iniciales y finales) para favorecer la convergencia del simulador.

6.2.2. RESULTADOS

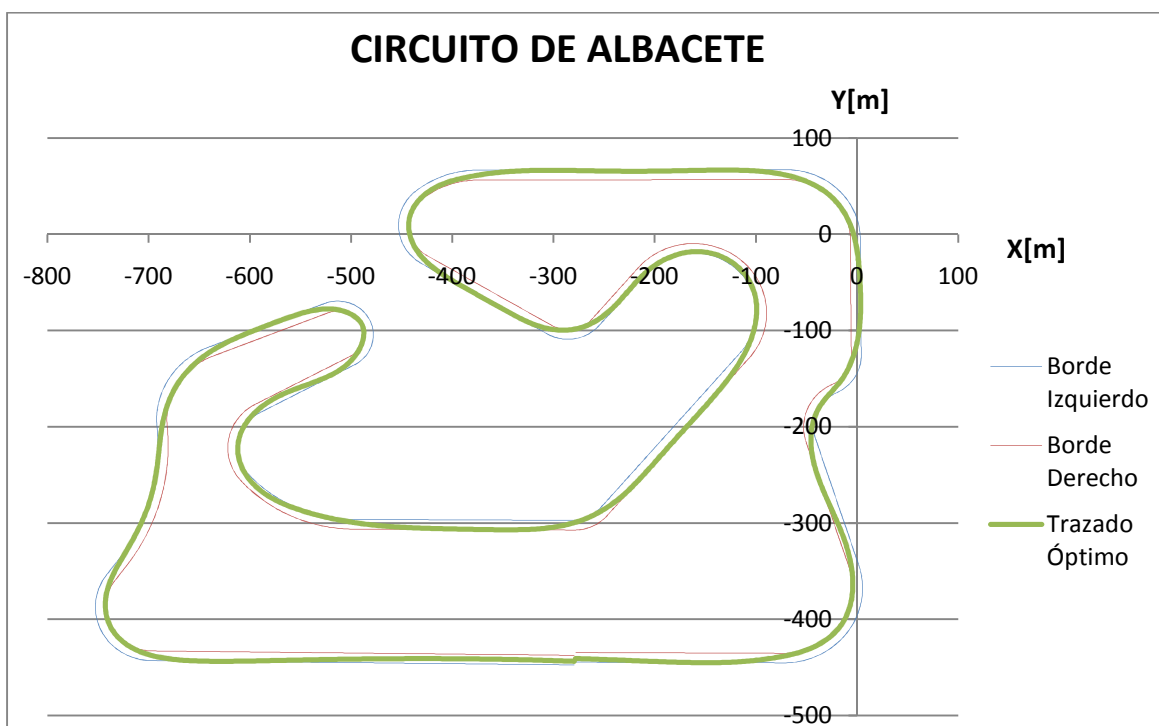


Figura 6.7

En esta figura se puede observar el trazado optimizado por el software para el modelo introducido en el circuito de Albacete. Realizando la vuelta rápida en un tiempo de 107,61 segundos.

El sistema de telemetría utilizado para la Metrakit en el circuito de Albacete solo disponía de tres sensores que medían: velocidad, rpm y temperatura del motor. De las cuales solo valía la información correspondiente a la velocidad de avance. Comparando ambas velocidades respecto a la distancia recorrida y respecto al tiempo transcurrido se obtuvieron las siguientes gráficas:

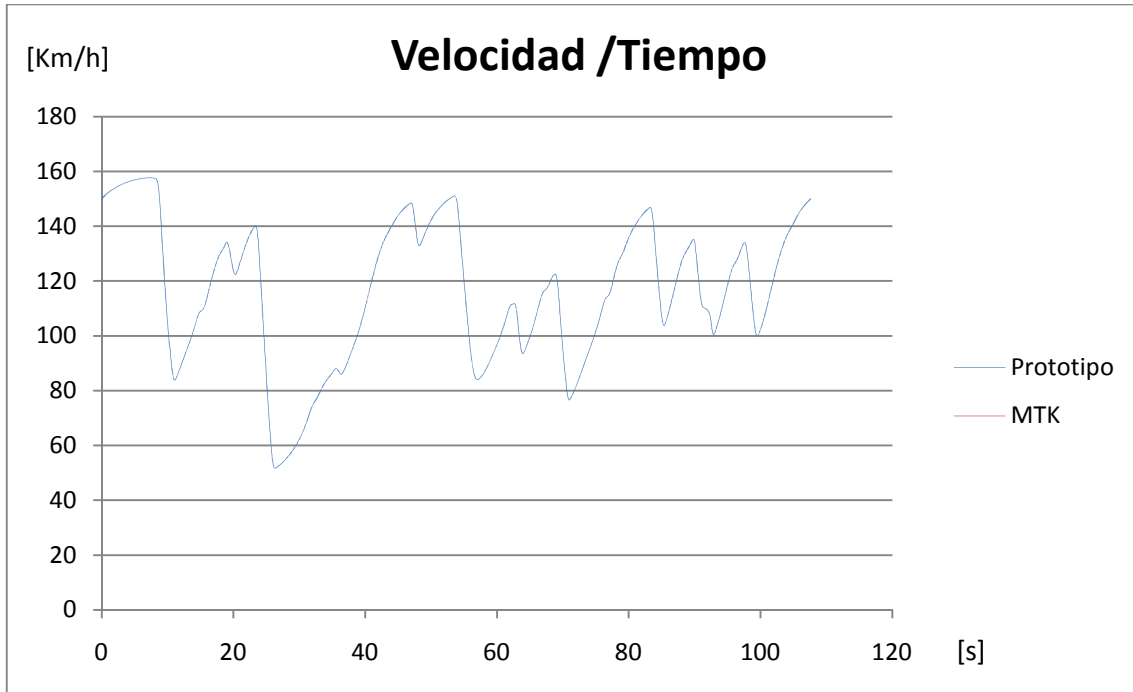


Figura 6.8

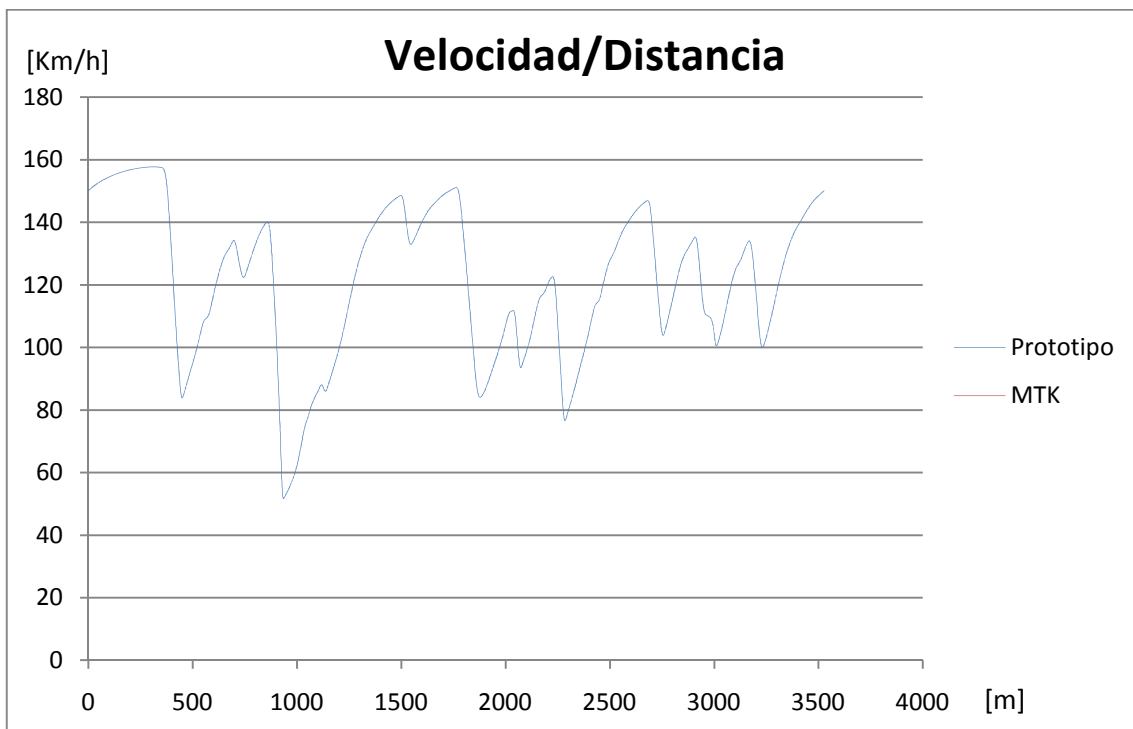


Figura 6.9

Se puede comprobar que la variación de las velocidades en la MTK y en el prototipo es muy similar a primera vista. Por lo que en un principio quedaría comprobado que el Método de Maniobra Óptima es capaz de producir maniobras reales de competición. Aunque antes de darlo por bueno se estudiará en profundidad información más detallada de la que se dispone.

CIRCUITO ALBACETE	Telemetría (MTK)	Prototipo
Vuelta Rápida [s]	106,91	107,61
Velocidad Máx [km/h]	167,6	157,7
Velocidad Mín [km/h]	61,2	51,8
Velocidad media [km/h]	117,15	116,69
Distancia recorrida por la moto [m]	3479	3488
Distancia del circuito [m]	3539	3536

6.2.3. COMENTARIOS

Se puede observar que existen algunas diferencias entre los datos obtenidos mediante telemetría y los obtenidos mediante la simulación. Estas diferencias pueden ser debidas a varias razones:

1. El software desprecia la pendiente que pueda tener el circuito y considera el circuito plano. Por ello puede darse el caso de que los máximos y mínimos de velocidad ocurran en tramos con pendiente descendente que favorecen a la velocidad de la motocicleta. Este efecto no lo considera el software por lo que puede producir pequeñas desviaciones. Debido a esto también es normal que la distancia total del circuito en la simulación no sea exacta a la real y sea algo menor. En el software la línea media del circuito se mantiene en mismo plano XY, por lo que la distancia recorrida será menor que considerando la pendiente.
2. Hay que tener en cuenta las imprecisiones realizadas a la hora de coger los datos del circuito. Estas imprecisiones han podido producirse a la hora de dibujar el circuito en

Catia o al pasar las cotas de Catia al archivo track (archivo de input para el software). Habría que utilizar infinitos decimales para minimizar este error, cosa que es imposible. Este factor también explicaría la desviación entre el circuito real y el virtual.

3. Habría que considerar también que los parámetros del prototipo fijados para validar el modelo no son los óptimos. Se ha tratado de elegir los parámetros que más se asemejan a los ideales para el óptimo funcionamiento de la motocicleta. Pero debido a la falta de información de algunos elementos, se vio la necesidad de escoger los datos dados por los colaboradores.
4. Por último, el software optimiza el trazado a realizar por la moto en el circuito para obtener la vuelta rápida. Es prácticamente imposible que el piloto, que conducía la moto (Metrakit) medida por telemetría, realizará dicha trazada óptima. Esto puede conllevar a que la distancia recorrida por la moto no coincidan en la simulación y en la realidad.

Aunque hay que dejar claro que la diferencia entre los datos simulados y los reales es mínima. La referencia más importante es la vuelta rápida, que no varía mucho una de la otra, el tiempo del prototipo es tan solo de poco más de medio segundo mayor. El circuito virtual varía del real en tan solo 13 metros (0,33%), por lo que se considera insignificante en los resultados de la simulación.

Si a esto se le añade que el software fue validado en su día por los propios creadores con medios más avanzados e información más acertada tal y como se ha explicado anteriormente, no caben dudas para cuestionar la fiabilidad del software. Por lo tanto se da la validación por buena y se podría iniciar el análisis paramétrico.

6.3. ANÁLISIS PARAMÉTRICO

El análisis paramétrico se lleva a cabo para investigar como varía el comportamiento de la motocicleta con una serie de parámetros de diseño. La motocicleta simulada anteriormente es el modelo de referencia. De todos los inputs introducidos en el modelo de referencia gran parte de ellos son variables, es decir que no tienen un valor fijo. Estas variables corresponden a los valores geométricos, las inercias, los relacionados con las suspensiones trasera y delantera y los aerodinámicos.

Las variables de las suspensiones trasera y delantera y los aerodinámicos son secundarias, es decir que fijarán posteriormente una vez que estén fijados los parámetros geométricos. Además cabe destacar que en este trabajo no se entrará a estudiar el diseño de las suspensiones ni de la aerodinámica ya que estos estudios corresponden a otra parte del diseño de la motocicleta.

En lo que a los momentos de inercia se refiere, como se ha explicado previamente es evidente la importancia de estos valores ya que estos determinaran la facilidad con la que se podrá aplicar una aceleración angular a la moto alrededor de cada eje. La distribución de masas es importante porque es la que gobierna los momentos de inercia. El problema es que no es fácil definir geoméricamente el eje alrededor del cual la moto cabecea, inclina o guiña. Es prácticamente imposible definir unos determinados momentos de inercia y construir una motocicleta para esos momentos. Lo que se debe hacer en el diseño de la motocicleta, es que los valores de los momentos tengan unos valores razonables de acuerdo a la base teórica de los movimientos angulares explicados anteriormente. Por lo tanto nos centraremos tan solo en parámetros geométricos y el análisis paramétrico se realizará de las siguientes variables:

- B: Posición del CDG en el eje longitudinal (siendo el origen el punto de contacto de la rueda trasera)
- H: Posición del CDG en el eje vertical
- P: Batalla, será la distancia entre ejes
- An: Avance normal
- ϵ : Ángulo de lanzamiento respecto al eje vertical

Se trata básicamente de realizar una serie de simulaciones modificando los valores de dichos parámetros hasta conseguir una configuración óptima para el circuito de Alcañiz. Este layout óptimo se dará en la simulación que de la vuelta más rápida en el circuito. Para realizar este trabajo de manera efectiva y eficiente se llevará a cabo un diseño de experimentos, de esta manera se pretende realizar el menor número de simulaciones posible para alcanzar la configuración óptima. Así también se tendrá un criterio a seguir a la hora de dar valores a los diferentes parámetros en cada simulación. Con esta herramienta estadística se pretende

ahorrar tiempo y trabajo innecesario, a la vez que proporcionar veracidad y credibilidad a los resultados que se obtengan.

6.3.1. DISEÑO DE EXPERIMENTOS

6.3.1.1. Introducción

Un diseño de experimentos permite inferir de un experimento dado la más amplia y precisa información posible a la población. Cuando realizamos un experimento agronómico o industrial queremos estudiar la evolución o efecto que sobre una variable de interés llamada variable respuesta, tiene un conjunto de otras variables llamadas variables experimentales o factores. Por ejemplo la variable respuesta puede ser el rendimiento de un cultivo, el cual queremos observar como varía en función de la fecha de siembra, el fertilizante utilizado o la fecha de recolección, llamados factores del experimento. En un experimento industrial la variable respuesta puede ser la resistencia de un material y los factores, la temperatura y la presión. En todos ellos suponemos que la variable respuesta es continua y que los factores se fijan durante el experimento a varios niveles determinados. A dichos niveles se les denomina tratamientos. Por consiguiente, el factor es o bien una variable categórica o bien una variable susceptible a ser categorizada en niveles. El experimento consiste en seleccionar ciertas unidades experimentales, fijar los valores de los factores a distintos niveles y observar el valor de la variable respuesta en cada unidad experimental. El número total de datos es el tamaño del experimento.

El objetivo de un experimento es comparar la respuesta observada de los tratamientos en las unidades experimentales. Por ello, cuanto más parecidas sean dichas unidades, mejor se podrán observar los resultados. A veces suelen agruparse en grupos homogéneos llamados bloques. Para realizar correctamente un experimento necesitamos especificar el número de unidades experimentales necesarias, los tratamientos que se van a aplicar, la forma en la que han de aplicárseles dichos tratamientos, etc. En el mejor de los casos el experimento proporciona una variabilidad que es necesario cuantificar.

Elementos de un experimento

En todo experimento debemos contemplar los elementos siguientes:

- **Factores:**
Son aquellos parámetros o características del diseño susceptibles de ser probados en distintos valores o variantes para estudiar su influencia en el resultado final. Pueden ser cuantitativos o cualitativos. En este caso serán cuantitativos y corresponden a los parámetros geométricos antes mencionados.
- **Niveles:**
Son los diversos valores o variantes seleccionados para el estudio de los factores. En este caso se elegirán dos niveles.
- **Tratamiento:**
Recibe la denominación de tratamiento toda combinación de variantes o niveles de factores seleccionados por una determinada prueba.
- **Réplica:**
Cada una de las pruebas realizadas con un tratamiento, en este caso siempre será 1 por tratamiento. Esto será así ya que al referirse a simulaciones mediante un software, un tratamiento (una simulación con una serie de valores) por muchas veces que se repita siempre dará el mismo resultado. Por lo tanto no tendría sentido que las réplicas fuesen mayores de uno.
- **Respuesta (o Variable)**
Es la característica que permite expresar el resultado de un tratamiento. En este caso será el tiempo de la vuelta rápida en el circuito. Por lo tanto cuanto menor sea la variable respuesta el tratamiento elegido será mejor.

El método del Diseño de Experimentos tiene como fin seleccionar entre todos los tratamientos posibles el menor número posible que nos permita obtener la información suficiente para poder obtener las conclusiones pertinentes.

Análisis de resultados

La estadística aporta una serie de herramientas para el análisis de los resultados de los experimentos (comparación de medias y dispersiones, análisis de varianza, etc.) Estas herramientas implican, en sí mismas, cálculos muy laboriosos que hoy en día están enormemente facilitados por la aplicación de programas informáticos.

La utilización de estas técnicas permite dictaminar si las diferencias encontradas entre los distintos niveles de cada factor son debidos a la variación del factor o, por el contrario, el azar es la causa de la diferencia observada.

Una vez analizados todos los factores γ , conocida su influencia (o no influencia), se procede a sacar las conclusiones pertinentes en base a:

- Tomar los niveles más favorables de los factores influyentes (los de mejor resultado en la respuesta).
- Elegir los niveles más interesantes de los factores no influyentes (por economía, sencillez de utilización, rendimiento energético, etc.)

6.3.1.2. Nociones generales

Fundamentos estadísticos

Descomposición de la variabilidad

Como es conocido, en la optimización de los parámetros existe una variabilidad. Si además se introducen modificaciones (por variación de los niveles de factores controlados), hay que esperar que la variabilidad aumente.

El principio de descomposición de la variabilidad, basado en la constatación experimental, establece que:

Variabilidad provocada por las causas comunes	(VCC, variabilidad residual)
+	
<u>Variabilidad provocada por las modificaciones introducidas</u>	(VCE, efecto factor)
Variabilidad total	(VT, variabilidad total)

Donde:

- Variabilidad Total = Suma de Cuadrados Total (SCT)

$$SCT = (N-1) \cdot s^2$$
- Variabilidad de factores = Suma de cuadrados de factores (SCF)

$$SCF = SCT - SCR$$

$$SCF = \sum n_j \cdot (\bar{x} - \bar{x}_j)^2$$
- Variabilidad residual = Suma de Cuadrados Residual (SCR)

$$SCR = \sum (n_j - 1) \cdot s_j^2$$

$$VT = VCC + VCE$$

$$SCT = SCC + SCE$$

$$GDL \text{ (grados de libertad)} = gdl \text{ CC} + gdl \text{ CE}$$

Distribución de Fisher

Se utiliza para saber si dentro de una población hay muestras de poblaciones diferentes. Si de una población normal se extraen independiente dos muestras de tamaño N1 y N2, siendo s_1^2 y s_2^2 las varianzas muestrales.

$$s_1^2 / s_2^2 \Rightarrow F \text{ calculada}$$

Mientras los grados de libertad para cada muestra serán respectivamente N_1-1 y N_2-2

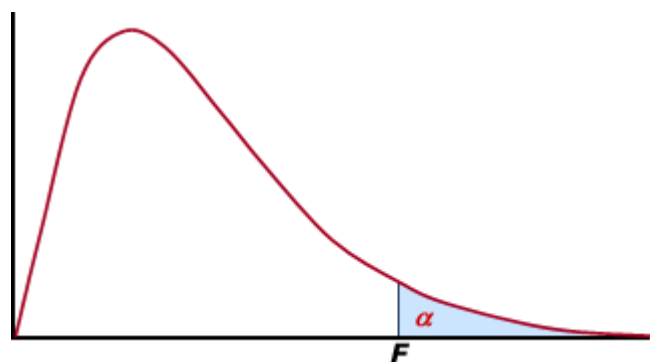
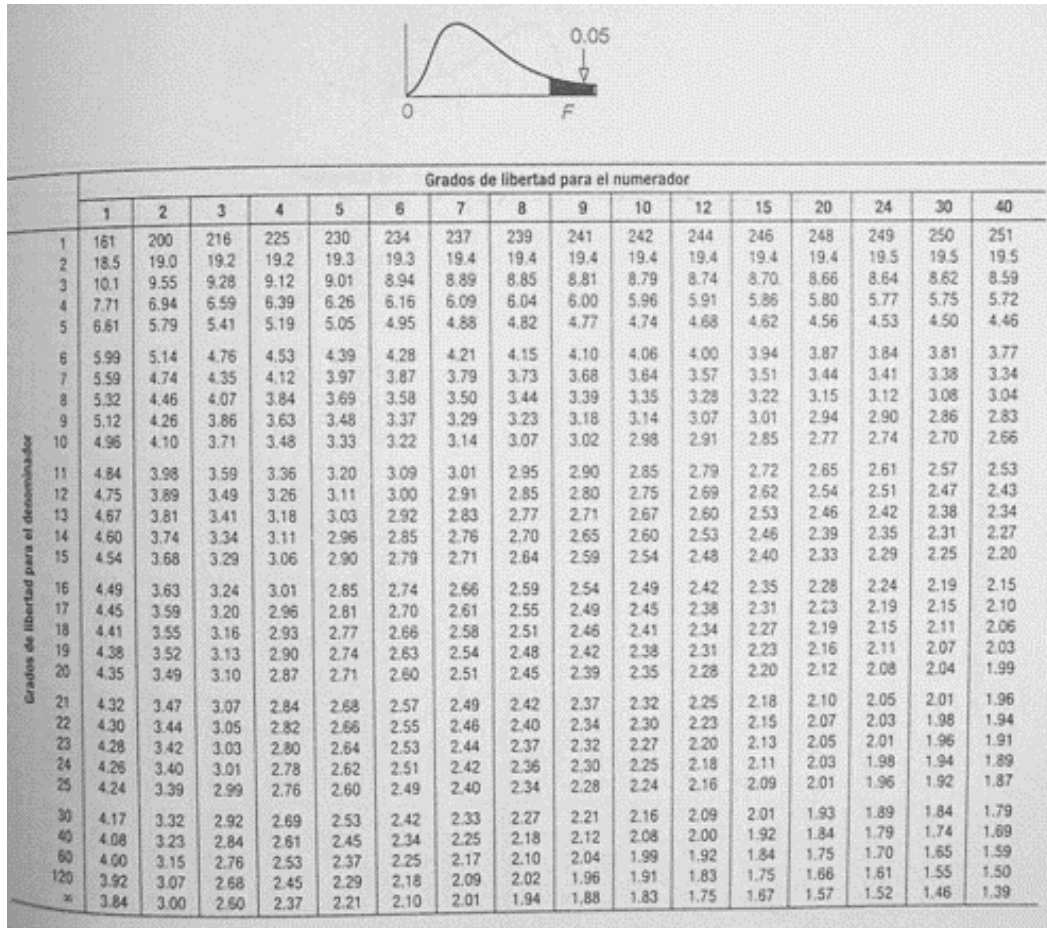


Figura 6.10

La función F de Fisher no toma nunca valores negativos. F es una variable aleatoria que depende del número de grados de libertad de las muestras y cuyo valor medio es próximo a 1.

La tabla adjunta muestra los valores que cualquier F para todo el rango de valores de los grados de libertad de las muestras a comparar. La tabla es válida para una probabilidad de error del 5% (comúnmente utilizada).



Se trata de comparar F calculado con F tabulado, pudiendo haber dos casos:

1. $F_{calculada} > F_{tabulada}$
 En este caso, las muestras revelan diferencias entre las poblaciones a las que representan.
2. $F_{calculada} \leq F_{tabulada}$
 En este caso, las muestras no revelan diferencias entre las poblaciones a las que representan. (En ambos casos la probabilidad de equivocarse es del 5%, dada la tabla utilizada).

6.3.1.3. Análisis de varianza de tres factores a dos niveles (2³)

Aunque en realidad queremos trabajar con los cinco parámetros geométricos, es decir con cinco factores, en vez de realizar un análisis con cinco factores lo haremos con tres. En concreto a dos niveles. Así se consigue hacer el análisis de una manera sencilla con tan solo ocho tratamientos. De la otra manera con los cinco factores habría que hacer muchos tratamientos y con lo cual muchas simulaciones que consumiría mucho tiempo del proceso de diseño.

Los niveles utilizados son valores límite que pueden alcanzar cada parámetro. Para limitar estos rangos se ha partido de los valores del modelo de referencia y se ha aumentado y disminuido una cantidad determinada. Para limitar dicho valores se ha observado varias motocicletas de competición y basándose en la teoría antes descrita se han escogido valores reales para dichos parámetros. Es decir son valores razonables que la motocicleta podría tener. Un valor fuera de dicho límite no sería válido, directamente se descarta esa posibilidad porque se sabe de antemano que empeorará el resultado final o bien no es físicamente posible cumplirlo. Por lo tanto los niveles escogidos para cada parámetro son los siguientes:

PARÁMETRO	NIVEL (-)	NIVEL (+)
b	500mm	700mm
h	450mm	650mm
p	1200m	1300mm
ε	21º (0,3665rad)	25º (0,4363rad)
a_n	80mm	100mm

Entonces lo que se ha hecho ha sido, de los cinco factores existentes se han ido cogiendo grupos de tres factores para realizar en cada grupo el análisis de varianza. A continuación se explicará cómo se ha desarrollado el análisis de tres factores a dos niveles.

ENSAYO 1

- Factores controlados: b (CDGx), h (CDGy) y p (batalla)
- Niveles por factor: + y – (valores máximos y mínimos que pueden tener los factores)

Todos los tratamientos merecen ser probados, por lo que se diseña un plan, como muestra el cuadro siguiente:

Nº	b	h	p	Vuelta rápida	Media
1	500 (-)	450 (-)	1200 (-)	144,159741	
2	700 (+)	450 (-)	1200 (-)	143,12598	
3	500 (-)	650 (+)	1200 (-)	140,658645	
4	700 (+)	650 (+)	1200 (-)	140,585577	
5	500 (-)	450 (-)	1300 (+)	144,421934	
6	700 (+)	450 (-)	1300 (+)	143,350602	
7	500 (-)	650 (+)	1300 (+)	140,741358	
8	700 (+)	650 (+)	1300 (+)	140,444469	
Suma =				1137,488	142,186

La propiedad fundamental del diseño de una experimentación debe ser su *ortogonalidad*. Esta propiedad significa que:

- Cada nivel de un factor probado tiene el mismo número de tratamientos
- Todos los niveles de cada factor tienen una composición homogénea de los niveles de otros factores.

La consecuencia es que, a la hora de comparar las variables (resultados) obtenidas en los distintos niveles, las diferencias encontradas son debidas a la diferencia de nivel puesto que el posible efecto de los otros factores queda siempre equilibrado.

EFFECTOS SIMPLES

Los efectos de cada factor en la variable se calculan por diferencia entre las medias de la variable de cada nivel.

- Estimación del efecto simple del factor p

$$Ep = \frac{5+6+7+8}{4} - \frac{1+2+3+4}{4} = \bar{x}_{3+} - \bar{x}_{3-} = 0,107$$

En \bar{x}_{3+} los factores b y h han influido “en promedio” igual que en \bar{x}_{3-} . La diferencia $\bar{x}_{3+} - \bar{x}_{3-}$ refleja por tanto solo el efecto de p, promediado para las distintas combinaciones posibles de b y h.

- Estimación del factor simple de b

$$Eb = \frac{2+4+6+8}{4} - \frac{1+3+5+7}{4} = \bar{x}_{1+} - \bar{x}_{1-} = -0,619$$

También en este caso en la media \bar{x}_{1+} los factores (h y p) han influido 2 veces a nivel + y dos veces a nivel -, y lo mismo ha pasado en la media \bar{x}_{1-} .

- Estimación del efecto simple del factor h

$$Eb = \frac{3+4+7+8}{4} - \frac{1+2+5+6}{4} = \bar{x}_{2+} - \bar{x}_{2-} = -3,157$$

También en este caso el efecto de h es ortogonal al de los otros factores b y p.

En resumen cada efecto por separado es “ortogonal” a los otros factores restantes. Por lo tanto el análisis del conjunto de los resultados obtenidos permite concluir cuál es el mejor tratamiento. Se realizan ocho tratamientos por cada ensayo (grupo de tres parámetros), que permiten obtener 4 resultados por cada nivel de cada factor.

Se cumplen los requisitos de ortogonalidad, es decir:

- Cada nivel tiene el mismo número de resultados
- Todos los niveles tienen una composición homogénea de los niveles de los otros factores.

El número de tratamientos es de N=8 por lo tanto los GDL totales es de N-1=7. Como se ha explicado antes:

$$\text{GDL totales}(7) - \text{GDL factores}(3) = \text{GDL residual}(4)$$

A partir de la tabla de distribución de Fisher para dichos grados de libertad, se obtiene un valor de F tabulado de **7,71**. Este valor será el valor de referencia, si la F calculada es mayor que 7,71 se puede afirmar, con el 5% de riesgo de equivocarse, que el factor correspondiente a la F calculada tiene influencia sobre la variable respuesta y habrá que tenerla en cuenta. En la siguiente tabla se calcula la F debido al efecto simple de cada parámetro analizado.

	b	h	p	TOTAL	RESIDUAL	TABULADO
EFFECTOS SIMPLES	-0,619	-3,157	0,107			F - table (5%)
Suma de Cuadrados	0,766	19,934	0,023	21,1	0,07	7,71
Grados de libertad	1	1	1	7	4	
Cuadrados medios	0,766	19,934	0,023		0,0182	t - table (5%)
F - calculada	41,972	1092,622	1,258			2,776

A partir del efecto simple de cada factor se halla la suma de cuadrados:

$$SC_b = [8 \cdot (-0,619)^2] / 4 = 0,766$$

$$SC_h = [8 \cdot (-3,157)^2] / 4 = 19,934$$

$$SC_p = [8 \cdot (0,107)^2] / 4 = 0,023$$

Mientras que la suma de cuadrados total será:

$$SCT = (144,16^2 + 143,13^2 + 140,66^2 + 140,59^2 + 144,42^2 + 143,35^2 + 140,74^2 + 140,44^2) - 1137,49^2 / 8 = 21,1$$

Para hallar los cuadrados medios se le dividirá a cada suma de cuadrados su grado de libertad. Por lo que para cada factor el cuadrado medio será igual a la suma de cuadrados, mientras que el cuadrado medio residual será:

$$0,073 / 4 = 0,0182$$

Ahora se podrá calcular la F-calculada para poder compararla con la tabulada. De esta manera se tiene que:

$$F_b = 0,766/0,0182 = \mathbf{41,972}$$

$$F_h = 19,934/0,0182 = \mathbf{1092,622}$$

$$F_p = 0,023/0,0182 = 1,258$$

Claramente se puede observar que la F de Fisher de las variables b y h tiene una gran influencia respecto a la variable respuesta, mientras que la influencia de la variable p es prácticamente despreciable frente a la posición del centro de gravedad. Cabe destacar que la que más influencia tiene y con gran diferencia es la variable h. Por lo visto la altura del centro de gravedad es muy determinante en el comportamiento de la motocicleta según el simulador. Pero antes de descartar cualquier variable y tomar ninguna decisión se analizará si existen interacciones dobles o triples entre los factores.

INTERACCIONES ENTRE FACTORES

Se conoce como interacción entre factores la influencia que sufre el efecto de uno de ellos en la respuesta, en función del nivel del otro (u otros). En este trabajo se van a estudiar interacciones de dos factores (dobles) y de tres factores (triples). Las interacciones son, a todos los efectos, como factores controlados derivados de los contemplados en el plan de experimentos. Los efectos de las interacciones se calculan de modo similar a los de los factores controlados.

Interacciones dobles

- La interacción entre factores h y p será la siguiente.

$$\text{Efecto de h cuando p está a nivel +: } Ef_{2/3+} = \frac{7+8}{2} - \frac{5+6}{2}$$

$$\text{Efecto de h cuando p está a nivel -: } Ef_{2/3-} = \frac{3+4}{2} - \frac{1+2}{2}$$

Se define el efecto de la interacción hxp como la mitad de la diferencia entre $Ef_{2/3+}$ y $Ef_{2/3-}$.

$$Ef_{2x3} = \frac{1}{2}(Ef_{2/3+} - Ef_{2/3-}) = \frac{1+2+7+8}{4} - \frac{3+4+5+6}{4} = -0,136$$

El resultado habría sido el mismo si hubiéramos calculado el efecto a partir de los “niveles” + y – de la interacción, obtenidos por producto de los niveles de los factores.

Trat	Factores			Interacciones			
	b	h	p	b x h	b x p	h x p	b x h x p
1	-	-	-	+	+	+	-
2	+	-	-	-	-	+	+
3	-	+	-	-	+	-	+
4	+	+	-	+	-	-	-
5	-	-	+	+	-	-	+
6	+	-	+	-	+	-	-
7	-	+	+	-	-	+	-
8	+	+	+	+	+	+	+

Basándose en esta tabla se hallarán igual que para el caso descrito el resto de las interacciones dobles. Así se obtendrá:

	b x h	b x p	h x p
Interacciones dobles	0,434	-0,065	-0,136
Suma de Cuadrados	0,376	0,009	0,037
Grados de libertad	1	1	1
Cuadrados medios	0,376	0,009	0,037
F - calculada	20,628	0,468	2,037

Siguiendo el mismo procedimiento que para los efectos simples se hallan las F de Fisher para interacción. Se ve como existe una fuerte interacción entre b y h ya que la F calculada es mayor que 7,71. Esto significa que si se tiene en cuenta la variable h, no se puede despreciar la b ya que existe una fuerte relación entre ambas. Además esta relación es no cruzada, es decir que la variable respuesta mejora (disminuye de valor) si aumentan las variables b y h. Se puede decir que ambas variables van juntas, si ambas disminuyen aumentaría la variable respuesta (empeora el comportamiento de la motocicleta).

Interacción triple

Desde el punto de vista práctico, es frecuente encontrar interacciones de entidad en efectos dobles pero es muy raro encontrarlas en efectos de orden superior (triple, etc.). Por si acaso se analizará la interacción triple.

En la siguiente tabla se aprecia que no existe interacción triple ya que la F-calculada es muy pequeña.

$$E_{f_{1 \times 2 \times 3}} = \frac{2+3+5+8}{4} - \frac{1+4+6+7}{4} = 0,238$$

	b x h x p
Int. Triple	-0,047
Suma de cuadrados	0,004
Grados de libertad	1
Cuadrados medios	0,004
F - calculada	0,238

CONCLUSIONES

En la siguiente tabla aparecen representados todos los resultados. Están los ocho tratamientos con sus respectivos valores medios, máximos y mínimos. Para ellos se tiene de una desviación típica de $\sigma=(0,0182)^{-1/2}=0,1351$

Resultados	Media	Desviación típica	Máximo (+2,78 σ)	Mínimo (-2,78 σ)
(-);(-);(-)	144,223	0,1351	144,598	143,848
(+);(-);(-)	143,170	0,1351	143,545	142,795
(-);(+);(-)	140,632	0,1351	141,007	140,257
(+);(+);(-)	140,447	0,1351	140,822	140,072
(-);(-);(+)	144,223	0,1351	144,598	143,848
(+);(-);(+)	143,170	0,1351	143,545	142,795
(-);(+);(+)	140,632	0,1351	141,007	140,257
(+);(+);(+)	140,447	0,1351	140,822	140,072

El mejor resultado (mínima variable respuesta) se obtiene para los valores (+) de b y h, mientras que la media calculada no varía para los distintos valores de p. Con esto se puede concluir que la influencia que pueda tener p en la respuesta final en comparación con b y h es prácticamente despreciable para este ensayo.

En este ensayo se han elegido tres de los cinco parámetros que existen, por lo que es demasiado pronto para sacar conclusiones definitivas en cuanto a los parámetros respecta. La metodología que se seguirá será la de ir eligiendo grupos de tres parámetros para realizar ensayos como el que se acaba de realizar para analizar la influencia de cada uno de ellos de la que puedan tener entre ellos.

ENSAYO 2

- Factores controlados: ϵ (ángulo de lanzamiento), a_n (avance) y p (batalla)
- Niveles por factor: + y – (valores máximos y mínimos que pueden tener los factores)

Nº	ϵ	a_n	p	Vuelta rápida	Media
1	0,3665 (-)	80 (-)	1200 (-)	142,128887	
2	0,4363 (+)	80 (-)	1200 (-)	142,100616	
3	0,3665 (-)	100 (+)	1200 (-)	142,13614	
4	0,4363 (+)	100 (+)	1200 (-)	142,108271	
5	0,3665 (-)	80 (-)	1300 (+)	142,312636	
6	0,4363 (+)	80 (-)	1300 (+)	142,284626	
7	0,3665 (-)	100 (+)	1300 (+)	142,318686	
8	0,4363 (+)	100 (+)	1300 (+)	142,290828	
Suma =				1137,681	142,210

Los valores del resto de los parámetros (la posición del centro de gravedad) permanecerán constantes en las ocho simulaciones. Para que todos los ensayos estén en igualdad de condiciones a b y h se les dará el valor inicial fijado al principio.

	ϵ	a_n	p	TOTAL	RESIDUAL	TABULADO
EFFECTOS SIMPLES	-0,028	0,007	0,183			F - table (5%)
Suma de Cuadrados	0,002	0,000	0,067	0,1	0,00	7,71
Grados de libertad	1	1	1	7	4	
Cuadrados medios	0,002	0,000	0,067		0,0000	t - table (5%)
F - calculada	6692,8654	393,5260	286522,2908			2,776

Los valores de Fisher calculados de los efectos simples son mayores que el valor tabulado, por lo tanto viene a decir que en este ensayo cada uno de los parámetros tiene una influencia a considerar. Siendo la batalla (p) la variable más influyente con bastante diferencia y el avance (an) la menos influyente.

	$\epsilon \times an$	$\epsilon \times p$	$an \times p$
Interacciones dobles	0,000	0,000	-0,001
Suma de Cuadrados	0,000	0,000	0,000
Grados de libertad	1	1	1
Cuadrados medios	0,000	0,000	0,000
F - calculada	0,164	0,039	3,763

Queda evidente que no existe ninguna relación entre los parámetros de estudio que pueda influir en la variable respuesta.

	$\epsilon \times an \times p$
Int. Triple	0,000
Suma de Cuadrados	0,000
Grados de libertad	1
Cuadrados medios	0,000
F - calculada	0,033

Tampoco existe ninguna relación entre las tres variables del ensayo, por lo que habrá que contemplar la influencia de cada variable por separado. En la siguiente tabla se podrán observar los resultados finales:

Resultados	Media	Desviación típica	Máximo (+2,78 σ)	Mínimo (-2,78 σ)
(-);(-);(-)	142,129	0,0005	142,130	142,127
(+);(-);(-)	142,101	0,0005	142,102	142,099
(-);(+);(-)	142,136	0,0005	142,137	142,134
(+);(+);(-)	142,108	0,0005	142,109	142,106
(-);(-);(+)	142,312	0,0005	142,313	142,311
(+);(-);(+)	142,284	0,0005	142,285	142,283
(-);(+);(+)	142,319	0,0005	142,320	142,317
(+);(+);(+)	142,291	0,0005	142,292	142,289

Se puede observar en las dos mejores resultados (mínimo tiempo por vuelta) que aunque la variable a_n cambia de su valor máximo al mínimo el tiempo de la vuelta rápida apenas varía. Por lo tanto este parámetro tiene muy poca influencia frente a los otros dos. Mientras que el valor máximo para el ángulo de lanzamiento y el mínimo para la batalla es preferible según las simulaciones.

ENSAYO 3

- Factores controlados: b (CDGx), h (CDGy) y ϵ (ángulo de lanzamiento)
- Niveles por factor: + y – (valores máximos y mínimos que pueden tener los factores)

Nº	b	h	ϵ	Vuelta rápida	Media
1	500 (-)	450 (-)	0,3665 (-)	144,238692	
2	700 (+)	450 (-)	0,3665 (-)	142,196099	
3	500 (-)	650 (+)	0,3665 (-)	140,68521	
4	700 (+)	650 (+)	0,3665 (-)	140,537022	
5	500 (-)	450 (-)	0,4363 (+)	144,208835	
6	700 (+)	450 (-)	0,4363 (+)	143,156666	
7	500 (-)	650 (+)	0,4363 (+)	140,665843	
8	700 (+)	650 (+)	0,4363 (+)	140,523819	
Suma =				1136,212	142,027

	b	h	ϵ	TOTAL	RESIDUAL	TABULADO
EFFECTOS SIMPLES	-0,846	-2,847	0,225			F - table (5%)
Suma de Cuadrados	1,432	16,212	0,101	19,1	0,46	7,71
Grados de libertad	1	1	1	7	4	
Cuadrados medios	1,432	16,212	0,101		0,1155	t - table (5%)
F - calculada	12,399	140,343	0,873			2,776

Al igual que en el ensayo 1 las variables b y h tienen gran influencia sobre la variable respuesta, sobretodo h. Mientras que el ángulo de lanzamiento en comparación con los otros dos tiene una influencia despreciable. Según la F calculada la influencia de epsilon es todavía menor que la que tenía p en el primer ensayo, cosa que se corrobora también en el ensayo 2.

	b x h	b x ε	h x ε
Interacciones dobles	0,701	0,249	-0,241
Suma de Cuadrados	0,983	0,124	0,116
Grados de libertad	1	1	1
Cuadrados medios	0,983	0,124	0,116
F - calculada	8,511	1,075	1,004

Tal y como se ha visto en el primer ensayo existe una interacción a considerar entre b y h. Por lo tanto no se podrá pasar por alto los valores que tengan ambos en la optimización final.

	b x h x ε
Int. Triple	-0,246
Suma de Cuadrados	0,121
Grados de libertad	1
Cuadrados medios	0,121
F - calculada	1,048

No existe ninguna influencia fuerte entre las tres variables del ensayo.

Resultados	Media	Desviación típica	Máximo (+2,78σ)	Mínimo (-2,78σ)
(-);(-);(-)	144,348	0,3399	145,292	143,404
(+);(-);(-)	142,801	0,3399	143,745	141,857
(-);(+);(-)	140,800	0,3399	141,744	139,856
(+);(+);(-)	140,655	0,3399	141,599	139,711
(-);(-);(+)	144,348	0,3399	145,292	143,404
(+);(-);(+)	142,801	0,3399	143,745	141,857
(-);(+);(+)	140,800	0,3399	141,744	139,856
(+);(+);(+)	140,655	0,3399	141,599	139,711

Como era de prever los mejores resultados se dan para los valores máximos de la posición del centro de gravedad, mientras que el valor que tenga épsilon es despreciable para este ensayo. La idea de que el centro de gravedad sea lo más alto posible y lo más adelantado posible (para los límites elegidos) va cogiendo fuerza.

ENSAYO 4

- Factores controlados: b (CDGx), h (CDGy) y an (avance)
- Niveles por factor: + y – (valores máximos y mínimos que pueden tener los factores)

Nº	b	h	an	Vuelta rápida	Media
1	500 (-)	450 (-)	80 (-)	144,220294	
2	700 (+)	450 (-)	80 (-)	143,17556	
3	500 (-)	650 (+)	80 (-)	140,671885	
4	700 (+)	650 (+)	80 (-)	140,526873	
5	500 (-)	450 (-)	100 (+)	144,230037	
6	700 (+)	450 (-)	100 (+)	143,215867	
7	500 (-)	650 (+)	100 (+)	140,681565	
8	700 (+)	650 (+)	100 (+)	140,536898	
Suma =				1137,259	142,157

	b	h	an	TOTAL	RESIDUAL	TABULADO
EFFECTOS SIMPLES	-0,587	-3,106	0,017			F - table (5%)
Suma de Cuadrados	0,689	19,296	0,001	20,4	0,00	7,71
Grados de libertad	1	1	1	7	4	
Cuadrados medios	0,689	19,296	0,001		0,0002	t - table (5%)
F - calculada	2882,166	80661,753	2,542			2,776

Como se está viendo en los ensayos precedentes los parámetros de tienen gran influencia son solo b y h. En este caso se observa que la influencia que pueda tener el avance en el resultado final es prácticamente despreciable frente a b y h.

	b x h	b x an	h x an
Interacciones dobles	0,442	0,008	-0,008
Suma de Cuadrados	0,391	0,000	0,000
Grados de libertad	1	1	1
Cuadrados medios	0,391	0,000	0,000
F - calculada	1635,586	0,499	0,481

Con las interacciones dobles ocurre exactamente lo mismo. Solo existe una relación fuerte entre b y h.

	b x h x an
Int. Triple	-0,008
Suma de Cuadrados	0,000
Grados de libertad	1
Cuadrados medios	0,000
F - calculada	0,477

Evidentemente no hay ningún tipo de interacción triple entre las variables ensayadas.

Resultados	Media	Desviación típica	Máximo (+2,78 σ)	Mínimo (-2,78 σ)
(-);(-);(-)	144,216	0,0155	144,259	144,173
(+);(-);(-)	143,187	0,0155	143,230	143,144
(-);(+);(-)	140,668	0,0155	140,711	140,625
(+);(+);(-)	140,523	0,0155	140,566	140,480
(-);(-);(+)	144,216	0,0155	144,259	144,173
(+);(-);(+)	143,187	0,0155	143,230	143,144
(-);(+);(+)	140,668	0,0155	140,711	140,625
(+);(+);(+)	140,523	0,0155	140,566	140,480

Aquí también se concluye que los valores máximos del centro de gravedad son los que mejor resultado dan mientras que el valor que tenga el avance no tiene efecto sobre la variable respuesta para este ensayo.

Queda claro que las variables más influyentes y con mucha diferencia son las debidas al centro de gravedad, b y h. Además ya se sabe que existe una relación no cruzada entre ambas variables. Una relación no cruzada, en este caso viene a decir que aumentando el valor de h y b mejora la variable respuesta. Podría haber ocurrido que el mínimo tiempo por vuelta ocurriese para un valor máximo de una de las variables y mínimo de la otra, lo que sería una relación cruzada (que no es el caso).

Ahora que se sabe que el mejor resultado se obtiene con los valores máximos de b y h (b=700mm y h=650mm), se repetirá el ensayo 2 pero esta vez con b y h fijados en sus valores máximos.

ENSAYO 5

- Factores controlados: ϵ (ángulo de lanzamiento), a_n (avance) y p (batalla)
- Niveles por factor: + y – (valores máximos y mínimos que pueden tener los factores)
- Variables fijadas:
 - b (CDG eje X): 700mm
 - h (CDG eje Y): 650mm

Nº	p	ϵ	a_n	Tiempo	Media
1	1200 (-)	0,3665 (-)	80 (-)	140,58686	
2	1300 (+)	0,3665 (-)	80 (-)	140,449412	
3	1200 (-)	0,4363 (+)	80 (-)	140,575133	
4	1300 (+)	0,4363 (+)	80 (-)	140,433696	
5	1200 (-)	0,3665 (-)	100 (+)	140,598365	
6	1300 (+)	0,3665 (-)	100 (+)	140,455641	
7	1200 (-)	0,4363 (+)	100 (+)	140,586973	
8	1300 (+)	0,4363 (+)	100 (+)	140,44015	
Suma =				1124,126	140,516

La variable respuesta son segundos y aunque no exista gran diferencia entre los valores resultantes, hay que recordar que las décimas de segundo tienen mucha importancia en las carreras de velocidad. Por décimas de segundo se puede ganar una carrera por lo tanto habrá que tenerlas en cuenta a la hora de elegir los parámetros ideales.

	p	ϵ	a_n	TOTAL	RESIDUAL	TABULADO
EFFECTOS SIMPLES	-0,142	-0,014	0,009			F - table (5%)
Suma de Cuadrados	0,040	0,000	0,000	0,0	0,00	7,71
Grados de libertad	1	1	1	7	4	
Cuadrados medios	0,040	0,000	0,000		0,0000	t - table (5%)
F - calculada	7203,545	65,797	28,938			2,776

Tal y como y como ocurría en el ensayo 2 las tres variables tiene un efecto a tener en cuenta sobre la variable respuesta. Se ve como la variable más influyente es la batalla (p), seguido de el ángulo de lanzamiento (ε) y con menor influencia estaría en avance (an).

	p x ε	p x an	ε x an
Interacciones dobles	-0,002	-0,003	0,000
Suma de Cuadrados	0,000	0,000	0,000
Grados de libertad	1	1	1
Cuadrados medios	0,000	0,000	0,000
F - calculada	1,458	2,534	0,007

En las interacciones dobles la F calculada no supera la F tabulada, ni siquiera se acerca a siete, por lo que no existe ningún tipo de relación entre las variables a estudiar.

Columna1	p x ε x an
Int. Triple	0,000
Suma de Cuadrados	0,000
Grados de libertad	1
Cuadrados medios	0,000
F - calculada	0,000

Tampoco existe ningún tipo de relación triple entre las variables, la F calculada es nula.

Resultados	Media	Desviación típica	Máximo (+2,78 σ)	Mínimo (-2,78 σ)
(-);(-);(-)	140,588	0,0024	140,594	140,581
(+);(-);(-)	140,446	0,0024	140,452	140,439
(-);(+);(-)	140,574	0,0024	140,581	140,568
(+);(+);(-)	140,432	0,0024	140,439	140,426
(-);(-);(+)	140,597	0,0024	140,603	140,590
(+);(-);(+)	140,455	0,0024	140,461	140,448
(-);(+);(+)	140,583	0,0024	140,590	140,577
(+);(+);(+)	140,441	0,0024	140,448	140,435

El mejor resultado se obtiene para los valores máximos de p y ϵ y para el mínimo del an. Aunque ahora estudiaremos como varía el valor de la variable resultado según el valor que coja cualquiera de estas tres variables más en detalle.

6.3.2. DETERMINACIÓN FINAL DE LAS VARIABLES GEOMÉTRICAS

Centro de gravedad

Según el simulador utilizado ha salido un centro de gravedad óptimo (con el piloto incluido) que rompe con uno de los mitos que prevalecían entorno al centro de gravedad. Siempre se ha creído que lo más beneficioso era un centro de gravedad lo más abajo y centrado posible pero no siempre es así. Para nuestro modelo de motocicleta a diseñar ha salido una altura de centro de gravedad mayor de lo que se esperaba. Por lo tanto se confirma la teoría explicada previamente sobre el centro de gravedad. En las motocicletas comerciales si que suele ser más bajo el centro de gravedad porque el vehículo es más estable y fácil de manejarla, que es lo que busca un cliente convencional. Mientras que en las motocicletas de competición se busca una motocicleta más agresiva y ágil, se necesitará mayor destreza por parte del piloto para pilotarla pero irá más rápido.

Una cierta altura del mismo tiene unos efectos beneficiosos como puede ser una mayor facilidad para el piloto de tumbar la motocicleta en las curvas o evitar que deslicen las

ruedas en aceleración. Además el modelo está más cargado en la parte delantera lo que evita que se levante la rueda delantera para no perder tracción en aceleraciones fuertes. Con un centro de gravedad adelantado también proporciona una mayor estabilidad direccional.

En realidad este valor es solo orientativo a la hora de diseñar la motocicleta, ya que la posición del centro de gravedad tiene una gran dependencia en cómo se posicione el piloto sobre la moto. El piloto no está sentado de manera estática en la moto, se mueve continuamente en curvas, aceleraciones, frenadas etc. Por lo que no se puede determinar un valor fijo del centro de gravedad, pero los resultados obtenidos servirán de gran ayuda para hacerse una idea de cómo llevar a cabo el diseño lo más efectivo y óptimo posible.

Para confirmar que la posición del centro de gravedad obtenido no difiere mucho del de una motocicleta de competición real, se calculó de manera física el centro de gravedad de la Honda RS con el piloto subido en ella.

Para la realización del cálculo se pesa la motocicleta con dos básculas una en cada rueda con el vehículo en posición horizontal. Después se vuelve a medir el peso en cada rueda pero con una de las dos ruedas subida a un escalón o desnivel.



GEOMETRÍA GENERAL HONDA RS (mm)		
Batalla	w	1215
Radio delantero	Rf	282
Radio trasero	Rr	300
Escalón	z	185
Ángulo	θ	0,152857948 rad

El ángulo es el debido a la altura a la que está subida la motocicleta.

$$\theta = \arcseno\left(\frac{z}{w}\right)$$

Las medidas realizadas con la báscula son:

MEDIDA HORIZONTAL	
F1 (rueda delantera)	68 kg
R1 (rueda trasera)	81 kg
MEDIDA CON INCLINACIÓN	
F2 (rueda delantera)	62 kg
R2 (rueda trasera)	87 kg

$$x = \frac{R_1 \cdot w}{R_1 + F_1}$$

$$y = \frac{R_2 \cdot w}{(R_2 + F_2) \cdot \text{seno}(\theta) \cdot \tan(\theta)} - \frac{x}{\tan(\theta)} + R_f + \frac{x \cdot (R_r - R_f)}{w}$$

COMPARACIÓN			delante %
Honda RS	b	554,5	0,46
	h	609,4	
Modelo moto	b	700	0,56
	h	650	

A parte del cálculo manual se utilizó un pequeño programa creado por el ingeniero Tony Foale, que calcula automáticamente el centro de gravedad de la motocicleta. De los que obtiene los mismos valores que se han obtenido en el cálculo manual.

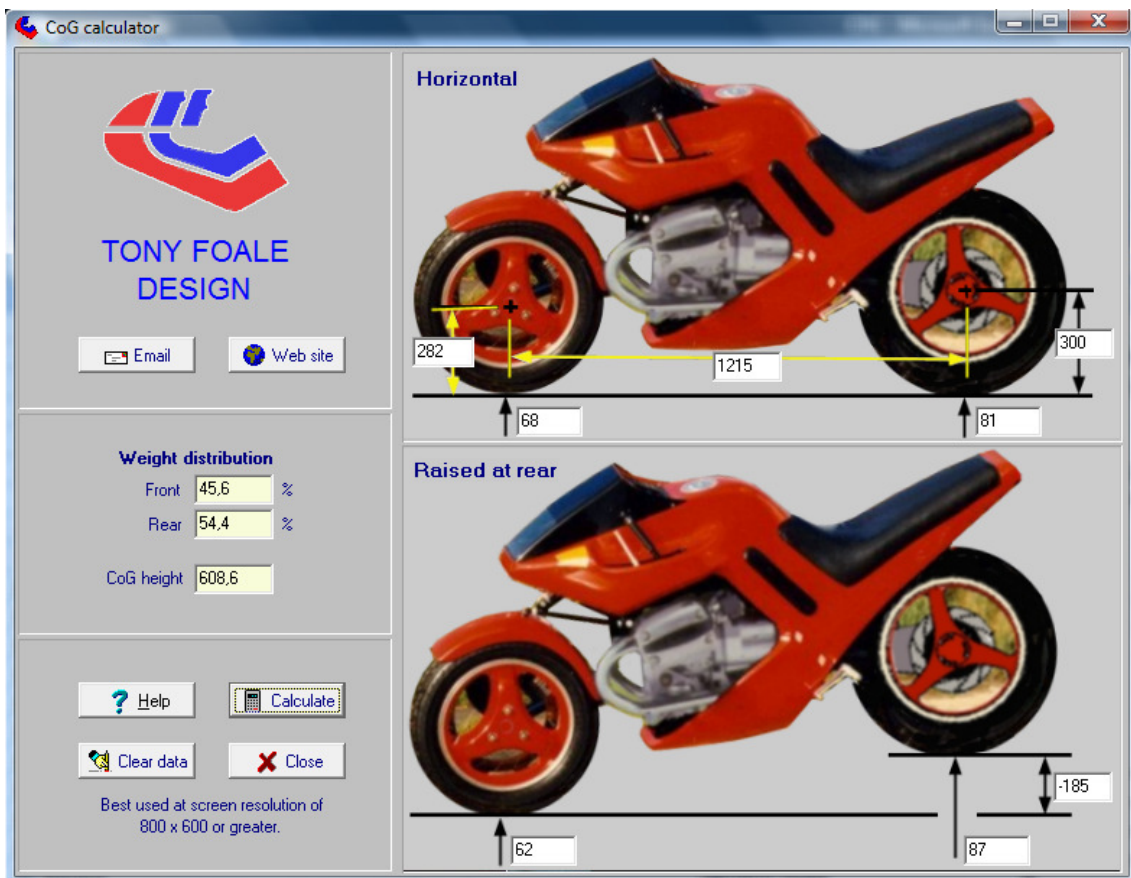


Figura 6.13

Este cálculo de la Honda RS se realizó con el depósito vacío. Si consideramos el depósito, serían unos 10 kilos más en la parte delantera y superior de la motocicleta. Esto subiría y adelantaría algo más el centro de gravedad de la Honda.

Observando el cálculo realizado de la Honda sale un CDG un poco más bajo que el de nuestro modelo y cargado en la parte trasera, es decir con un valor b menor. La diferencia de altura no es muy significativa pero el hecho de que nuestro modelo este más cargado en la parte delantera hará que nuestro modelo tenga un comportamiento diferente a la Honda.

Aún existiendo alguna diferencia entre ambos valores se da por válido la posición del centro de gravedad obtenido mediante el simulador, ya que es una posición perfectamente factible en este tipo de vehículos y ha sido el que mejor resultado nos ha dado según el simulador. Por lo tanto el diseño final de la motocicleta tendrá este valor y una vez que este la motocicleta y se le realicen las primeras pruebas habría que ver si conviene hacer alguna modificación al respecto.

Batalla (p)

Para este estudio se fijaron los valores óptimos del centro de gravedad en sus máximos ($b=700\text{mm}$ y $h=650\text{mm}$) y para el resto de las variables geométricas se cogieron las establecidas al inicio del análisis. Se fueron realizando varias simulaciones variando el valor de la batalla.

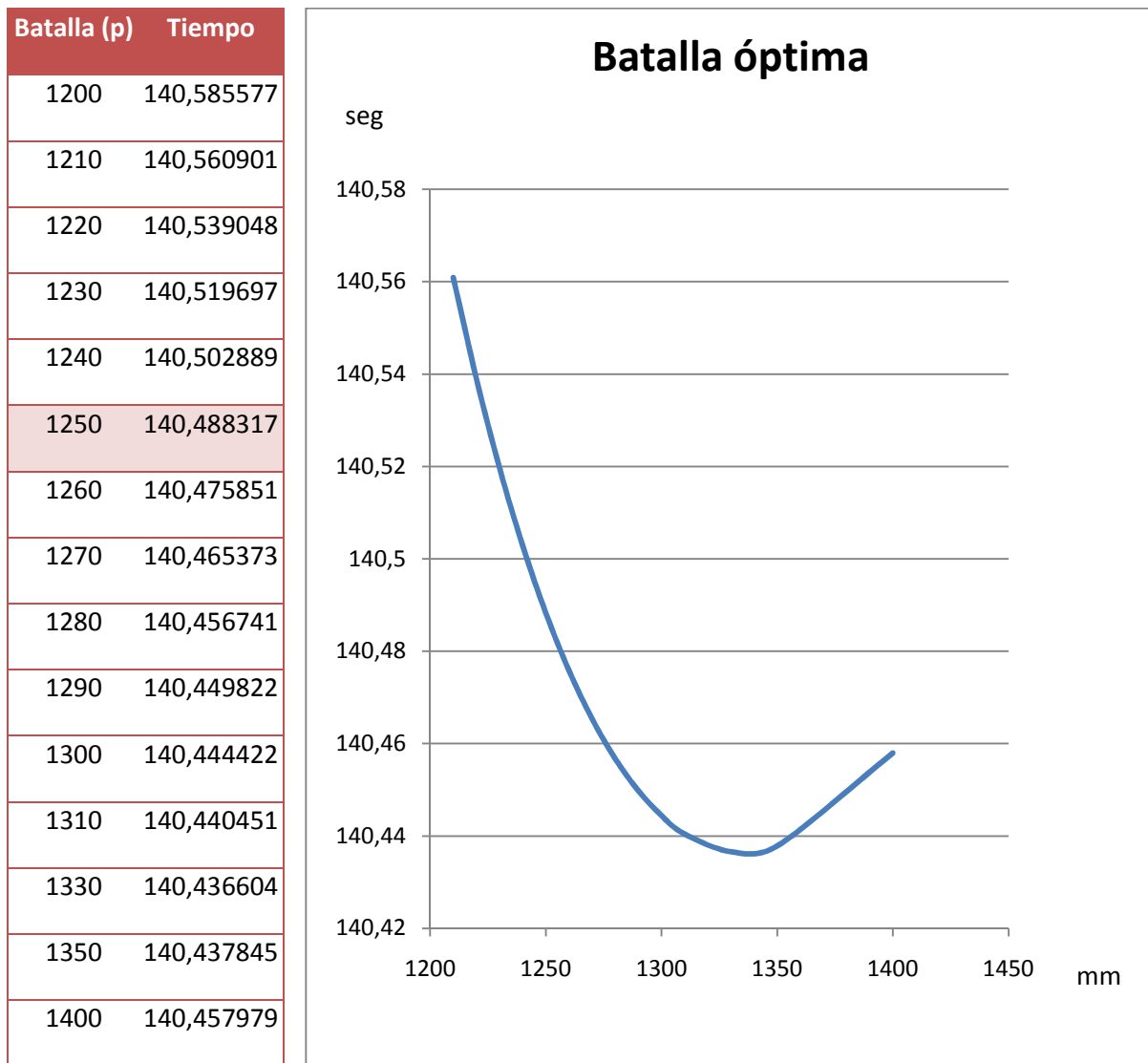


Figura 6.14

Se realizaron simulaciones con valores de batalla mayores que el límite superior (1300mm). Se quería comprobar si aumentando la longitud entre ejes seguiría disminuyendo el tiempo por vuelta tal y como se ve en el gráfico. Lo que se pudo comprobar es que el mínimo tiempo por vuelta se da para una batalla de 1330 mm, a partir de ese valor el tiempo por vuelta aumentaba.

Es curioso que el valor óptimo que nos da el simulador no está ni siquiera en los límites establecidos inicialmente. El límite escogido era de 1200mm a 1300mm ya que todas las

motocicletas de competición de esta cilindrada se mantienen en esos márgenes. Es cierto que las motocicletas comerciales suelen tener una batalla algo mayor que las de competición, esto se debe a que proporcionan una mayor estabilidad direccional y son más fáciles de manejar para los usuarios convencionales.

Pero tal y como dice la teoría en la motocicletas de competición es necesario una menor batalla para conseguir mayor agilidad en las entradas de las curvas. No se debe olvidar, que un simulador por muy bueno que sea no se puede creer todo lo que diga ciegamente. Los resultados del simulador son orientativos y siempre se debe usar el juicio ingenieril.

En las simulaciones que se han realizado se considera un piloto ideal, es decir, un piloto que sea capaz de proporcionar la fuerza necesaria a la dirección en el instante preciso. Este factor que el software no lo considera hay que tenerlo en cuenta también, porque en la realidad la fuerza que puede proporcionar un piloto a la dirección es limitada y además existe un desfase de tiempo entre que el piloto ve la necesidad de aplicar la fuerza hasta que esa fuerza es aplicada en el asfalto por el neumático.

El problema que plantea una batalla de 1330 mm es que la motocicleta no tiene la manejabilidad suficiente para entrar rápido en curvas y tener un buen resultado en el circuito. Es decir al piloto por muy cómodo que pueda ir en línea recta le resulta muy difíciloso su manejo en curvas. Esto es un aspecto que no lo considera el software, por eso mismo se ha decidido no coger la batalla óptima obtenida mediante el simulador y se ha escogida una algo más pequeña.

Finalmente se ha decidido escoger una batalla de **1250mm**. Es un valor que se encuentra dentro de los límites fijados al principio y que da un buen resultado en el simulador. Si se observa con detenimiento la tabla superior, se verá que con la batalla escogida se mejora la vuelta en una décima de segundo con respecto a 1200mm, mientras que tan solo hay unas centésimas de segundo de diferencia con respecto al menor tiempo por vuelta (con 1330mm).

Ángulo de lanzamiento (ϵ)

Para este estudio se fijaron los valores óptimos del centro de gravedad en sus máximos (b=700mm y h=650mm) y para el resto de las variables geométricas se cogieron las establecidas al inicio del análisis. Se fueron realizando varias simulaciones variando el valor de epsilon.

Epsilon		Vuelta rápida
grados	radianes	segundos
15	0,2618	140,54589
21	0,3665	140,53323
21,4	0,37348	140,532035
21,8	0,38046	140,53081
22,2	0,38744	140,529542
22,6	0,39442	140,528219
23	0,4014	140,526832
23,4	0,40838	140,525376
23,8	0,41536	140,523854
24,2	0,42234	140,522271
24,6	0,42932	140,520643
25	0,4363	140,518997
30	0,5236	140,501599
40	0,698131	140,472463

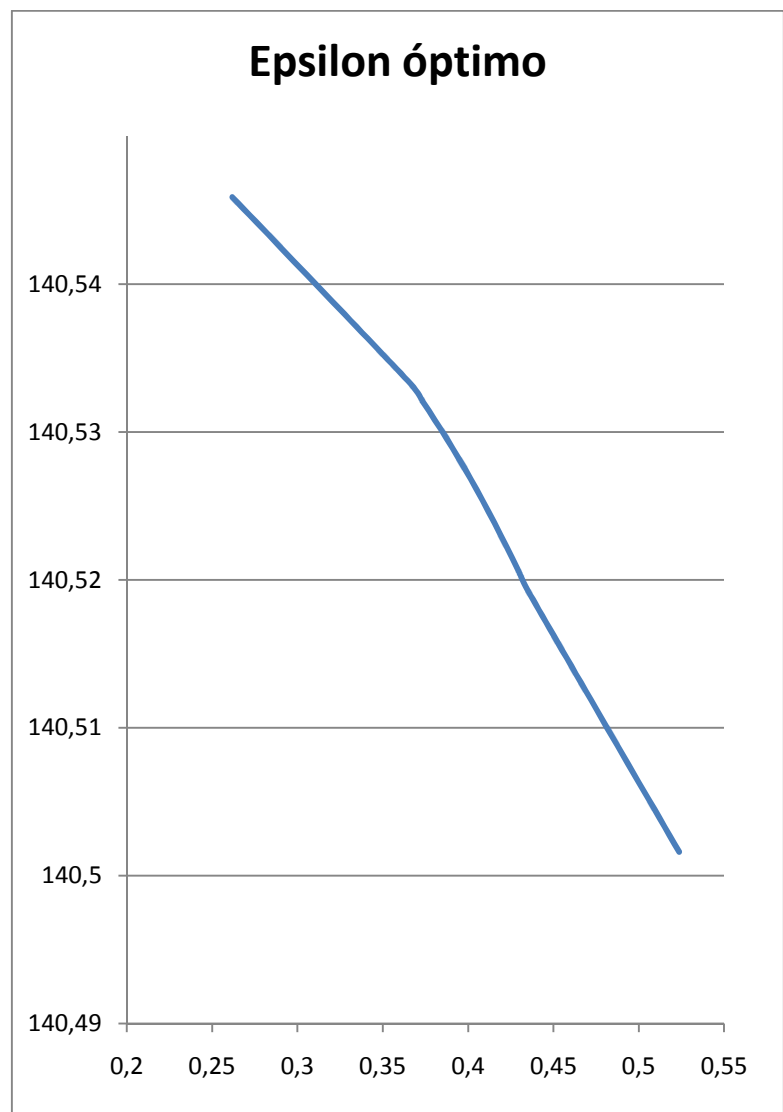


Figura 6.15

Aquí también ocurre algo parecido a lo que sucedía con la batalla. Según el simulador cuanto mayor sea el ángulo de lanzamiento menor es el tiempo por vuelta. De hecho si se

aumenta el ángulo más allá del límite fijado en un principio sigue mejorando el tiempo en el circuito.

La explicación a esto al igual que con la batalla es que hay una serie de aspectos que el software no considera pero no se pueden pasar por alto. Los límites fijados para el ángulo de lanzamiento son los utilizados para motocicletas de estas características y si nos fijamos en las motocicletas de competición ese margen se reduce a los ángulos 22-24 grados.

Tal y como dice la teoría con los ángulos que se habían elegido la caída del avance al girar la dirección es muy pequeña y no tendría grandes consecuencias en el comportamiento de la motocicleta. El efecto autoalineante que proporciona un avance positivo no se vería muy perjudicado. Con una ϵ muy grande, como la que da el simulador, la motocicleta se caracterizaría por tener una buena estabilidad longitudinal pero el piloto debería realizar grandes esfuerzos para girar la dirección. Por eso mismo como interesa una motocicleta manejable para el piloto se ha elegido un ángulo menor que el que daba el programa. De esta manera la motocicleta será más nerviosa y al piloto le será más fácil coger las curvas.

Cabe destacar que las diferencias en tiempos entre los diferentes valores de ϵ son muy pequeñas, se trata de centésimas de segundo. Por lo tanto conviene coger un ángulo dentro de los límites fijados al inicio y que asegure un buen comportamiento y manejabilidad a la motocicleta, aspecto que no contempla el software. Finalmente el ángulo de lanzamiento elegido es de **23,4 grados** (0,40838 rad), un valor muy extendido en las motocicletas de competición y que permita al piloto realizar una buena actuación sobre la pista. Mirando la tabla se ve como la diferencia con respecto al ángulo de 25 grados es de tan solo una centésima, así que se considera que el valor escogido será el más beneficioso para la motocicleta a diseñar.

Avance (An)

Para este estudio se fijaron los valores óptimos del centro de gravedad en sus máximos (b=700 y h=650) y para el resto de las variables geométricas se cogieron las establecidas al inicio del análisis. Se fueron realizando varias simulaciones variando el valor del avance.

an	Vuelta rápida
50	140,509135
80	140,526832
82	140,5279
84	140,528952
86	140,529985
88	140,531003
90	140,53201
92	140,533001
94	140,533981
96	140,53495
98	140,53591
100	140,536862
130	140,550321

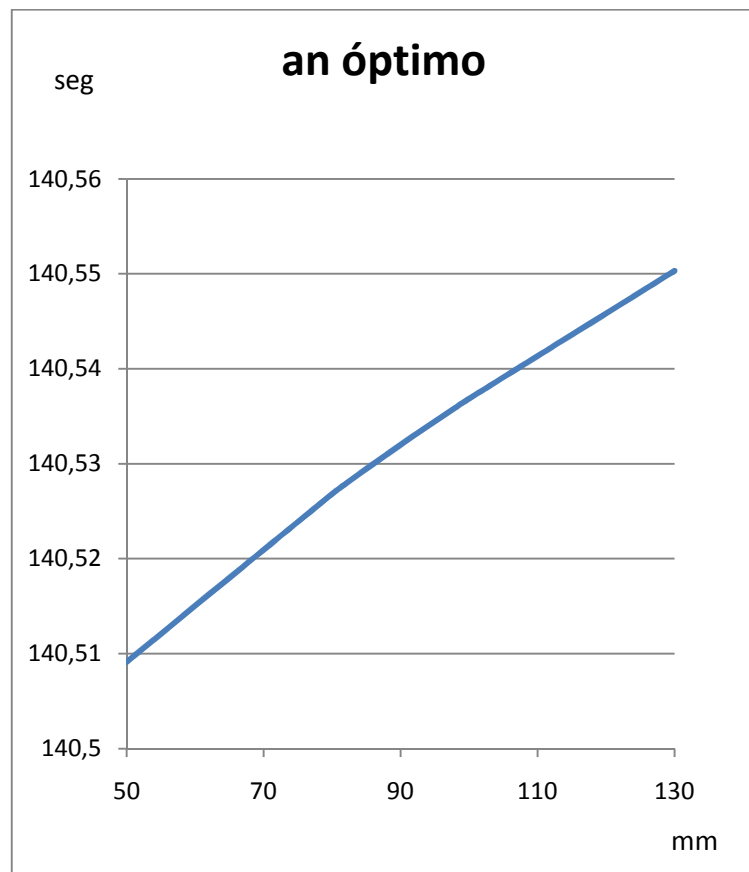


Figura 6.16

Con el avance ocurre exactamente lo mismo que con los parámetros anteriores. Cuanto más pequeño es el valor del avance incluso más allá del límite fijado el tiempo por vuelta mejora. Cabe destacar que este parámetro era el menos influyente sobre la variable respuesta y esto se aprecia claramente en la tabla. La diferencia del tiempo por vuelta cambia muy poco, tan solo cinco centésimas de la máxima a la mínima.

El límite escogido fue cogido de las motocicletas de 125 de competición que corren actualmente. Así como el ángulo de lanzamiento es algo menor que el de las comerciales pero tampoco puede ser muy pequeño porque debe proporcionar algo de estabilidad direccional. Por lo tanto el valor de 50mm se descarta por ser demasiado pequeño y se escogerá el mínimo

fijado que es de **80mm**. Con este valor se asegura que la motocicleta tenga un comportamiento bueno en cuanto a estabilidad y además según el simulador será el valor más apropiado para el circuito de Alcañiz. De todas maneras en el diseño final se hará con avance variable para poder ajustar la puesta a punto final en pista.

Conclusión

Por lo tanto los parámetros óptimos para el circuito de Alcañiz que tendrá la motocicleta serán los siguientes. Hay que dejar claro que el modelo se está diseñando para el circuito donde correrá y puede que para un circuito con diferentes características se obtengan otros valores.

VALORES ÓPTIMOS	
b	700
h	650
p	1250
epsilon	0,40838
an	80

El diseño se ha realizado para el circuito de Alcañiz. Un circuito largo con una larga recta donde se alcanzarán grandes velocidades y habrá una fuerte frenada. También tiene un tramo con dos curvas consecutivas llamada “sacacorchos” igual que el circuito de Laguna Seca de Estados Unidos.

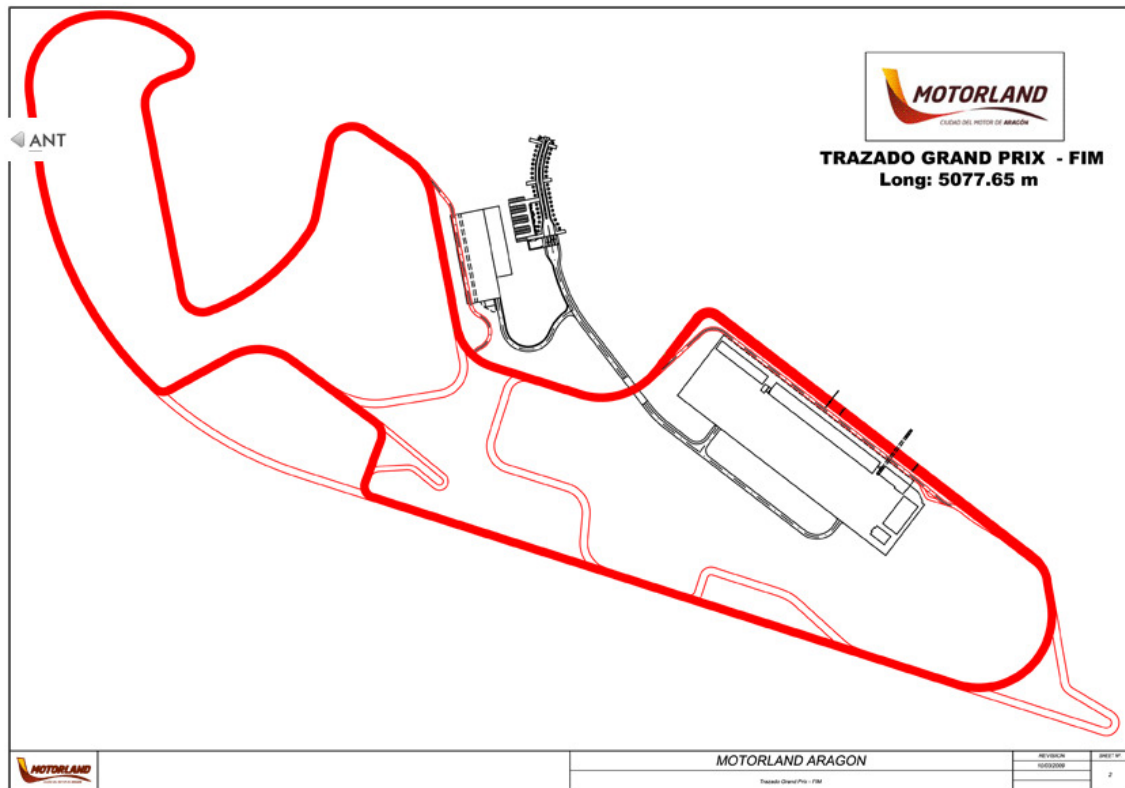


Figura 6.16

Con la configuración óptima este es el trazado que realiza el modelo de la motocicleta según el simulador. Como se ha comentado antes es la trazada óptima que debería de realizar el piloto, pero que en la realidad es prácticamente imposible que la haga igual.

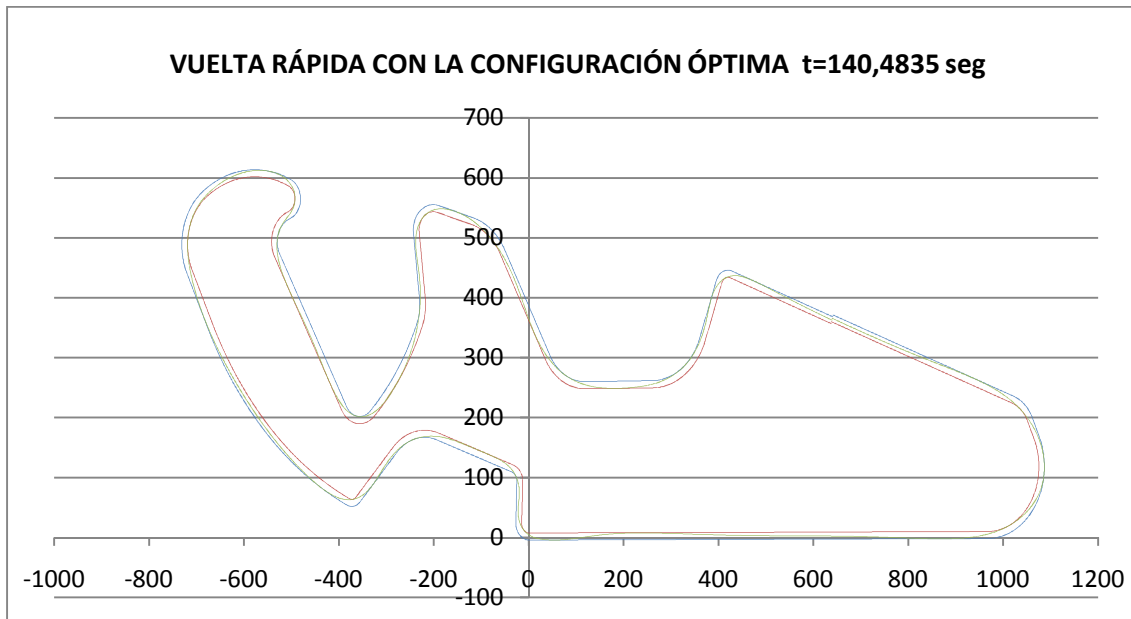


Figura 6.17

6.3.3. OTROS PARÁMETROS DE INTERÉS

Los parámetros geométricos más importantes ya están definidos. A partir de estos parámetros ya se podría empezar a realizar los primeros dibujos en CAD. Tal y como se ha comentado antes existen otra serie de parámetros que influyen en el comportamiento de la motocicleta. Pero debido a la dificultad que implica diseñar un chasis para un valor exacto de algunos de esos parámetros no se ha hecho ninguna definición de las mismas. Algunos de estos parámetros son por ejemplo las inercias entorno a cada eje del vehículo.

Inercias

Aunque no se definirá ningún valor para las inercias se realizará un ensayo solo para comprobar la gran influencia que tienen estos parámetros sobre el comportamiento del vehículo sobre el circuito de Alcañiz. En este ensayo el resto de los parámetros cogerán los valores iniciales.

- Factores controlados: Ix, Iy e Iz
- Niveles por factor: + y – (valores máximos y mínimos que pueden tener los factores)

Nº	Ix	Iy	Iz	Tiempo	Media
1	5 (-)	15 (-)	10 (-)	142,204217	
2	15 (+)	15 (-)	10 (-)	142,156995	
3	5 (-)	40 (+)	10 (-)	142,109457	
4	15 (+)	40 (+)	10 (-)	142,061852	
5	5 (-)	15 (-)	25 (+)	142,258437	
6	15 (+)	15 (-)	25 (+)	142,211684	
7	5 (-)	40 (+)	25 (+)	142,162491	
8	15 (+)	40 (+)	25 (+)	142,115013	
Suma =				1137,280	142,160

	Ix	Iy	Iz	TOTAL	RESIDUAL	TABULADO
EFFECTOS SIMPLES	-0,047	-0,096	0,054			F - table (5%)
Suma de Cuadrados	0,004	0,018	0,006	0,0	0,00	7,71
Grados de libertad	1	1	1	7	4	
Cuadrados medios	0,004	0,018	0,006		0,0000	t - table (5%)
F - calculada	15771,1	64562,6	20415,9			2,776

La F calculada coge valores mucho más grandes que la tabulada con lo que se corrobora la importancia de estos parámetros en la variable respuesta. A continuación se verá si existen interacciones dobles o triples entre ellas.

	Ix x Iy	Ix x Iz	Iy x Iz
Interacciones dobles	0,000	0,000	-0,001
Suma de Cuadrados	0,000	0,000	0,000
Grados de libertad	1	1	1
Cuadrados medios	0,000	0,000	0,000
F - calculada	0,542	0,157	3,250

No existe ningún tipo de interacción doble.

Int. Triple	0,000
Suma de Cuadrados	0,000
Grados de libertad	1
Cuadrados medios	0,000
F - calculada	0,000

Tampoco existe interacción triple.

Resultados	Media	Desviación típica	Máximo (+2,78 σ)	Mínimo (-2,78 σ)
(-);(-);(-)	142,204	0,0005	142,206	142,203
(+);(-);(-)	142,157	0,0005	142,158	142,155
(-);(+);(-)	142,109	0,0005	142,110	142,107
(+);(+);(-)	142,061	0,0005	142,063	142,060
(-);(-);(+)	142,258	0,0005	142,259	142,257
(+);(-);(+)	142,211	0,0005	142,212	142,209
(-);(+);(+)	142,162	0,0005	142,164	142,161
(+);(+);(+)	142,115	0,0005	142,117	142,114

Según el simulador para los máximos y mínimos que hemos cogido es preferible tener un I_x e I_y entorno a sus valores máximos, mientras que I_z es preferible el mínimo posible (para facilitar los cambios rápidos de dirección y minimizar los efectos de derrapaje, así también se reduce el efecto de cabeceo).

7. ANÁLISIS DE ESFUERZOS

7.1. CÁLCULOS TEÓRICOS

En esta parte se estudiarán las fuerzas que actúan sobre la estructura de la motocicleta cuando ésta se encuentra en instantes de máximo esfuerzo. Es de vital importancia este apartado ya que es esencial tener bien planteadas las fuerzas resultantes para introducirlas posteriormente en el ordenador y realizar el análisis por elementos finitos de manera que éste sea lo más exacto posible.

Con la geometría óptima que se ha definido para el modelo a diseñar se asumirán una serie de condiciones en las que se calcularán las cargas límite que actuarán sobre la motocicleta. Estas fuerzas serán las que actúan en los neumáticos a través del suelo y que luego se transmitirán al vehículo. El principal objetivo de conocer estas cargas es de realizar un diseño apropiado del chasis para las condiciones que se podrán dar en la maquina durante la carrera y en su propio funcionamiento.

Conocidas las cargas se podrá pre-dimensionar el chasis, se tratará de que no esté sobredimensionado para no tener más peso del debido, ya que cuanto menor sea el peso del vehículo mejor resultado dará en la carrera. Por otro lado tendrá que diseñarse de manera que aguante todo los esfuerzos que puedan actuar sobre él sin que sufra ningún tipo de rotura. Por lo que este un aparto esencial en el diseño general de la motocicleta, ya que no solo incumbe al chasis sino que también a otros elementos que tiene el vehículo como pueden ser el basculante, sub-chasis, tija, etc.

Lo primero será predefinir el peso total que vaya a tener el vehículo, para ello se cogerá como base el reglamento técnico ya que condiciona este aspecto de la máquina. Siguiendo estos criterios se considerará que el peso de la moto en seco será de 90 Kg (mínimo exigido por la competición), el peso del piloto de 70Kg (suponiendo el peor caso ya que es muy probable que el piloto sea algún federado menor de 18 años), el peso de la gasolina, lubricantes y fluidos de refrigeración será de 10Kg.

m(vacío)	90kg
m(total)	170kg

Se considerará un coeficiente de adherencia máximo, en condiciones de pista de velocidad asfaltada en seco y con neumáticos blandos, $\mu=1,2$.

7.1.1 MOVIMIENTO RECTILÍNEO

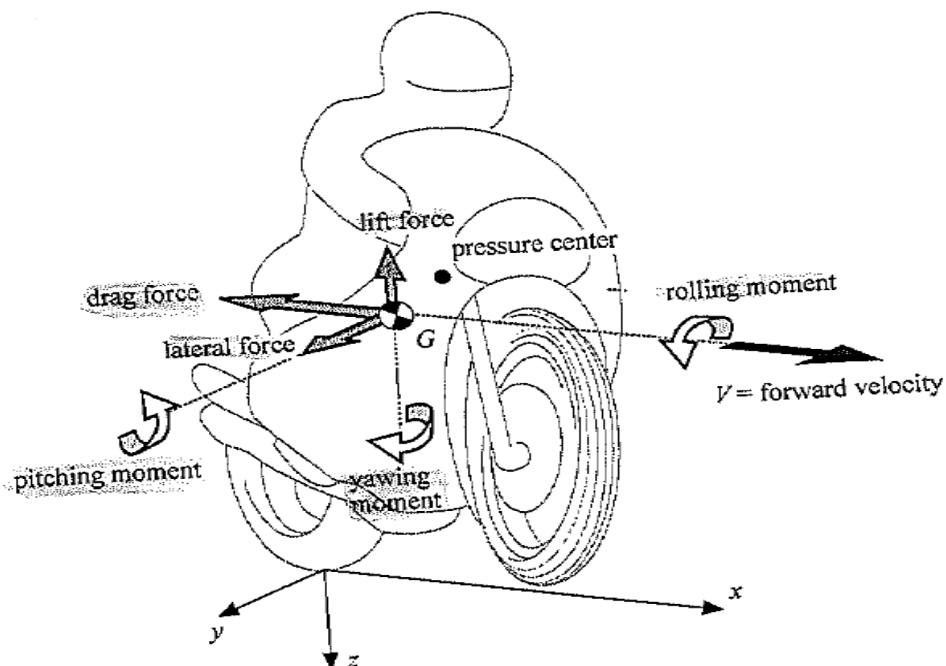
Durante el movimiento en estado estacionario, la fuerza de aceleración producida por el motor se iguala a las fuerzas que se oponen al movimiento de avance y dependen esencialmente en tres fenómenos:

- Resistencia a la rodadura del neumático
- Resistencia aerodinámica al movimiento de avance
- La componente de la fuerza del peso debido a la pendiente que pueda tener la superficie de la carretera

7.1.1.1 Fuerzas de resistencia aerodinámica

Todas las influencias aerodinámicas que actúan en la motocicleta se pueden representar mediante tres fuerzas, que actúan sobre el centro de presiones que se encuentra ligeramente adelantado y por encima del centro de gravedad. Estas tres fuerzas crean sus respectivos momentos en el centro de gravedad que serán los momento de inclinación, guiñada y cabeceo. Pero debido al pequeño valor que tendrán estos momentos y a la cercanía del centro de presiones y el centro de gravedad, asumiremos que las tres fuerzas actuarán en el centro de gravedad:

- Resistencia al avance, en oposición al desplazamiento longitudinal
- Fuerza de elevación que tenderá a elevar la motocicleta
- Fuerza lateral que tenderá a empujar la motocicleta hacia un lado



Las fuerzas más importantes serán la resistencia al avance y elevación, que serán las que se van a calcular. La fuerza de resistencia al avance influirá en la máxima velocidad que pueda obtener el vehículo y en el comportamiento de la aceleración. Mientras que la fuerza de elevación reducirá la carga en el neumático delantero y a veces incluso en el trasero. F_D y F_L serán proporcionales al cuadrado de la velocidad:

$$F_D = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot C_D \cdot A \cdot V^2$$

$$F_L = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot C_L \cdot A \cdot V^2$$

ρ (aire kg/m ³ , en condiciones normales)	1,167
CD (coeficiente de resistencia aerodinámica)	0,688
CL (coeficiente de elevación)	0,25
A (área frontal, m ²)	0,32
$C_D \cdot A$ (área de resistencia aerodinámica)	0,22
$C_L \cdot A$ (área de elevación)	0,08

El valor de C_D está fuertemente influenciado por la forma de la motocicleta y en concreto del carenado. Aunque el valor del coeficiente no es muy significativo, el valor que verdaderamente hay que fijarse es el área de resistencia aerodinámica. Este valor puede ser comparado con el de otras motocicletas para ver cual menos resistencia al avance. En las motocicletas del mundial de 125 suelen tener un valor alrededor de 0,22m², que ha sido el valor que se ha escogido para nuestro modelo.

La elevación de la motocicleta es peligrosa porque reduce la carga en las ruedas y por lo tanto la adherencia en el neumático. Este aspecto también está fuertemente influenciado por la motocicleta y su carenado. Al igual que con la resistencia aerodinámica el valor significativo es el producto $C_L \cdot A$, que suele estar en un rango de 0,06 hasta 0,12m². Para este modelo se ha escogido un valor de 0,08, bastante pequeño ya que se trata de una moto de 125.

El área frontal será de 0,32m², es un valor que suelen tener los vehículos de estas características. A partir de este valor se podrán hallar los valores de los coeficientes de resistencia al avance y de elevación, tal y como se muestran en la tabla superior.

Para una velocidad máxima aproximada que pueda alcanzar la motocicleta de 50 m/s (180 km/h) estos serán los valores de las fuerzas aerodinámicas:

FD (N)	320,925
FL (N)	116,700

7.1.1.2. Fuerzas verticales en estado estacionario

Se ha comentado mucho a lo largo del trabajo de la importancia que tiene el CDG sobre el comportamiento de la motocicleta. Este parámetro influye de manera considerable también en las cargas que vaya a sufrir la motocicleta. En este caso las fuerzas verticales de reacción entre las ruedas y el suelo están muy influenciadas.

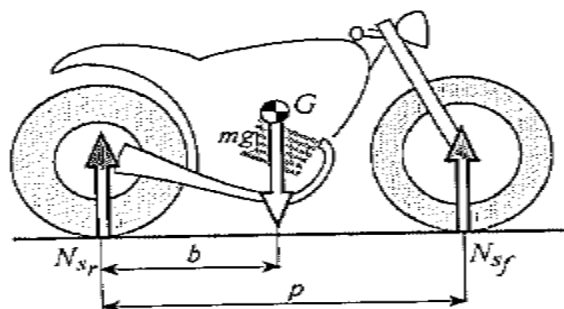


Figura 7.2

Se considerará las fuerzas verticales estáticas, es decir, como si estuviese el vehículo estacionado. Se cumplirán las siguientes ecuaciones:

$$mg = N_r + N_f = 1666\text{N}$$

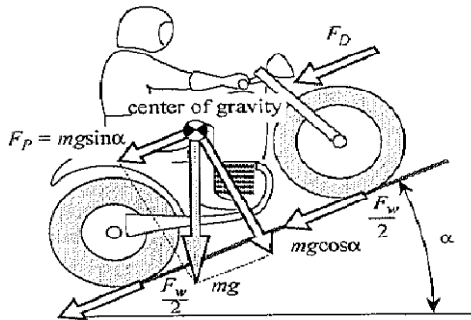
$$N_f = mg \cdot (b/p) = 933\text{N}$$

$$N_r = mg \cdot [(p-b)/p] = 733\text{N}$$

Es evidente que la suma de las dos normales deberá ser igual al peso total de motocicleta, mientras que las normales en cada rueda dependen de la posición del centro de gravedad. En este caso al estar la moto más cargada en la parte delantera la fuerza vertical en la rueda delantera será mayor.

7.1.1.3. Fuerza de resistencia causada por la pendiente de la carretera

La fuerza de resistencia causada por la pendiente de la carretera es igual a la componente del peso en la dirección de la motocicleta:



$$F_p = m \cdot g \cdot \text{seno}(\alpha)$$

Figura 7.3

Donde α representa la pendiente del plano de la carretera.

Gravedad (m/s)	9,81
Ángulo α (rad)	0,175 (10º)
F_p (N)	290,4

De todas maneras en los próximos cálculos no se tendrá en cuenta esta fuerza ya que la pendiente que puede tener el plano del suelo del circuito es prácticamente nula.

7.1.2. EQUILIBRIO EN ESTADO ESTACIONARIO

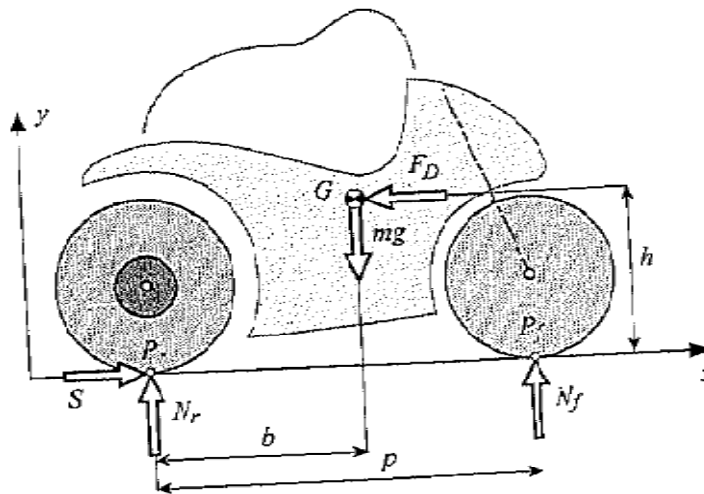
Se introducirán las siguientes hipótesis con respecto al modelo del sistema moto-piloto:

- La fuerza de rodadura es cero ($F_w=0$)
- La fuerza aerodinámica de elevación es cero ($F_L=0$)
- Debido a que la superficie de la carretera es lisa, la fuerza que se oponga al movimiento de avance será tan solo la fuerza de resistencia aerodinámica F_D .

Como se ha dicho antes se considera que el centro de presiones coincide con el centro de gravedad. Además de la fuerza aerodinámica comentada habrá más fuerzas que actúen en la motocicleta:

- El peso (mg) que actúa en el centro de gravedad

- Fuerza de avance S , que el suelo aplica a la moto en el punto de contacto de la rueda trasera
- Las fuerzas verticales de reacción N_f y N_r entre los neumáticos y el plano de la carretera



Las ecuaciones de equilibrio de la motocicleta permitirán conocer valores desconocidos de las fuerzas de reacción N_f y N_r , una vez que la fuerza del peso mg , la fuerza de avance S y la fuerza aerodinámica F_D sean conocidos. Al ser estado estacionario no habrá aceleración y el vehículo se encontrará a velocidad constante.

Equilibrio de fuerzas horizontales: $S - F_D = 0$

Equilibrio de fuerzas verticales: $mg - N_r - N_f = 0$

Equilibrio de momentos respecto al CdG: $Sh - N_r b + N_f(p - b) = 0$

Las reacciones verticales de sobre las ruedas serán: $N_f = mg \cdot (b/p) - S(h/p)$

$N_r = mg \cdot ((p - b)/p) + S(h/p)$

Vemos como estas reacciones están compuestas por un término estático que depende de la distribución de peso y un término dinámico que depende directamente del empuje y la altura del CDG y es inversamente proporcional a la distancia entre ejes. Este segundo término es denominado transferencia de carga.

Para una velocidad máxima de 50m/s (180km/h) se tendrán los siguientes valores:

Fuerza de rodadura	Fw	0
Fuerza de elevación	FL	0
Fuerza de conducción	S	320,925N
Fuerza aerodinámica	F _D	320,925N
Carga delantera	Nf	767,031N
Carga trasera	Nr	900,669N
Ángulo transfer. carga	τ	27º (0,48rad)

El ángulo de la transferencia de carga será el formado por las fuerza de avance S y por la fuerza normal en el neumático trasero, que forman un ángulo de 27 grados. Se puede ver ahora como las cargas dinámicas varían de las estáticas calculadas anteriormente. Ahora está más cargado la rueda trasera debido a la transferencia de cargas.

7.1.3. MOVIMIENTO LINEAL TRANSITORIO

Ahora se va a considerar la motocicleta en estado transitorio con un movimiento rectilíneo, asumiremos las hipótesis del apartado anterior. Las ecuaciones de equilibrio propuestas para el apartado anterior seguirán siendo validas para el equilibrio de fuerzas verticales y el de momentos.

Equilibrio de fuerzas verticales: $mg - N_r - N_f = 0$

Equilibrio de momentos respecto al CDG: $Sh - N_r b + N_f (p - b) = 0$

Donde S será la fuerza de empuje que será (+) positiva durante la aceleración y (-) negativa durante la frenada.

La ecuación de equilibrio de fuerzas horizontales dependerá de que estemos acelerando o frenando.

7.1.3.1. Aceleración

7.1.3.1.1. Limitado por el motor

En este caso se obtendrá la aceleración y fuerza de empuje máximo que podrá proporcionar el motor. No se realizarán ningún otro tipo de consideraciones y el único limitante será el motor. En este caso la fuerza de empuje será igual a la suma de las inercias y las fuerzas de resistencia.

$$\text{Equilibrio de fuerzas horizontales: } S^* = F_D + m^* \cdot x''$$

Donde $S^* = T \cdot \omega_m / V$. Siendo T el par del motor y ω_m / V el ratio entre la velocidad angular del motor y la velocidad lineal de la motocicleta. El termino m^* será la masa equivalente de la moto, $m^* = m + \text{efecto de las inercias rotacionales}$.

Para calcular esta masa equivalente se tendrá en cuenta toda la energía cinética de los elementos rotatorios importantes que tenga la moto. Solo se tendrá en cuenta las inercias de las ruedas delantera y trasera y del volante de inercia que está acoplado al motor. El resto de las inercias las despreciaremos debido a su pequeño valor y su gran dificultad para conocerlas. Así se tendrá:

$$m^* = m + I_{\omega_r} \cdot \tau_r^2 + I_{\omega_f} \cdot \tau_f^2 + I_{\omega_m} \cdot \tau_m^2$$

Donde,

- $m=170$ kg es la masa de la motocicleta con el piloto incluido
- $I_{\omega_r}=0,35$ kg·m² es la inercia de la rueda trasera
- $I_{\omega_f}=0,3$ kg·m² es la inercia de la rueda delantera
- $I_{\omega_m}=0,002$ kg·m² es la inercia del volante de inercia
- $\tau_r=3,38$ m⁻¹ es el ratio de velocidad de la rueda trasera (1/Rr)
- $\tau_f=3,55$ m⁻¹ es el ratio de velocidad de la rueda delantera (1/Rr)
- $\tau_m=51,7$ m⁻¹ es el ratio de velocidad de la rueda trasera (ω_m/V)

Para calcular el ratio de velocidad de la rueda trasera es necesario conocer la relación de marchas del motor:

Relación marchas	
Relación primaria	63/19
Marcha 1	30/13
Marcha 2	28/15
Marcha 3	26/17
Marcha 4	27/21
Marcha 5	26/23
Marcha 6	24/24
Relación última	2
Radio neumático trasero	0,296
Radio neumático delantero	0,282

$$\tau_m = \frac{63}{19} \cdot \frac{30}{13} \cdot 2 \cdot \frac{1}{0,296} = 51,7$$

También se dispone de la tabla de potencia del motor para las diferentes marchas obtenida por parte de la organización.

		FUERZA Rueda trasera (S)						POTENCIA
RPM	PAR (Nm)	1ª	2ª	3ª	4ª	5ª	6ª	W
6000	12	617,264197	499,298151	409,088821	343,9043385	302,3699981	267,4811522	8
7000	12	606,251778	490,390327	401,790394	337,7688478	296,9755087	262,7091038	9
8000	15	764,716873	618,570982	506,812359	426,0565434	374,6004391	331,3773115	12
9000	20	1019,24335	824,454623	675,498536	567,8641536	499,2815264	441,6721195	19
10000	18	937,296477	758,168706	621,188645	522,208037	459,1394335	406,1618065	19
11000	14	723,92439	585,574395	479,777341	403,329303	354,6180345	313,700569	16
12000	11	574,868968	465,005121	380,991591	320,2841394	281,6024801	249,1098862	14
13000	9	473,740836	383,203698	313,969417	263,9413229	232,0643515	205,2876956	12

Según la tabla de potencia el mayor par y por lo tanto la mayor aceleración se obtiene en la primera marcha con el motor a 9000rpm. En esta situación se tiene un par de 20Nm o una potencia de casi 20W y una fuerza en la rueda trasera de 1019,24N. En esta situación de máximo rendimiento del motor se calculará la aceleración máxima proporcionada por el motor.

$$\omega_m = 9000 \cdot \frac{2\pi}{60} = 942,48 \text{ rad / s}$$

Mediante la fórmula planteada recalculamos la fuerza de aceleración que se ha facilitado. Una vez conocido la fuerza S* se pueden calcular las cargas normales dinámicas tal y como se han calculado en la parte anterior.

S*	1019,2433N
T	20Nm
Nf	403,90545N
Nr	1263,79454N

Esta aceleración máxima se produce a un régimen de 9000rpm y en primera, por lo que la velocidad en ese momento será:

$$V_{rueda} = \frac{\omega_m}{\tau_m} = 18,23m / s = 65,6km / h$$

A esa velocidad la fuerza aerodinámica que se opone al avance será de $F_D=42,66N$ Por lo tanto en ese régimen de funcionamiento de mayor rendimiento del motor y a esa velocidad la aceleración será de (despreciando la fuerza de rodadura):

$$\ddot{x} = \frac{S^* - F_D}{m^*} = 5,36m / s^2$$

7.1.3.1.2. Limitado por la tracción

Si se tiene en consideración la aceleración de la motocicleta igual que en el apartado anterior, despreciando la fuerza de rodadura, la fuerza de aceleración vendrá dada por la fórmula:

$$S = m \cdot \ddot{x} + F_D$$

Donde S es la fuerza de aceleración y F_D la fuerza aerodinámica que se opone al avance. Asumiendo que el motor proporciona la potencia adecuada, la fuerza de aceleración debe ser menor o al menos igual al producto del coeficiente de adherencia y la carga vertical N_r .

$$S \leq \mu_p \cdot N_r$$

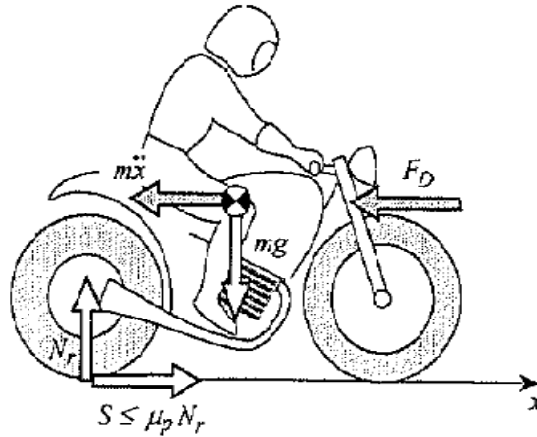


Figura 7.5

Si se recuerda que,

$$N_r = mg \cdot \frac{(p-b)}{p} + S \cdot \frac{h}{p}$$

Se tiene ahora:

$$\ddot{x} \leq \frac{\mu_p \cdot g \cdot \frac{(p-b)}{p}}{\left(1 - \mu_p \cdot \frac{h}{p}\right)} - \frac{F_D}{m}$$

La máxima aceleración se obtiene cuando la F_D es cero, esto sucederá empezando a velocidad muy baja. A medida que la velocidad aumenta, la aceleración bajo la limitación de la condición de fricción disminuye. Esto ocurre porque parte de la fuerza de aceleración es igualada a la fuerza aerodinámica y no es utilizada para acelerar el vehículo. Por lo tanto la máxima aceleración se dará a velocidad cero:

Aceleración limitada por tracción (m/s²)	x''	13,7757447
Coeficiente tracción	μp	1,2
Fuerza de rodadura (N)	Fw	0
Fuerza longitudinal (N)	S	2341,8766
Carga trasera (N)	Nr	1951,56383

Despreciando la fuerza de rodadura y para un coeficiente de adherencia máximo sale una aceleración de más del doble de la limitada por el motor. Es curioso ver como la carga vertical en la rueda trasera es mayor que todo el peso de la motocicleta. Esto en realidad es imposible ya que en estos cálculos estáticos la suma de las dos fuerzas normales no puede superar el peso total de la motocicleta. Por lo tanto se concluye que la motocicleta aunque el motor lo permitiese, no podría alcanzar semejante aceleración, existiría otro condicionante más limitador en la que la fuerza de aceleración fuese menor, como es el siguiente.

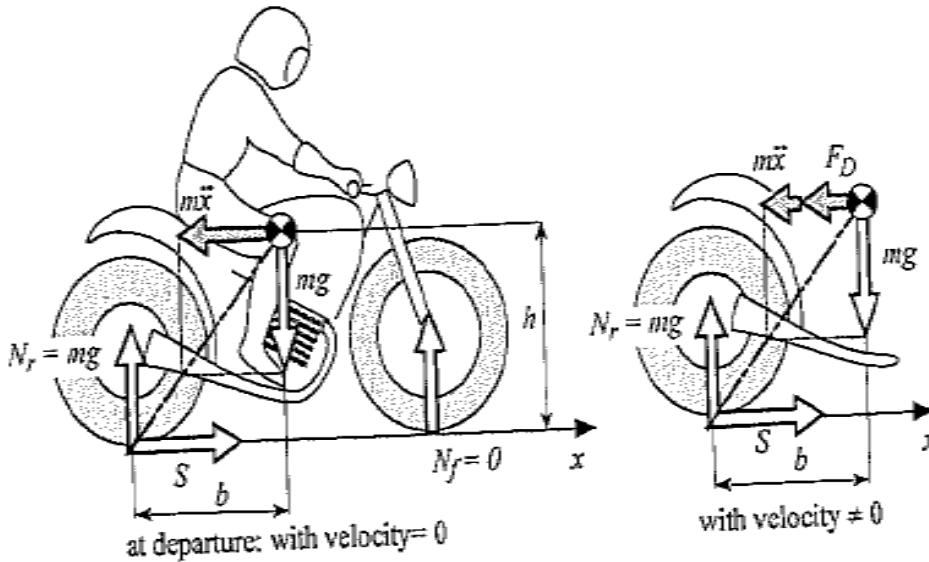
7.1.3.1.2. Limitado por la rodadura

La condición limitante de rodadura en este caso ocurre cuando la carga en la rueda delantera se reduce a cero. Esta situación se expresa de la siguiente manera:

$$N_f = mg \cdot \frac{b}{p} - S \cdot \frac{h}{p} = 0$$

De donde tenemos,

$$\ddot{x} = g \cdot \frac{b}{h} - \frac{F_D}{m}$$



La aceleración que impide el levantamiento de la rueda delantera depende en el ratio b/h .

De manera que la velocidad de avance aumenta gradualmente, la aceleración a la que ocurre el levantamiento de la rueda delantera disminuye. Esto ocurre porque el levantamiento de la rueda delantera es favorecido por la fuerza aerodinámica de oposición al avance. Por lo tanto la máxima aceleración bajo este limitante ocurrirá con velocidad nula y F_D nula.

Aceleración limitada por rodadura (m/s^2)	x''	10,5646154
Carga trasera (N)	N_r	1667,7
Carga delantera (N)	N_f	0
Fuerza longitudinal (N)	S	1795,98462

La aceleración obtenida con esta condición es mayor que la limitada por el motor pero menor que la limitada por la adherencia del suelo. Se ve claramente con carga de la rueda delantera es nula y todo el peso de la motocicleta se apoya sobre el neumático trasero.

7.1.3.2. Frenada

Se considerará que solo se frena con el freno delantero que ocurrirán cargas más extremas, será una situación mucho más exigente.

7.1.3.2.1. Limitada por la tracción

Para evaluar el rol del freno trasero bajo limitante de deslizamiento hay que tener en cuenta una serie de consideraciones. Durante la desaceleración la carga en la rueda delantera aumenta, mientras la carga de la rueda trasera disminuye, por lo que se deduce que ocurre una transferencia de cargas desde la rueda trasera a la rueda delantera. Si consideramos la motocicleta en fase de frenada y aplicamos las leyes de Newton, podemos calcular la transferencia de carga de la rueda trasera a la delantera.

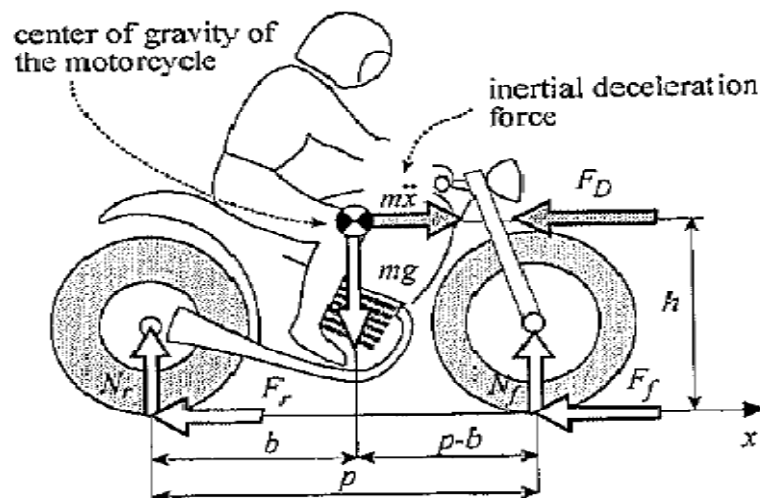


Figura 7.7

Se tienen tres ecuaciones debidas a al equilibrio de las fuerzas horizontales y verticales y al equilibrio de momentos alrededor del centro de gravedad:

$$m\ddot{x} = -F_f - F_r$$

$$mg - N_r - N_f = 0$$

$$-F \cdot h - N_r \cdot b + N_f \cdot (p - b) = 0$$

Donde F (la fuerza total de frenada) indica la suma de la fuerza delantera F_f y trasera F_r . La carga dinámica delantera será la suma de la carga estática y la carga dinámica. La carga dinámica trasera sin embargo será la diferencia entre la carga estática y la transferencia de carga.

$$N_f = mg \cdot \frac{b}{p} + F \cdot \frac{h}{p} = 0$$

$$N_r = mg \cdot \frac{(p-b)}{p} - F \cdot \frac{h}{p}$$

Se ve claramente como la transferencia de carga Fh/p es proporcional la fuerza de frenada total y la altura del centro de gravedad, y es inversamente proporcional a la batalla. Para evitar que el neumático deslice en la frenada, la fuerza que se aplique en la frenada no debe exceder el producto de la carga dinámica que actúa en el neumático multiplicado por el coeficiente de adherencia. Este producto representa la frenada máxima aplicable en el neumático, que será la fuerza de frenada en el límite de empezar a deslizar.

$$F = F_f + F_r = \mu \cdot (N_f + N_r)$$

$$F = \mu \cdot mg$$

Fuerza de Frenada por tracción (N)	FF	2001,24
Carga trasera (N)	Nf	1974,5568
Carga delantera (N)	Nr	0
Desaceleración (m/s^2)	x''	-11,772

La desaceleración obtenida es de más de un g y la carga vertical delantera es mayor que el propio peso de la motocicleta. Al igual que en el caso de aceleración limitado por tracción, esto es imposible el cálculos estáticos. Lo que sucede aquí también es que existirá otro condicionante más limitador que impedirá obtener esta fuerza de frenada y así la normal no superará el peso total del vehículo.

7.1.3.2.1. Limitada por vuelco

Al aumentar la fuerza de frenada total, la carga vertical de la rueda trasera ve disminuyendo hasta que llegue a cero. En este caso la condición limitante será el vuelco de la motocicleta, es decir cuando la carga dinámica vertical en el neumático trasero alcanza el valor cero.

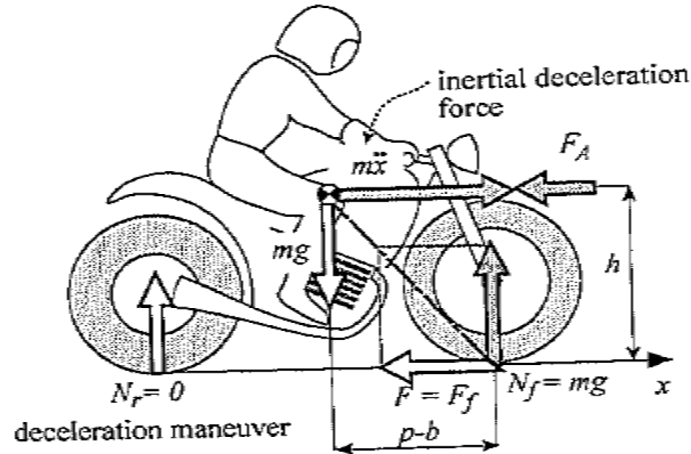


Figura 7.8

Bajo esta condición, la carga dinámica frontal será igual a todo el peso de la motocicleta y la dirección de la resultante de la carga dinámica y la fuerza de frenada pasa a través del centro de gravedad de la motocicleta. La ecuación de equilibrio de los momentos respecto al centro de gravedad expresan la fuerza de frenada en el momento de vuelco inminente.

$$F = N_f \cdot \frac{(p-b)}{h} = mg \cdot \frac{(p-b)}{h}$$

Un valor bajo de esta fuerza de frenada indica que el vehículo sería muy propenso a volcar. Por lo tanto se puede concluir que el vuelco se ve favorecido cuando la motocicleta es ligera y el centro de gravedad tiene una posición adelantada y elevada.

La ecuación de movimiento, en condiciones de vuelco inminente donde se ignora la fuerza aerodinámica es:

$$m\ddot{x} = -F = mg \cdot \frac{(p-b)}{h}$$

La máxima desaceleración, expresada en g's, es proporcional a la distancia longitudinal desde el centro de gravedad hasta el punto de contacto de la rueda delantera, y es inversamente proporcional a la altura del centro de gravedad.

$$\frac{\ddot{x}_{\max}}{g} \leq \frac{p-b}{h}$$

Es importante darse cuenta de que la desaceleración en el vuelco inminente depende solamente del centro de gravedad, y no en el peso de la motocicleta. Para incrementar este valor es necesario bajar el centro de gravedad y colocarlo lo más atrás posible. Teniendo en cuenta la fuerza aerodinámica que se opone al avance se tendría:

$$m\ddot{x} = -F - F_D$$

$$\frac{\ddot{x}_{\max}}{g} \leq -\frac{p-b}{h} - \frac{F_D}{mg}$$

La máxima desaceleración depende tanto de la masa como de la velocidad.

Fuerza de Frenada antes de volcar (N)	FFv	1411,13077
Desaceleración sin FD (m/s ²)	x''	-8,30076923
Desaceleración con FD (m/s ²)	x''	-10,1885633
Carga vertical delantera (N)	Nf	1667,7
Carga vertical trasera (N)	Nr	0

Es obvio que la fuerza aerodinámica ayuda a obtener un mayor fuerza de frenada, por lo tanto para el máximo valor de FD, es decir a máxima velocidad (50m/s, 180km/h), se obtendrá la mayor desaceleración.

7.1.4. CURVA EN ESTADO ESTACIONARIO

En curva se producirán las mayores fuerzas laterales y se producirán una serie de comportamientos a analizar. Durante el movimiento estacionario en curva la motocicleta tener un comportamiento neutro, sub- o sobre-virador. Para mantener el equilibrio el piloto aplica un par en el manillar que puede ser cero, positivo (en la misma dirección que la rotación del manillar) o negativo (en la dirección opuesta a la rotación del manillar). Estas características son importantes y definen la sensación de manejabilidad de la motocicleta.

7.1.4.1. Inclinación de la moto en giro estático

Ángulo ideal de inclinación

La motocicleta en un giro estático se mantiene por la aplicación de dos momentos. El generado por la fuerza centrífuga que tiende a devolver la moto a su posición vertical y el propio peso que trata de inclinar mas la moto.

Consideramos las siguientes hipótesis:

- La motocicleta rueda a velocidad constante en una curva de radio constante (condiciones estado estacionario)
- Los efectos giroscópicos son despreciables.

Considerando el espesor de los neumáticos nulos el equilibrio de momentos nos permite obtener el ángulo de inclinación en términos de velocidad y radio de giro R_c .

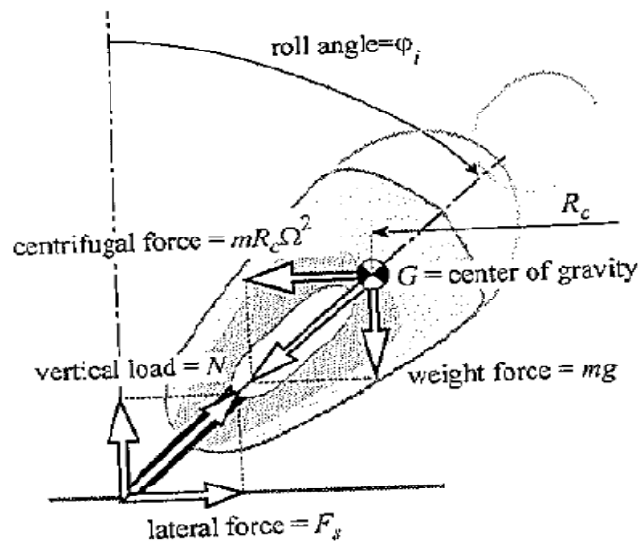


Figura 7.9

$$\text{Fuerza centrífuga} = R_c \cdot m \cdot \Omega^2$$

$$V = \Omega \cdot R_c$$

Ángulo de inclinación

$$\varphi_i = \arctan \frac{R_c \Omega^2}{g} = \arctan \frac{V^2}{g R_c}$$

En realidad este ángulo es una aproximación ya que el espesor del neumático no es nulo. Además si el piloto está aplicando sobre el manillar un momento que hace que se produzca un ángulo de giro el punto de contacto del neumático se desplaza y la línea que une los puntos de contacto no está contenida en el plano x.

Ángulo de inclinación efectivo

Ahora vamos a considerar las mismas suposiciones que en el caso anterior excepto que la anchura de los neumáticos será igual a $2t$. Esto hace que el ángulo de inclinación necesario para equilibrar las fuerzas centrífuga y el peso sea mayor.

$$\varphi = \varphi_i + \Delta\varphi = \arctan \varphi_i + \arcseno\left(\frac{t \cdot \text{seno}\varphi_i}{(h-t)}\right)$$

Esta ecuación nos muestra como un aumento de la anchura de los neumáticos obliga a que el ángulo de inclinación sea mayor para equilibrar las fuerzas. Así como una disminución de la altura del CDG provoca que el ángulo de inclinación necesario también sea mayor.

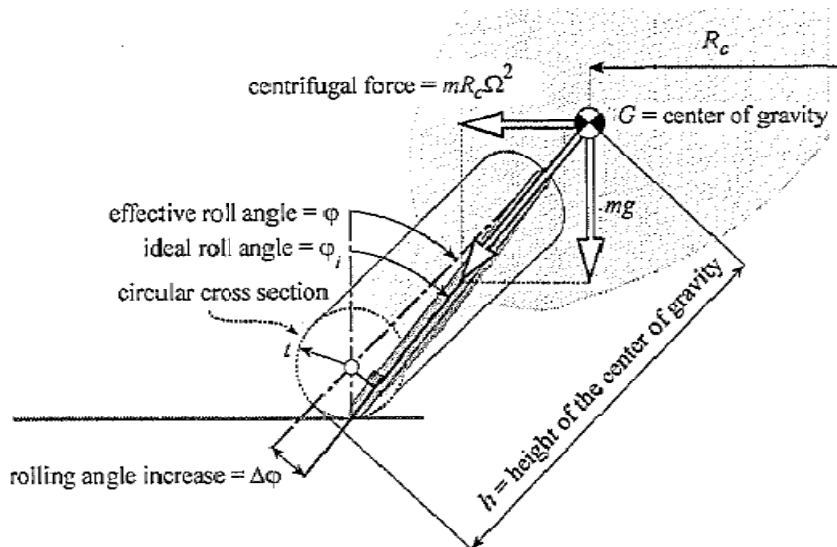


Figura 7.10

Otro factor muy importante en el ángulo de inclinación de la motocicleta es la posición del conductor. La variación de la posición de este hace que el CdG cambie de posición haciendo que el ángulo de inclinación de la moto pueda ser igual, mayor o menor. La posición óptima es aquella en la que el piloto se descuelga de la moto hacia el interior de la curva, desplazando el CDG hacia el interior y haciendo que el ángulo de inclinación sea menor.

Velocidad de las ruedas durante un giro

Considerando que no se produce deslizamiento longitudinal entre el neumático y la carretera la velocidad de cada rueda en función de la velocidad longitudinal será:

$$\omega_r = -\frac{V}{(\rho_r + t_r \cdot \cos \varphi)}$$

$$\omega_f = -\frac{V}{(\rho_f + t_f \cdot \cos \beta) \cdot \cos \Delta}$$

Cabe destacar que durante la frenada o aceleración se produce un deslizamiento entre el neumático y la rueda. Mientras que en condiciones estáticas este deslizamiento es despreciable ya que es debido únicamente a la resistencia a la rodadura.

También es importante observar como la velocidad de los neumáticos en curva es mayor ya que el contacto entre neumático y carretera no se produce en la circunferencia de mayor radio.

A partir de las simulaciones que se realizaron en el circuito de Alcañiz, se han cogido las características aproximadas de una de las curvas donde más sufre la motocicleta. Esta es una curva cerrada en la que la motocicleta pasa bastante rápido con un ángulo de inclinación cerca del máximo.

Según el simulador en este punto de dan uno de los máximos valores de fuerza lateral. Por lo tanto a partir de estas características se hallarán estas mismas fuerzas de manera teórica.

Así tenemos estas condiciones:

Angulo de inclinación ideal	ϕ_i	48° (0,84rad)
Radio de giro	R_c	68m
Velocidad de viraje	Ω	0,4rad/s
Velocidad de avance	V_c	27,2m/s
Fuerza centrífuga	F_c	1849,6N
Angulo efectivo de inclinación	ϕ_e	51° (0,89rad)
Anchura de los neumáticos	$2t_{nf}$	0,095m
Variación de ángulo de inclinación	$\Delta\phi$	0,058rad
Media anchura de los neumáticos	t_{nf}	0,0475m
Velocidad angular en giro rueda	ω_f	-82,56rad/s
Velocidad angular en giro rueda	ω_r	-81,94rad/s
Radio equivalente rueda delantera	ρ_f	0,282m
Radio equivalente rueda trasera	ρ_r	0,296m
Media anchura neumático trasero	t_{nr}	0,0575m

7.1.4.2. Comportamiento direccional de la moto en el giro

Si ahora consideramos una moto realizando un giro en condiciones estáticas y cada una de las ruedas gira en rodadura perfecta el vector velocidad estará contenido en el plano de la rueda.

El deslizamiento lateral se expresa mediante el ángulo de deslizamiento λ , definido como el ángulo que forma el plano de la rueda con la dirección que sigue la moto.

Las fuerzas de reacción laterales dependen del ángulo de deslizamiento, ángulo de inclinación y las fuerzas verticales. Estas fuerzas se pueden expresar mediante la siguiente ecuación lineal cuando los ángulos son pequeños:

$$F_{sf} = (k_{\lambda f} \lambda_f + k_{\phi f} \phi_f) \cdot N_f$$

$$F_{Sr} = (k_{\lambda r} \lambda_r + k_{\phi r} \phi_r) \cdot N_r$$

Donde la constante k (radianes⁻¹) representa el coeficiente de rigidez de los neumáticos. Uno es de deriva y el otro de comba. Cuanto mayor son estos coeficientes menor es el ángulo necesario para lograr la fuerza lateral necesaria. Para nuestro modelo estos son los valores que se tienen:

Rigidez comba delantero	$K\phi_f$	2,132
Rigidez comba trasero	$K\phi_r$	2,08
Angulo deriva delantero	λ_f	-0,056 rad
Angulo deriva trasero	λ_r	-0,052 rad
Rigidez deriva delantero	$K\lambda_f$	18,122
Rigidez deriva trasero	$K\lambda_r$	18,72

Los ángulos de deriva se calculan a partir de las siguientes expresiones:

$$\lambda_f = \frac{1 - k_{\phi f}}{k_{\lambda f}} \cdot \phi$$

$$\lambda_r = \frac{1 - k_{\phi r}}{k_{\lambda r}} \cdot \phi$$

Ángulo de dirección efectivo

El ángulo de dirección efectivo de una moto depende de los ángulos de deslizamiento y su valor viene dado por:

$$\Delta^* = \Delta + \lambda_r - \lambda_f$$

Donde Δ es el ángulo de dirección cinemática aplicado por el piloto que a su vez depende del ángulo de dirección δ , ángulo de inclinación de la pipa de dirección ε y del ángulo de inclinación de la moto ϕ .

Ratio de la dirección

El comportamiento direccional de la moto depende de varios parámetros geométricos, de la distribución de masas así como de las propiedades del neumático.

El ángulo de dirección efectivo Δ^* es solo igual al ángulo de dirección cinemático Δ elegido por el piloto cuando los ángulos de deslizamiento de ambas ruedas son iguales. En este caso se dice que estamos ante un sistema de dirección neutral. Por otro lado si los ángulos de deslizamiento son mayores o menores de lo esperado decimos que la moto tiene un comportamiento subvirador o sobrevirador.

Este comportamiento lo podemos expresar mediante el ratio de dirección: $\xi = \frac{R_{co}}{R_{cr}}$

Si $\xi = 1$ El comportamiento es neutral y $\lambda_r = \lambda_f$

Si $\xi > 1$ El comportamiento es sobrevirador y $\lambda_r > \lambda_f$

Si $\xi < 1$ El comportamiento es subvirador y $\lambda_r < \lambda_f$

Podemos ver cuál es el mejor comportamiento direccional idóneo. Si consideramos una moto con un comportamiento sub-virador mientras está tomando una curva. La moto tiende a salirse de esta por lo tanto es piloto trata de corregir esto aplicando un mayor ángulo de giro sobre la rueda delantera para aumentar la fuerza lateral sobre esta. Si el ángulo aplicado es excesivo puede que se sobrepase el coeficiente de adherencia máximo de la rueda delantera con la consecuencia de que se pierda el control sobre esta y el piloto cae.

Por el contrario con una moto sobreviradora la pérdida de adherencia se produce sobre la rueda trasera de forma que un piloto experto tiene más posibilidades de volver a hacerse con el control.

Ángulo de dirección efectivo y Radio descrito		
Ángulo de dirección	δd	0,0087rad
Ángulo cinemático de dirección	Δ	0,0128rad
Ángulo efectivo de dirección	Δ^*	0,0171rad
Radio de giro por rueda trasera	R_{cr}	72,98m
Ratio de dirección	ξ	1,333624165

Cabe comentar una serie de aspecto de los siguientes valores. Como es lógico en una curva en la que la motocicleta está muy inclinada, como es el caso de 51 grados, el ángulo de dirección es prácticamente nulo. Cuando la moto está recta y no ha entrado en curva todavía

es cuando se tiene el mayor ángulo de dirección, pero una vez que está dentro con la motocicleta inclinada (cuando más sufre) este ángulo es muy pequeño. Se ha escogido el valor que daba el simulador en ese punto, que son 5 grados.

El ratio de la dirección obtenido para nuestro modelo es mayor de 1, por lo que es sobre-viradora. Tendrá entonces un buen comportamiento la motocicleta tal y como se espera y será más fácil de manejarla para el piloto.

7.1.4.3. Fuerzas en curva

La expresión de las cargas verticales en cada neumático en curva cambia respecto al movimiento rectilíneo. Teniendo en cuenta la fuerza aerodinámica se producirá una transferencia de carga debido a la misma y se obtendrán las siguientes expresiones:

$$N_f = mg \cdot \frac{b}{p} - F_D \cdot \frac{h}{p} \cdot \cos(\varphi)$$

$$N_f = mg \cdot \frac{p-b}{p} + F_D \cdot \frac{h}{p} \cdot \cos(\varphi)$$

De todas maneras se despreciarán las fuerzas aerodinámicas debido a que no influyen mucho y se logra simplificar los cálculos. Si se considera una curva con un radio grande con respecto a la batalla de la motocicleta, que lo es 68/1,225, y se desprecia la fuerza aerodinámica las fuerzas laterales en cada neumático vendrán representadas por las siguientes expresiones:

$$N_f = mg \cdot \frac{b}{p}$$

$$N_f = mg \cdot \frac{p-b}{p}$$

Entonces

$$F_{sf} = \frac{N_f \cdot V^2}{g \cdot \cos \Delta \cdot R_{cr}}$$

$$F_{sr} = \frac{N_r \cdot V^2}{g \cdot R_{cr}}$$

Fuerza lateral delantero	FsfL	965,29N
Fuerza lateral trasero	FsrL	758,34N

7.1.5. CONCLUSIÓN

Las fuerzas teóricas máximas que se han calculado se utilizarán en un trabajo posterior para realizar un análisis FEM y realizar el diseño del chasis. Para ello se utilizarán las cargas máximas calculadas. En algunos casos (aceleración y frenada) se obtenían diferentes limitantes, por lo tanto se cogerán los valores del mayor limitante porque será imposible que se supere esos valores. En la siguiente tabla se muestran las cargas máximas que se pueden dar en la motocicleta según la teoría.

VALORES MÁXIMOS		CONDICIONANTE
Carga longitudinal delantera	-1411N	Frenada antes de volcar
Carga vertical delantera	1667N	Frenada antes de volcar
Carga lateral delantera	965N	Curva rápida
Carga longitudinal trasera	1020N	Aceleración por motor
Carga vertical trasera	1264N	Aceleración por motor
Carga lateral trasera	758N	Curva rápida

7.2. CARGAS DINÁMICAS OBTENIDAS MEDIANTE XOPTIMA

El software del método de maniobra óptima, además de utilizar para optimizar el layout del vehículo, ofrece una serie de parámetros de output de gran interés. Entre estos datos de output se encuentran las cargas dinámicas que resultan en los neumáticos a lo largo del circuito de Alcañiz en la vuelta rápida con los parámetros ya optimizados.

En el gráfico de fuerza longitudinal se puede observar como en la rueda delantera esa fuerza nunca será positiva ya que con la rueda delantera no se acelera si no que se frena. Se aprecia como existen unos picos de fuerza longitudinal en la rueda delantera que representan

momentos de fuerte frenada en la entrada de curvas. En la rueda trasera sin embargo el valor es casi siempre positivo (de aceleración) aunque suele haber unos valores pequeños negativos debidos a que en la frenada también se utiliza el freno trasero para mejora la frenada. Los picos de fuerza en la rueda trasera son debidos a aceleraciones fuertes en salidas de curva y comienzos de recta.

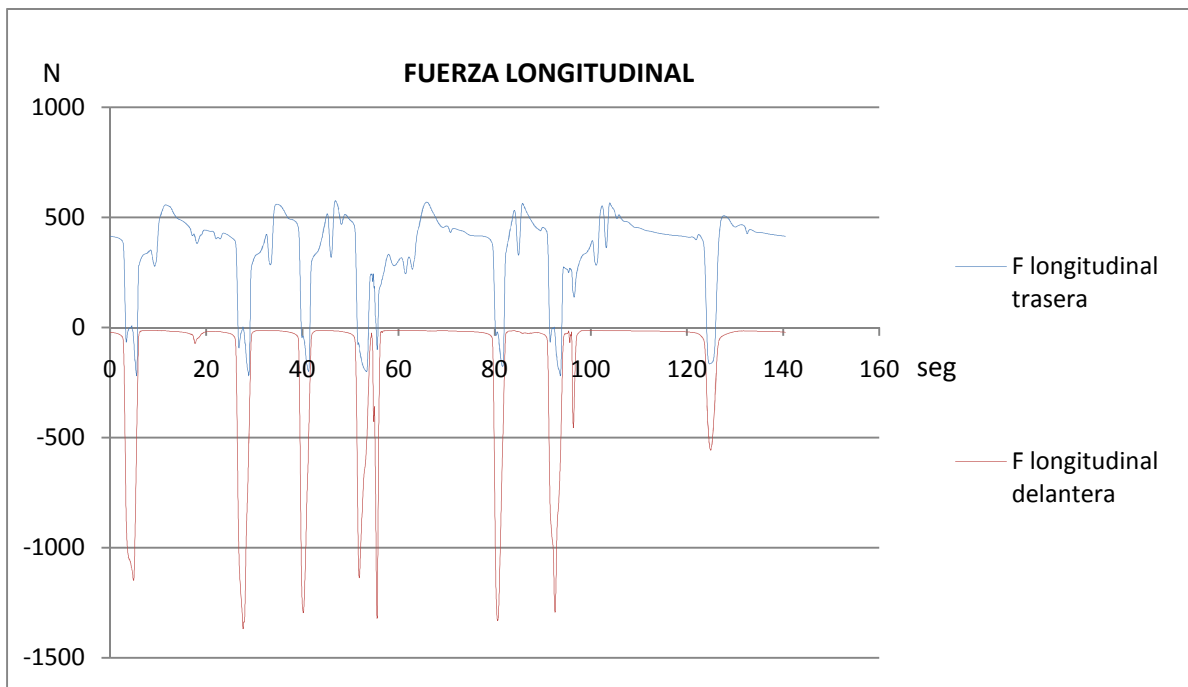


Figura 7.11

En el gráfico de las fuerzas verticales los valores son siempre positivos, ya que un valor negativo sería imposible, debidas a la fuerza normal que realiza el suelo. Los valores máximos de carga vertical en la rueda trasera son debidos a la transferencia de carga en momentos de aceleración. Mientras que en la rueda trasera ocurre en momentos de frenada debido a la transferencia de carga también. Es lógico ver como cuando existe un máximo de carga vertical delantera corresponde a un mínimo de carga vertical trasera y viceversa. Aunque la suma de las dos cargas verticales en algunos casos supera los del peso propio de la moto ya que son cargas dinámicas y entran en juego los efectos de la suspensión.

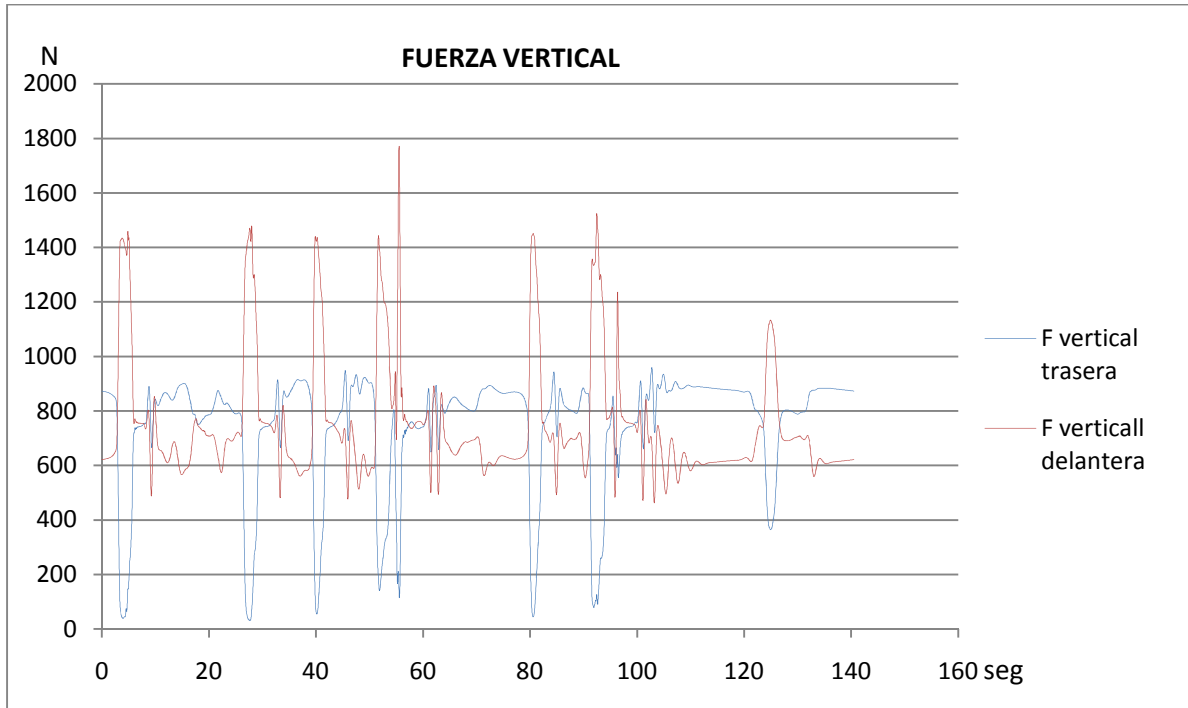


Figura 7.12

En cuanto a las fuerzas laterales son tanto positivas como negativas por igual ya que tan solo depende de la dirección de la curva. En algún momento los valores de las fuerzas en ambas ruedas son prácticamente cero que corresponde a rectas. Otro aspecto característico es que la fuerza lateral delantera alcanza valores mayores que los de la rueda trasera, esto es debido al ángulo de la dirección que ocurre en la rueda delantera, que es la responsable de causar mayores fuerzas. Los picos de estas fuerzas ocurren en la entrada de las curvas.

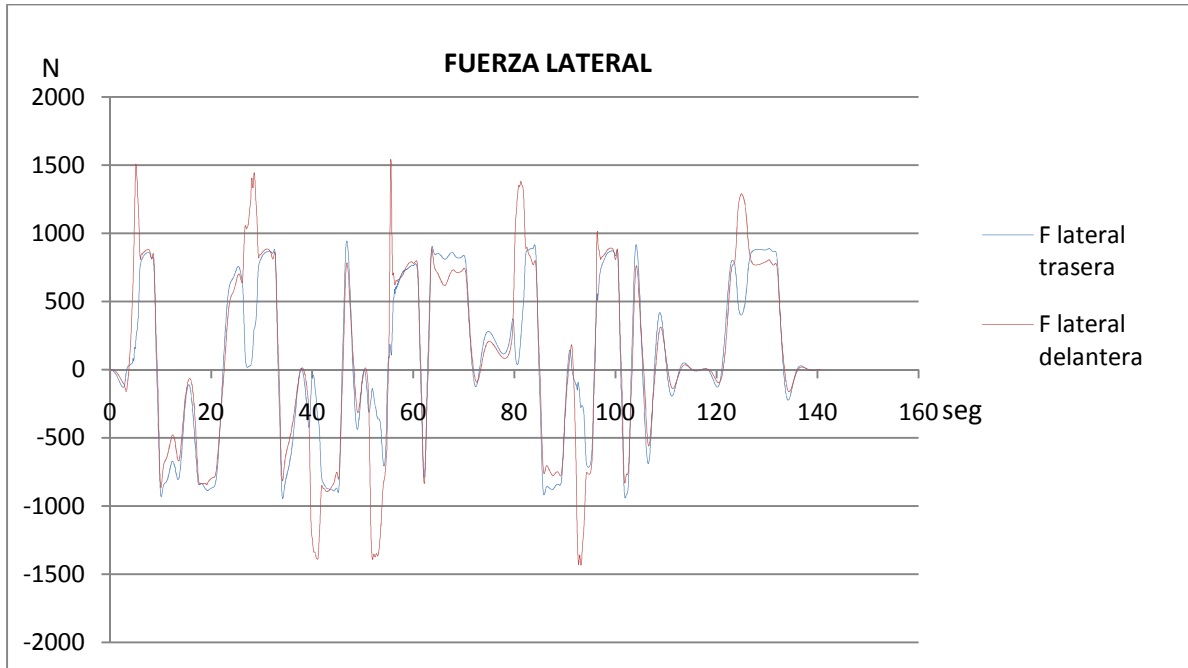


Figura 7.13

Otros datos de salida que proporciona el programa utilizado son el ángulo de inclinación y el ángulo de la dirección.

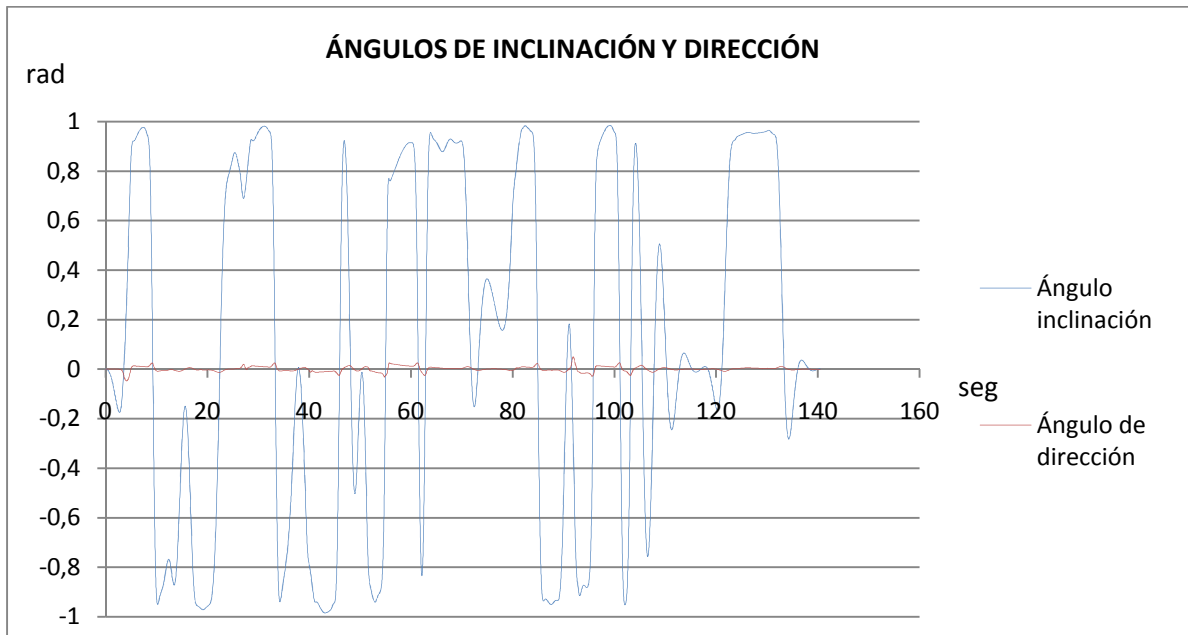


Figura 7.14

Comparando las fuerza laterales con los ángulos se concluye que:

- Cuanto mayor es el ángulo de inclinación aumentan las fuerzas laterales tanto en la rueda delantera como la trasera, son tramos de paso por curva lógicamente.
- Cuanto más aumenta en ángulo de la dirección, mayor es la fuerza lateral en la rueda delantera.
- Es curioso ver como el ángulo máximo de dirección es muy pequeño, las curvas se toman básicamente inclinando la curva

También se puede obtener el gráfico de aceleraciones de nuestro modelo en el circuito de Alcañiz para los valores óptimos.

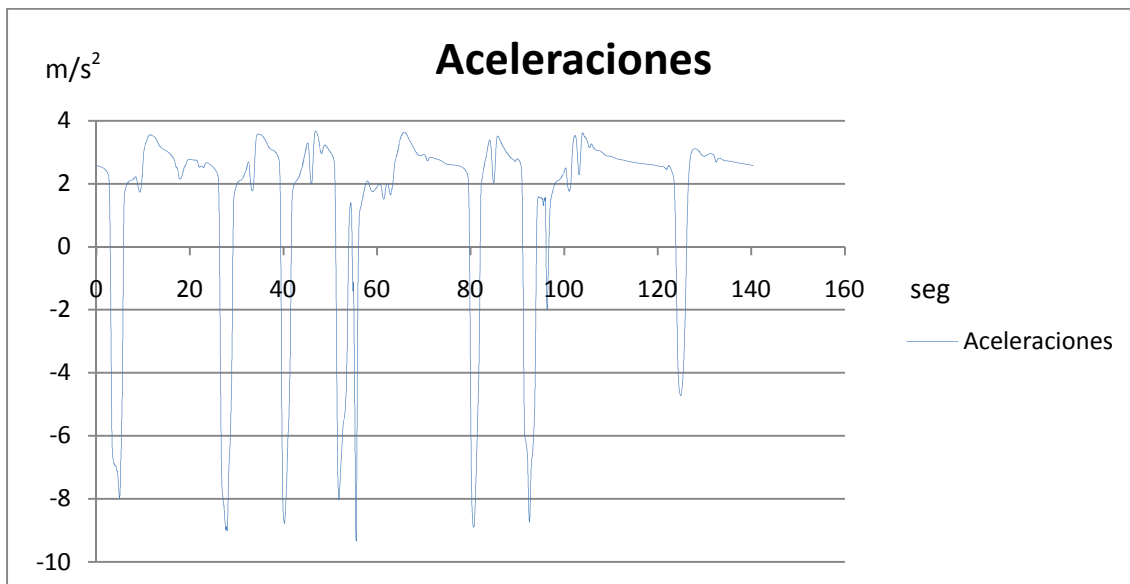


Figura 7.15

Siendo el máximo valor positivo de aceleración sería el limitado por el motor y el mínimo negativo limitado por el vuelco inminente. En la siguiente tabla aparecen los valores máximos obtenidos mediante el método de maniobra óptima.

VALORES MÁXIMOS	
Ángulo inclinación	0,98rad (56°)
Ángulo dirección	0,05 (3°)
Aceleración	3,67m/s ²
Desaceleración	-9,31m/s ²
Fuerza longitudinal delantera	-1368,8N
Fuerza lateral delantera	1541,08N
Fuerza vertical delantera	1769,62N
Fuerza longitudinal trasera	575,21N
Fuerza lateral trasera	942,61N
Fuerza vertical trasera	959,45N

7.3. COMPARACIÓN

En la siguiente tabla aparecen los valores máximos obtenidos teóricamente y mediante el software de maniobra óptima. Como se puede apreciar, existen unas pequeñas diferencias:

VALORES	TEÓRICAS	SIMULADOR
Carga longitudinal delantera	-1411N	-1368,8N
Carga vertical delantera	1667N	1769,62N
Carga lateral delantera	965N	1541,08N (200N trasera)
Carga longitudinal trasera	1020N	575,21N
Carga vertical trasera	1264N	959,45N
Carga lateral trasera	758N	942,61N (811N delantera)
Aceleración	5,36m/s ²	3,67m/s ²
Desaceleración	-10,18m/s ²	-9,31m/s ²

Básicamente se trata de que los valores máximos simulados no superen los máximos teóricos. En el estudio teórico se han supuesto condiciones extremas donde se pueden dar las cargas máximas. Es decir que según la teoría no se puede obtener valores mayores por limitaciones físicas del modelo, aunque como se puede ver en la tabla no ocurre exactamente eso.

- La carga longitudinal del simulador no supera la teórica, esto es razonable porque superaría la frenada antes de la volcada inminente y eso no puede ocurrir.
- La carga vertical delantera es un poco mayor que la calculada en teoría, 100N más. Debido a que no existe mucha diferencia no le daremos mayor importancia. Cabe destacar que las cargas dinámicas alcanzan valores mayores que las estáticas, ahí puede estar la razón de la diferencia existente.
- Donde mayor diferencia existe es en las fuerzas laterales. Cuando se realizó el cálculo teórico para la curva, se pusieron las condiciones de una curva exigente cogida del circuito. Pero el valor calculado no se puede comparar al obtenido en el simulador, ya que el radio de la curva (medido en el cálculo teórico) no es el mismo que el trazado por el piloto (utilizado por el simulador). Aunque la fuerza lateral total (delantero más trasero) es similar en ambos casos, si que ocurre que la componente delantera es mayor en el simulador que en la teoría. Debido a la dificultad de introducir una curva con las condiciones más exigentes no se puede obtener una fuerza lateral teórica comparable con la del simulador.
- La carga longitudinal trasera simulada no supera la teórica. Aunque es curioso que la simulada tiene un valor casi de la mitad de la teórica. En el cálculo teórico esa fuerza de aceleración se obtuvo en un determinado régimen de funcionamiento del motor (en primera y a 18m/s), y puede ocurrir que en los momentos de aceleración en el circuito no se encuentre nuestro modelo en esas condiciones. De hecho la aceleración máxima obtenida por el simulador es también casi la mitad de la teórica.
- La carga vertical trasera simulada también es menor que la teórica. Esto es lógico si se piensa que esta carga vertical máxima se obtiene en aceleración máxima por la transferencia de cargas. Por lo tanto siendo la aceleración de avance menor en el simulador, la carga vertical trasera también lo será.
- Así como la aceleración es menor en el simulador la desaceleración también es menor como era de esperar.

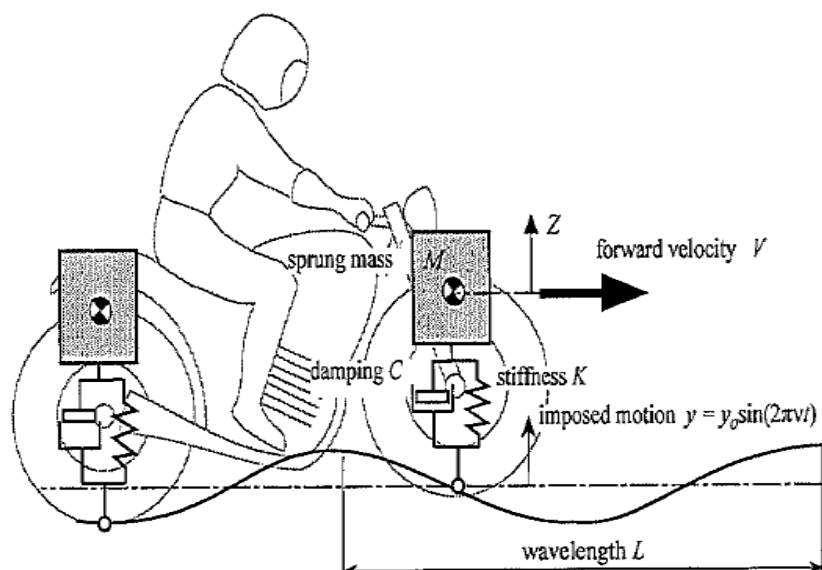
7.4. CARGAS DEBIDAS A LAS IRREGULARIDADES DEL SUELO

Tanto en los cálculos teóricos como en las simulaciones del XOptima se ha considerado siempre el suelo plano, pero esto en la realidad nunca es así. En los circuitos de velocidad es raro que existan muchas irregularidades en el asfalto pero sí que puede haber algún rizado o algún badén en el suelo. Cuando la motocicleta pase por un tramo de este tipo sufrirá unas cargas dinámicas verticales mayores, debidas a las irregularidades del suelo. Por lo tanto es conveniente calcular estas cargas verticales que no se han considerado antes. Puede ocurrir que un momento de máximo esfuerzo en la motocicleta (aceleración, frenada o curva) exista una irregularidad en el suelo y haya valores máximos de carga vertical. El chasis deberá aguantar bien este tipo de cargas máximas. Por lo que se estudiará este tipo de cargas para que el chasis que se vaya a construir las aguante satisfactoriamente. Para ello se ha escogido el modelo de mono-suspensión de un grado de libertad.

7.4.1. MONO-SUSPENSIÓN CON UN GRADO DE LIBERTAD

7.4.1.1. Movimiento Oscilatorio impuesto por las irregularidades de la carretera

Se considera la motocicleta corriendo por un perfil de carretera sinusoidal a una velocidad constante V y se supone que la motocicleta se puede representar mediante dos mono-suspensiones separadas. También se supone que las masas no suspendidas son despreciables. El modelo de mono suspensión con un grado de libertad puede representar tanto la suspensión delantera como la trasera.



Se contempla una suspensión afectada por el movimiento causado debido a las irregularidades del suelo. El punto de contacto de la rueda con el perfil de la carretera se mueve en movimiento armónico de acuerdo a esta ley:

$$y = y_0 \cdot \text{seno}(2 \cdot \pi \cdot v \cdot t)$$

$v=V/L$ representa la frecuencia del movimiento impuesta en el sistema por las irregularidades del terreno.

Se puede demostrar fácilmente que en estado estacionario (respuesta periódica) el ratio de amplitudes entre Z_o (del movimiento vertical de la masa suspendida) e Y_o (impuesta por el movimiento) es:

$$T = \frac{Z_o}{Y_o} = \sqrt{\frac{1 + (2 \cdot \xi \cdot \frac{v}{v_n})^2}{(1 - (\frac{v}{v_n})^2)^2 + (2 \cdot \xi \cdot \frac{v}{v_n})^2}}$$

v_n representa la frecuencia de la mono-suspensión. El ratio T se llama transmisibilidad. A continuación se ven varias curvas de transmisibilidad según el movimiento armónico para el ratio de amortiguamiento que se tiene:

$$\xi = \frac{C}{2 \cdot \sqrt{K \cdot M}}$$

Ratio amortiguamiento	ζ	0,50
Coef amortiguacion	C	995,5
Rigidez muelle	K	16163,34
Masa	M	60,5
Frecuencia natural	v_n	2,60

$$v_n = \frac{1}{2 \cdot \pi} \sqrt{\frac{K}{M}}$$

Los valores de la suspensión son valores medios cogido de la suspensión delantera y la trasera. La masa es la mitad de la masa suspendida (121 kg).

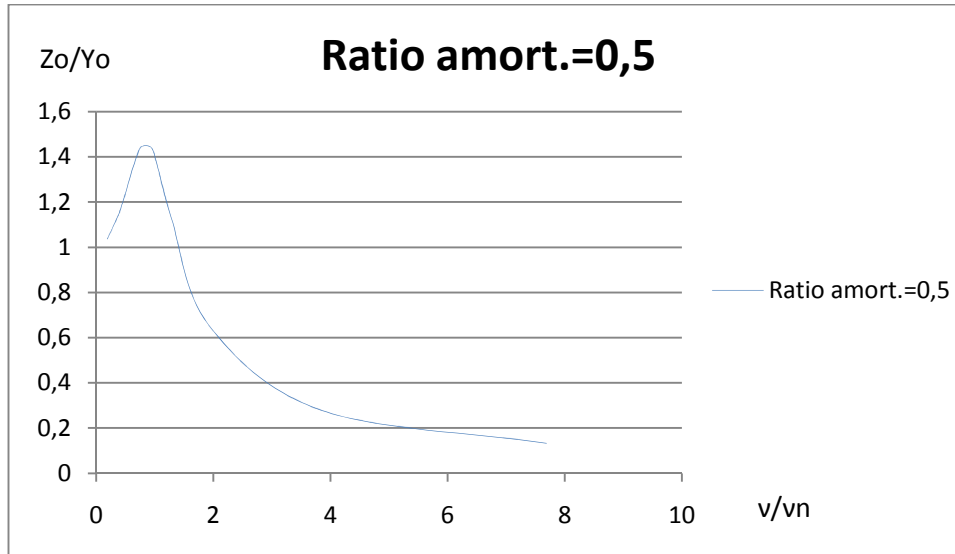


Figura 7.17

En el gráfico se puede ver claramente que la transmisibilidad, para el valor de amortiguamiento que se obtiene, es igual a 1 cuando el valor del ratio de frecuencia es $\sqrt{2}$. Este valor aparece cuando se satisface la relación:

$$V = L \cdot v_n \sqrt{2}$$

Para distintas longitudes de onda se han sacado las diferentes velocidades necesarias para que la transmisibilidad de desplazamiento sea igual a 1.

	m		m/s
L0	0,5	V0	1,83947129
L1	1	V1	3,67894259
L2	2	V2	7,35788518
L3	3	V3	11,0368278
L4	4	V4	14,7157704
L5	5	V5	18,3947129
L6	6	V6	22,0736555
L7	7	V7	25,7525981
L8	8	V8	29,4315407
L9	9	V9	33,1104833
L10	10	V10	36,7894259

Conclusión

Se concluye que para valores de ratio de frecuencia menor de $\sqrt{2}$, la introducción de la suspensión amplifica la oscilación hasta $(T>1)$ hasta un valor de 1,44. Por lo tanto la aplicación de la suspensión es beneficioso $(T<1)$ para valores del ratio de frecuencia mayores que $\sqrt{2}$.

Valores altos de amortiguamiento atenúan el incremento de la transmisibilidad para los ratios de frecuencia menores de $\sqrt{2}$, pero empeoran la respuesta del sistema a velocidades altas.

7.4.1.2. Confort de pilotaje

Para el estudio de confort de pilotaje, el gráfico de la aceleración vertical de la motocicleta es más interesante. El piloto percibe la sensación de confort, que está relacionado con las aceleraciones a las que su cuerpo está sometido.

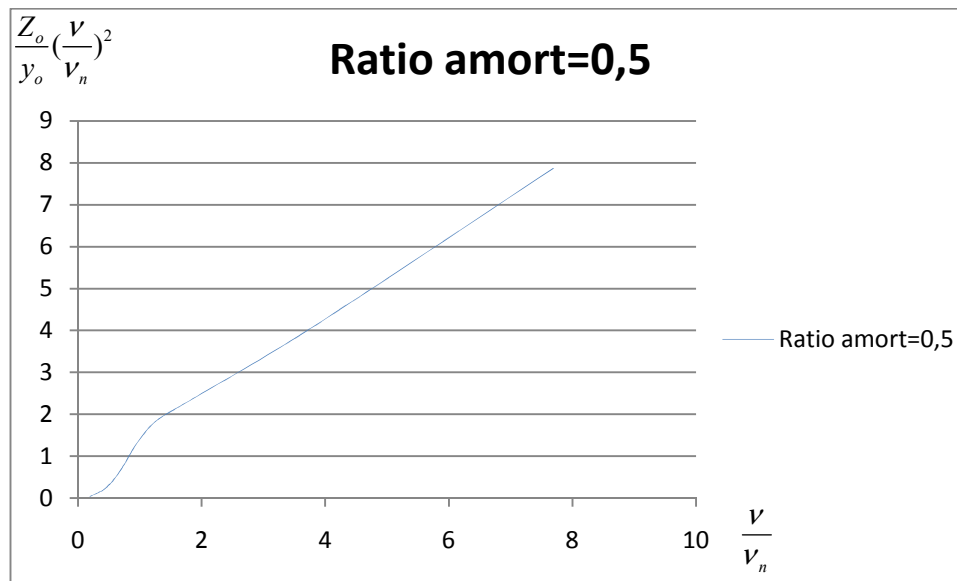


Figura 7.18

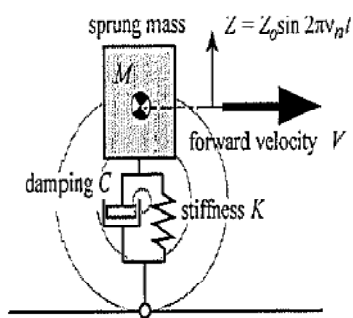
Conclusión

Para cualquier amortiguamiento, la curva alcanza el valor 2, cuando el ratio de frecuencia es igual a $\sqrt{2}$. Según el ratio de amortiguamiento la pendiente de la curva será diferente. En ese punto la pendiente es nula para un amortiguamiento de 0,354. La curva caracterizada por esta pendiente será la que proporcione la mínima aceleración en este punto. Pero con el ratio de amortiguamiento de nuestro modelo consigue que la transmisibilidad de la aceleración no se dispare antes del valor de $\sqrt{2}$. A partir de este valor la transmisibilidad sigue aumentando pero de una manera moderada. Con este tipo de suspensiones se busca más que

confort en el piloto (que unos mínimos tendrá que tener para que la motocicleta pueda ser controlada), un buen comportamiento en la carretera y que no se ponga en compromiso las características físicas de la motocicleta.

En resumen se ve que la suspensión es un filtro que corta las frecuencias altas pero es inevitable que amplifique las frecuencias de banda estrecha próximas a las frecuencias de resonancia.

7.4.1.3. Aceleración vertical



La evaluación del confort de pilotaje está asociado a los picos de máxima aceleración vertical de la masa suspendida. El mejor confort ocurre cuando el pico de aceleración es mínimo. Los siguientes gráficos muestran el curso de la aceleración vertical de la masa suspendida para un ratio de amortiguamiento de 0,5 y varios movimientos armónicos. Tal y como se ha explicado previamente el punto de contacto de la rueda con el perfil de la carretera se mueve en movimiento armónico.

Las oscilaciones de la masa debido al muelle y al amortiguador seguirán la siguiente ley:

$$Z(t) = Z_0 \cdot e^{-\xi(2\pi v_n)t} \cdot \text{seno}(q_n \cdot t)$$

Donde q_n es la frecuencia natural del amortiguador es 2,25.

$$q_n = v_n \cdot \sqrt{1 - \xi^2}$$

Aunque en un circuito de velocidad las irregularidades que puedan existir serán mínimas, puede darse algún rizado o badén. Un rizado en la carretera puede representarse como un perfil del suelo que sigue una onda sinusoidal de pequeña amplitud (0,05m) y pequeña longitud de onda (frecuencias altas). Mientras que un badén puede representarse igual que el rizado pero con una amplitud mayor (0,1m) y una longitud de onda mayor también. Se han escogido amplitudes que pueden existir en los circuitos de hoy en día, es impensable que existan amplitudes mayores.

Tal y como se verá las aceleraciones verticales serán máximas en el instante inicial de la irregularidad, en tan solo décimas de segundo esa aceleración se atenúa hasta casi anularla gracias a la suspensión. Las aceleraciones serán las siguientes para diferentes amplitudes del perfil del suelo:

$$\ddot{Z}(t) = Z_0 \cdot \xi(2\pi v_n)^2 \cdot e^{-\xi(2\pi v_n)t} \cdot \text{seno}(q_n t) - 2Z_0 \cdot \xi(2\pi v_n) \cdot e^{-\xi(2\pi v_n)t} \cdot q_n \cdot \cos(q_n t) - Z_0 \cdot q_n^2 \cdot e^{-\xi(2\pi v_n)t} \cdot \text{seno}(q_n t)$$

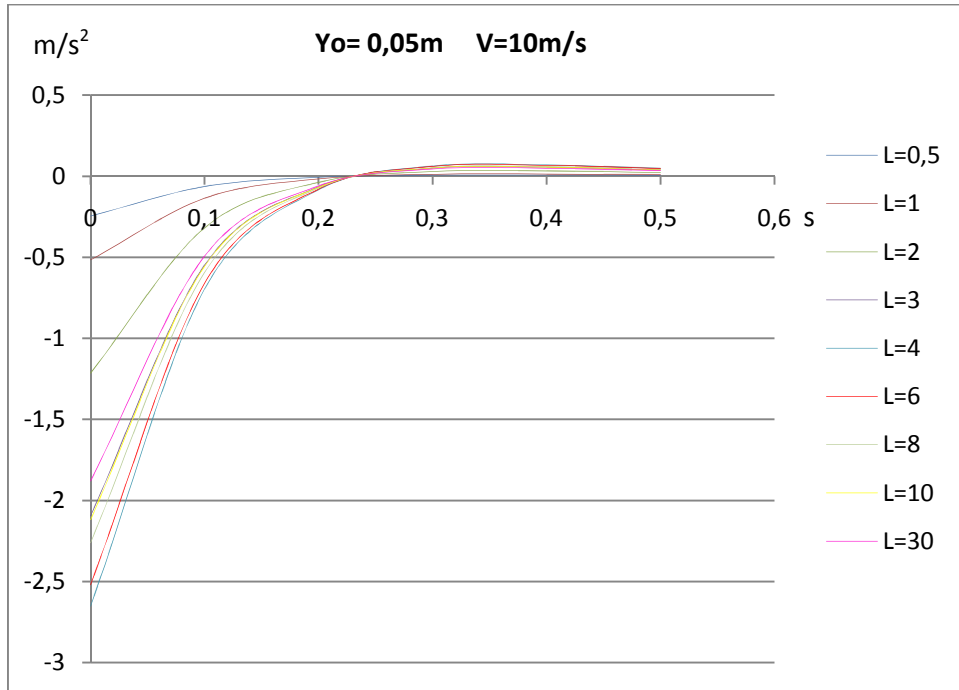


Figura 7.20

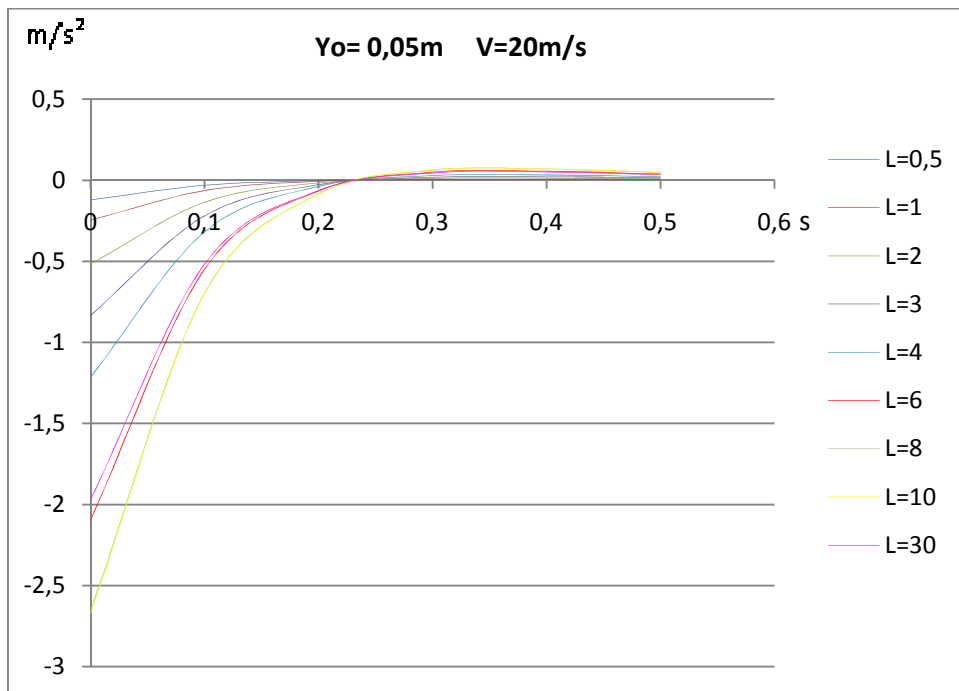


Figura 7.21

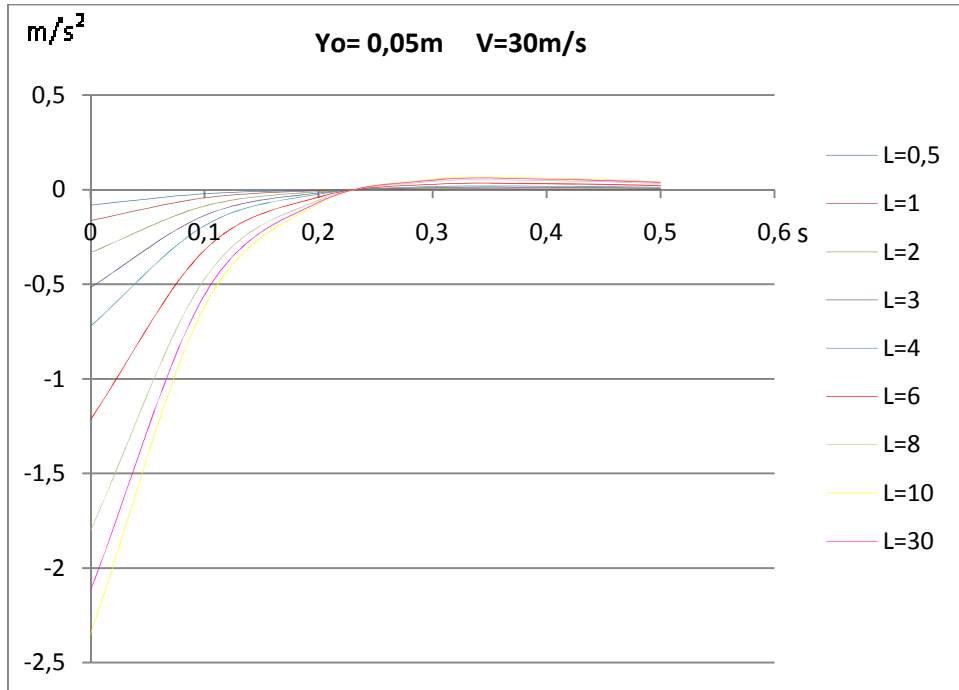


Figura 7.22

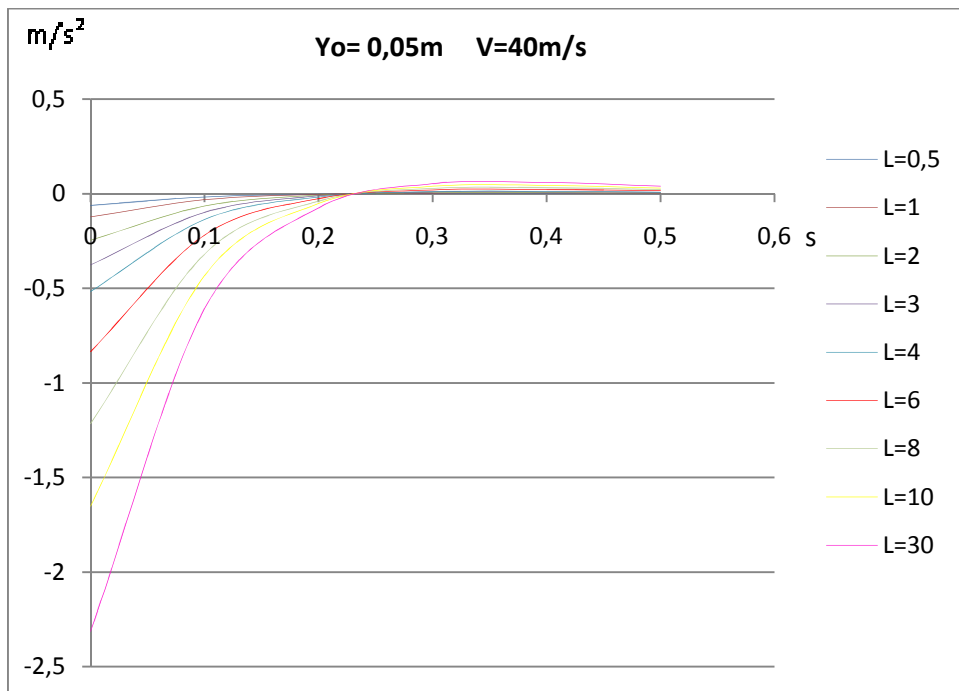


Figura 7.23

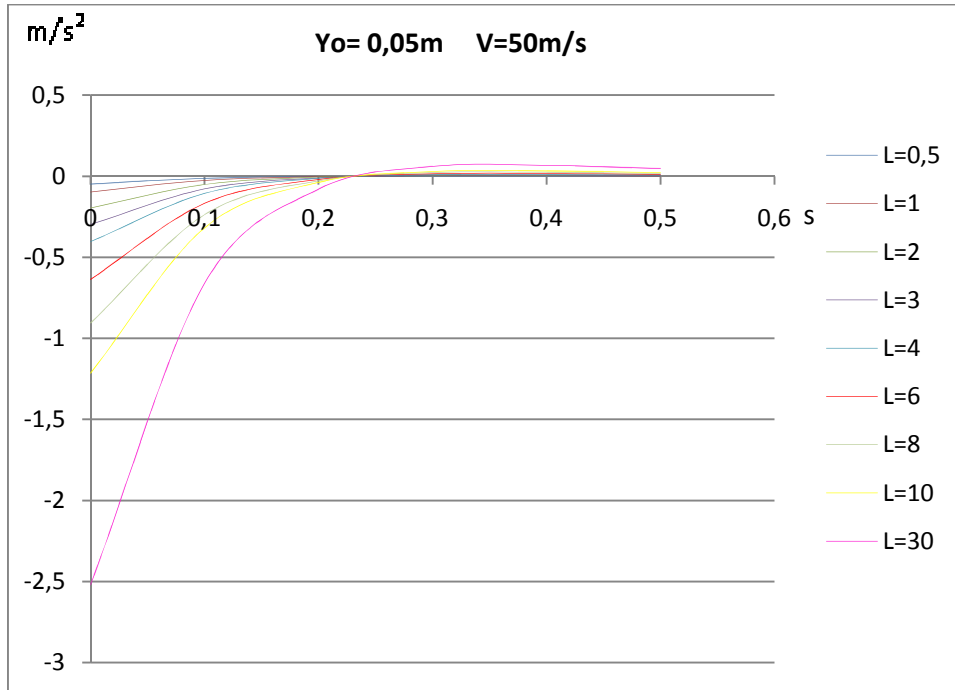


Figura 7.24

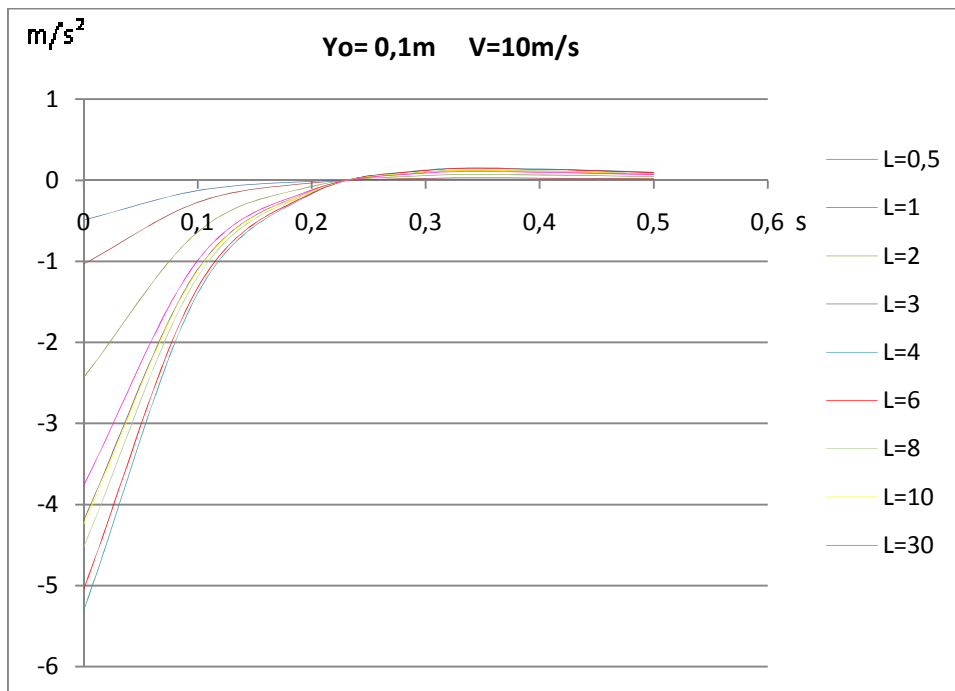


Figura 7.25

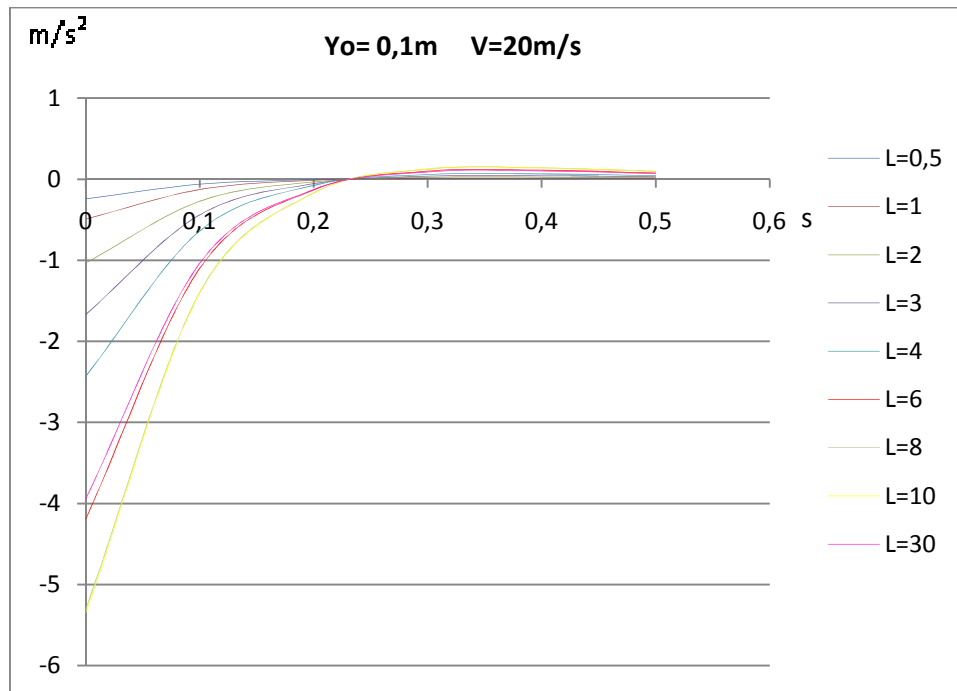


Figura 7.26

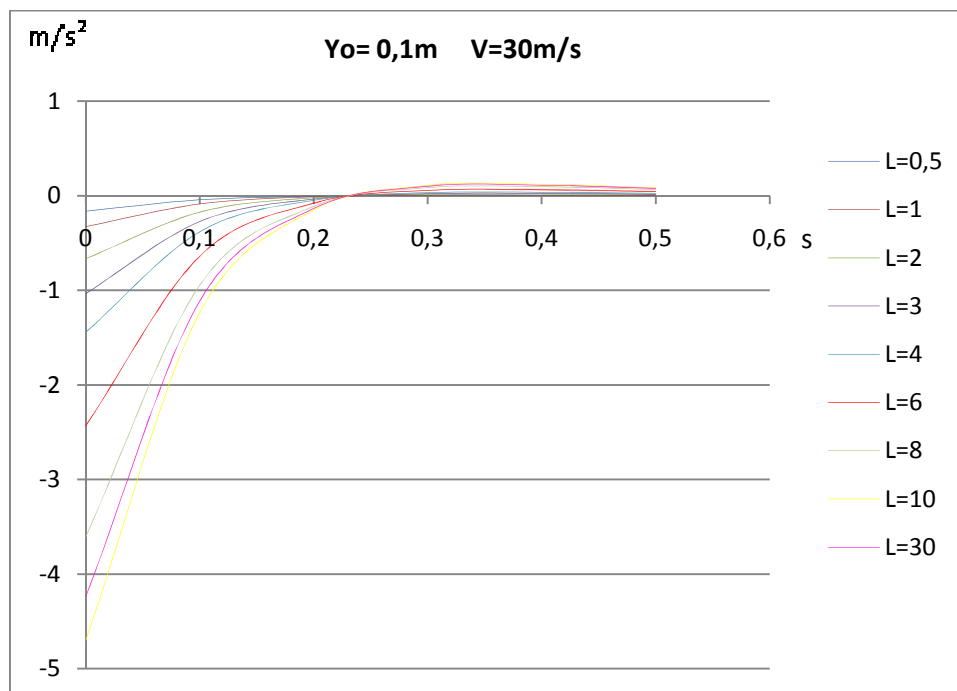


Figura 7.27

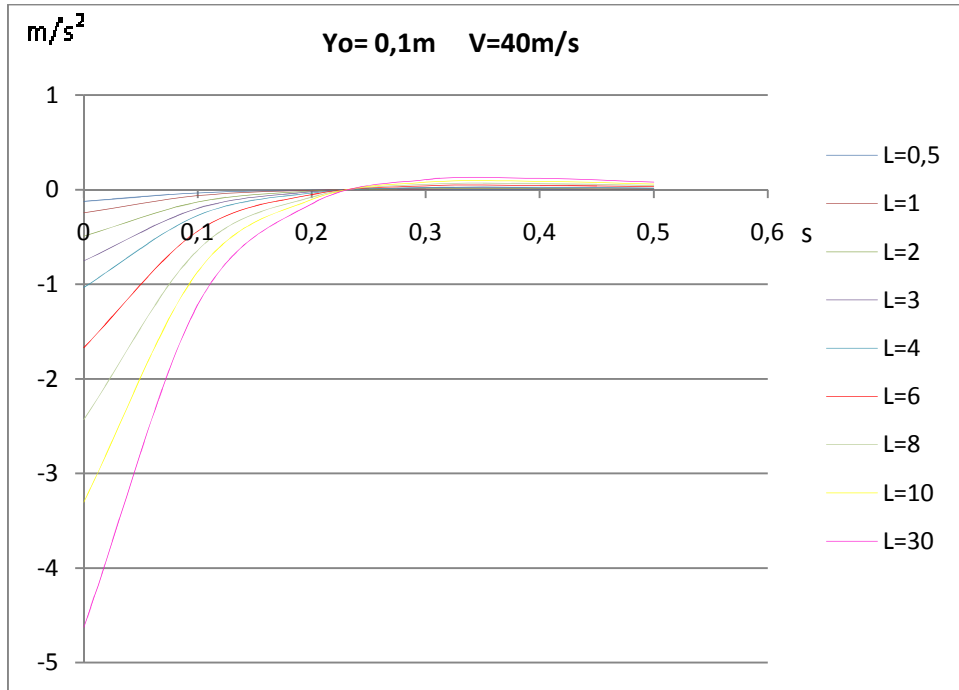


Figura 7.28

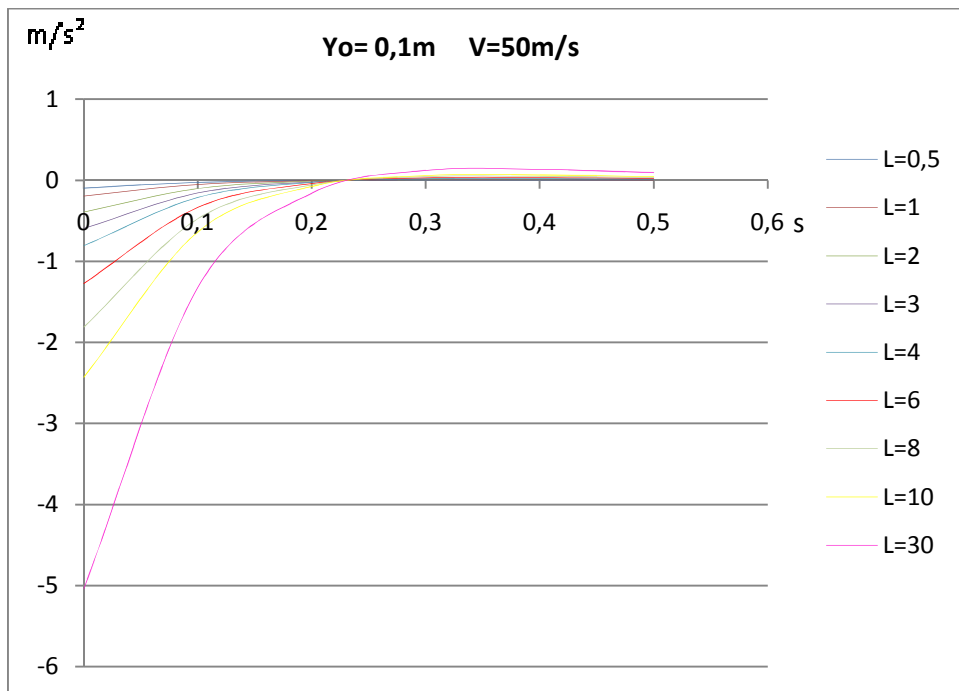


Figura 7.29

Conclusión

Tal y como se ha comentado antes, las mayores aceleraciones se tiene a frecuencias bajas, es decir en el rango en el que la suspensión no beneficia a la motocicleta que corresponde con las frecuencias de resonancia de la suspensión. Por lo tanto a velocidad baja (10m/s) las mayores aceleraciones se obtienen para una longitud de onda de cuatro metros. Mientras esa velocidad aumenta la longitud de onda a la que se da la mayor aceleración también aumenta. Así se obtiene que para la máxima velocidad (50m/s), la mayor aceleración vertical se obtiene para la mayor longitud de onda (30m).

Observando un poco las gráficas se ve como una de las mayores aceleraciones vertical que sufre el modelo es en un badén a máxima velocidad (50m/s). Es el caso de una longitud de onda de 30 metros y una amplitud de 0,1m. Otro caso donde sufre máxima aceleración vertical es para un rizado a baja velocidad (10m/s), con longitud de onda de 4 metros. La aceleración de la masa suspendida correspondiente a la suspensión (60,5kg) puede llegar hasta los $5,5\text{m/s}^2$. Con esto se obtendría la siguiente fuerza:

$$F = m \cdot a = 60,5 \cdot 5,5 = 332,75\text{N}$$

Esto sería para un centro de gravedad centrado respecto la batalla. En el caso de la motocicleta a diseñar el centro de gravedad está más adelantado. Por lo tanto la masa suspendida delantera puede llegar a ser de hasta 70kg.

$$F = m \cdot a = 70 \cdot 5,5 = 385\text{N}$$

Por lo tanto a los valores máximos de cargas verticales calculados anteriormente, habría que sumarle **385N** más.

Caso extremo

Se va estudiar un hipotético caso con un badén extremadamente marcado. Este badén será de una amplitud de un metro y una longitud de onda de 100 metros. Es imposible que exista un badén de este tipo en cualquier circuito de velocidad ya que estos están diseñados para tener las menos irregularidades posibles. Por lo tanto las cargas verticales dinámicas que se obtengan de este caso no se utilizarán para dimensionar el chasis mediante el método de elementos finitos. Sería un error utilizar esta carga para el diseño ya que el chasis se encontraría sobredimensionado para las condiciones en las que se va a emplear. De todas maneras se estudiará el caso para ver que magnitud pueden llegar alcanzar las cargas dinámicas.

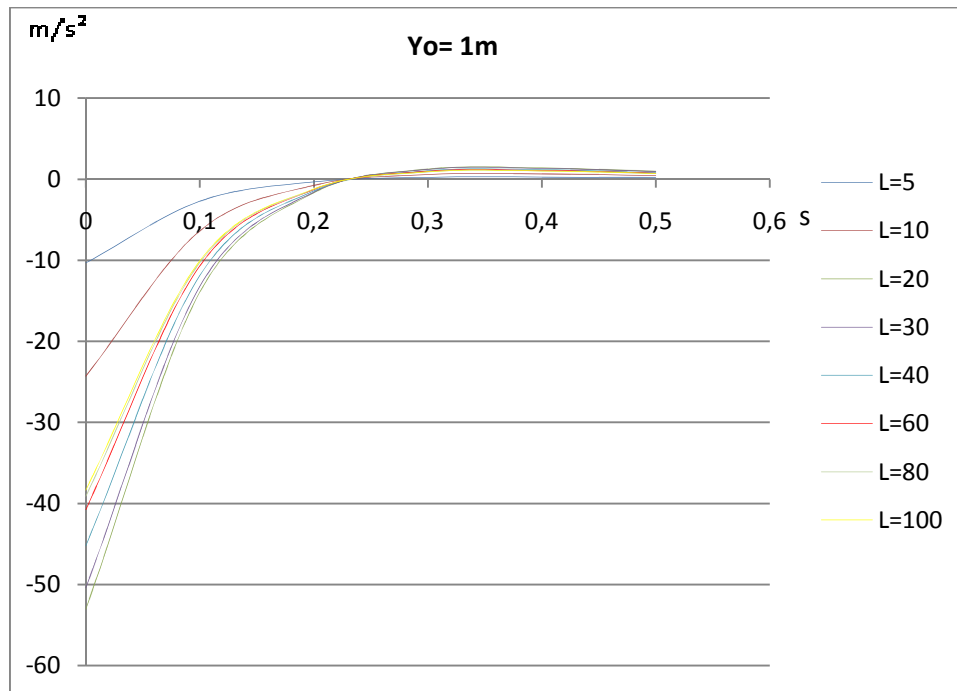


Figura 7.30

Tal y como se ve en el gráfico, para una badén de una amplitud de un metro y a velocidad máxima 50m/s, la mayor aceleración vertical se obtiene para una longitud de badén de 20 metros. Para este caso extremo se alcanzan hasta aceleraciones de 53m/s². Son aceleraciones de más de 5gs. Con una masa suspendida de 70 kg la fuerza dinámica vertical alcanzaría un valor de:

$$F = m \cdot a = 70 \cdot 53 = 3710N$$

Es una carga de más del doble de la que se ha calculado teóricamente. Esto demuestra la diferencia existente entre el comportamiento estático y dinámico. Las cargas dinámicas siempre pueden alcanzar valores mayores debido a que comprende el efecto de la suspensión pero hay que estudiar estas cargas dinámicas con criterio, teniendo claro en qué circunstancias suceden y realmente qué importancia tienen. En este caso hipotético no se tendrá en cuenta la carga dinámica hallada para el diseño del chasis debido a que es una situación irreal y no interesa sobredimensionar la estructura del bastidor.

7.5. CARGAS FINALES PARA UTILIZAR EN EL ANÁLISIS FEM

Por último en lo que a las cargas finales respecta. Se describirán las cargas finales para diferentes casos. Cada caso de estos se ensayará con un software FEM para realizar el diseño del chasis. En cada uno de los casos tendrá que aparecer las seis fuerzas correspondientes a las dos ruedas y por supuesto que estos casos tienen que representar situaciones límites de la motocicleta sobre el terreno.

Se cogerán los casos más limitantes para evitar que las cargas estén excesivamente sobredimensionadas, porque se obtendría un chasis que aguantaría grandes esfuerzos pero sería demasiado pesado. Se trata de proporcionar las cargas necesarias para realizar un diseño de acuerdo a los esfuerzos que vaya a sufrir la máquina. Es decir, hay que conseguir que el chasis a diseñar aguante bien los posibles esfuerzos que vaya a sufrir pero a la vez que sea lo más ligero posible. Para conseguir este compromiso, a continuación aparecen las cargas a utilizar en los diferentes casos.

Una irregularidad en la carretera puede darse en cualquier momento de la carrera. Se elegirán los peores casos, es decir, aceleración, frenada y paso por curva máximo y se le añadirá a cada fuerza normal una carga de **385N**. Tal y como se ha explicado antes esta fuerza es debido a la aceleración vertical que gana la masa suspendida debido a la irregularidad del suelo (ya puede ser rizado o badén). Esta carga dinámica adicional habría que aplicarse al resto de los tres casos anteriores, que sería las situaciones más extremas en las que se puede encontrar el vehículo.

Se utilizará un coeficiente de mayoración de 1,5 para asegurar el buen funcionamiento de los diferentes elementos a diseñar.

CASO1. ACELERACIÓN MÁXIMA

La aceleración más limitante es la debida al motor, por lo que se cogerán los valores que corresponden. En este caso se consideró movimiento rectilíneo, así las fuerzas laterales son nulas. Por lo que los valores de las fuerzas en cada rueda son:

CASO 1	CALCULADA	MAYORADA ($c_m=1,5$)
F longitudinal trasera	1020N	1530N
F longitudinal delantera	0N	0N
F vertical trasera	1264N + 385N	2474N
F vertical delantera	403N +385N	1182N
F lateral trasera	0N	0N
F lateral delantera	0N	0N

CASO2. FRENADA MÁXIMA

La frenada más limitante es la debida al vuelco inminente (carga vertical trasera nula). Al igual que en la aceleración se consideró movimiento rectilíneo por lo que no existirán cargas laterales. También se asumió que solo se frenaba con la rueda delantera ya que es una frenada más exigente y las cargas que aparecerán serán mayores. Así pues la fuerza longitudinal trasera será nula.

CASO 2	CALCULADA	MAYORADA ($c_m=1,5$)
F longitudinal trasera	0N	0N
F longitudinal delantera	1411,13N	2116,7N
F vertical trasera	0N + 385N	578N
F vertical delantera	1667N + 385N	3078N
F lateral trasera	0N	0N
F lateral delantera	0N	0N

CASO3. PASO POR CURVA

Para el caso de paso por curva se cogerán las cargas obtenidas mediante el simulador que son mayores que las teóricas. Esto es debido a que en la simulación el paso por curva lo hace en aceleración o frenada y no a velocidad constante tal y como se asume en la teoría. Para este caso se cogerán las cargas que más harán sufrir a la parte delantera del chasis, es una situación más exigente para la motocicleta ya que la parte trasera del chasis (debido al motor, jaula, basculante, etc.) es más rígida y aguantará más que la delantera.

CASO 3 ($\theta=0,76\text{rad}$)	CALCULADA	MAYORADA ($c_m=1,5$)
F longitudinal trasera	-100,4N	-150,6N
F longitudinal delantera	-1318,5N	-1977,75N
F vertical trasera	114,8N +385N	750N
F vertical delantera	1769,62N + 385N	3232N
F lateral trasera	130N	195N
F lateral delantera	1541,1N	2311,65N

8. BIBLIOGRAFÍA

Lista de los libros de consulta, catálogos, documentos, artículos y página web, que han sido usados para la realización del PFC:

- MOTOCICLETAS, COMPORTAMIENTO DINÁMICO Y DISEÑO DE CHASIS. Tony Foale. Ed Tony Foale
- MOTORCYCLE DYNAMICS. Vittore Cossalter. Second Edition
- INGENIERÍA DE MOTOCICLETAS. Cesar Diaz de Cerio y José Sancho. Apuntes formativos.
- MOTOCICLETAS CHASIS. John Robinson. Editorial Paraninfo
- MOTOCICLETAS. M. Arias-Paz. Ed CIE Inversiones Editoriales Dossat 2.000 s.l. 2003
- REGLAMENTO TÉCNICO. MotoStudent.
- Optimization of the Layout of a Racing Motorcycle using the Optimal Maneuver Method. Department of Mechanical Engineering – Padova University
- Estadística Aplicada con S-PLUS. M^a Dolores Ugarte y Ana Militino. Universidad Pública de Navarra.
- Diseño de Experimentos. AIN
- GATE-MX2 User Guide
- Manual Catia V5. ABGAM.
- www.dinamoto.it
- www.debates.motos.coches.net

- www.motostudent.com
- www.wikipedia.com
- www.google.com

Lista de programas informáticos que han sido usados para la realización del PFC:

- Catia V5. Programa CAD.
- MarcMentat. Programa FEM.
- Office
- XOptima. Programa multibody de la Universidad de Padova.
- CoG and weight distribution calculator. Tony Foale.
- GATE. Programa de telemetría



ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS INDUSTRIALES Y DE TELECOMUNICACIÓN

Titulación:

INGENIERÍA INDUSTRIAL

Título del proyecto:

OPTIMIZACIÓN DE PARÁMETROS PRINCIPALES Y CÁLCULO DE
CARGAS DE UNA MOTOCICLETA DE COMPETICIÓN

ANEXOS

Ibai Irigoyen Ulayar

César Díaz de Cerio

Pamplona, 2 de Marzo de 2010

ANEXO I

ANEXO II

ANEXO III

ANEXO I

NORMATIVA GENERAL

ÍNDICE

1. OBJETIVO DE LA COMPETICIÓN	2
2. FASES DE LA COMPETICIÓN	3
3. CALENDARIO.....	4
4. REGLAMENTO.....	5
4.1. Idiomas oficiales.....	5
4.2. Autoridades sobre el reglamento	5
4.3. Validez del reglamento.....	5
4.4. Conocimiento del reglamento.....	5
4.5. Cumplimiento del reglamento.....	5
4.6. Violación de las normas del reglamento	5
4.7. Impugnación a otros vehículos.....	1
4.8. Cambios en la reglamentación.....	6
5. NORMATIVA SOBRE LOS EQUIPOS	7
5.1. Requisitos individuales de los participantes.....	7
5.2. Requisitos de los equipos	7
5.3. Tutor del equipo. Representantes oficiales de los equipos	7
5.4. Aspectos federativos	7
5.5. Seguros	8
5.6. Asistencia externa a los equipos Universitarios.....	8
5.7. Número de equipos participantes.....	8
6. INSCRIPCIÓN	9
6.1. Cuotas de inscripción	9
6.2. Formalización de la inscripción	9
ANEXO A: DESCRIPCION DE LAS PRUEBAS.....	10
A.1. Fases previas a las jornadas competitivas	10
A.2. Fase MS1.....	10
A.2.1. Demostración del prototipo.....	10
A.2.2. Presentación del proyecto industrial.....	11
A.2.3. Jurados	11
A.2.4. Premios.....	11
A.3. Fase MS2.....	11
A.3.1. Pruebas de seguridad en banco.....	12
A.3.2. Evaluación de prestaciones.....	12
A.3.3. Carrera.....	12
A.3. Premios	13

1. OBJETIVO DE LA COMPETICIÓN

La competición MotoStudent promovida por la fundación Moto Engineering Foundation (en adelante MEF) es un desafío entre equipos universitarios de distintas UNIVERSIDADES españolas, europeas y del resto del mundo.

Consiste en diseñar y desarrollar un prototipo de moto de competición de pequeña cilindrada 125 cm³, 2 tiempos, que competirán con su evaluación pertinente, en unas jornadas que se llevarán a cabo inicialmente en las instalaciones de la Ciudad del Motor de Aragón. Para el propósito de esta competición, el equipo universitario debe considerarse integrado en una empresa fabricante de motos de competición, para desarrollar y fabricar un prototipo bajo unos condicionantes técnicos y económicos dados. La competición en sí misma es un reto para los estudiantes, donde estos en un periodo de tiempo de tres semestres han de demostrar y probar su capacidad de creación e innovación y la habilidad de aplicar directamente sus capacidades como ingenieros en comparación con los otros equipos de universidades de todo el mundo.

2. FASES DE LA COMPETICIÓN

Las motos serán juzgadas en unas series de eventos tanto estáticos como dinámicos, que incluirán: exposiciones orales y de “panel”, inspecciones técnicas, demostraciones dinámicas, etc. Para poder evaluar y puntuar los proyectos, la competición tendrá un proceso de selección por fases.

Para que las motos y proyectos entren en competición o concurso deberán cumplir los requisitos previos de resistencia seguridad y funcionamiento indicados en el reglamento técnico.

Los equipos, que superen estos requisitos, competirán en la fase MS1 en la cual se evaluará el proyecto bajo el punto de vista industrial con especial atención a aspectos estéticos, técnico y económico. Esta evaluación, con sus criterios, jurado y premios se indican en el ANEXO a este documento.

Las motos que superen estas pruebas participarán en la fase de pruebas dinámicas denominada MS2.

Estas pruebas consistirán en una evaluación de cualidades de pilotaje efectuadas por probadores expertos. Para la valoración final se desarrollará una carrera en la que los participantes serán pilotos federados de copas de promoción, seleccionados por la organización. Las pruebas y su valoración se encuentran definidos en el ANEXO mencionado.

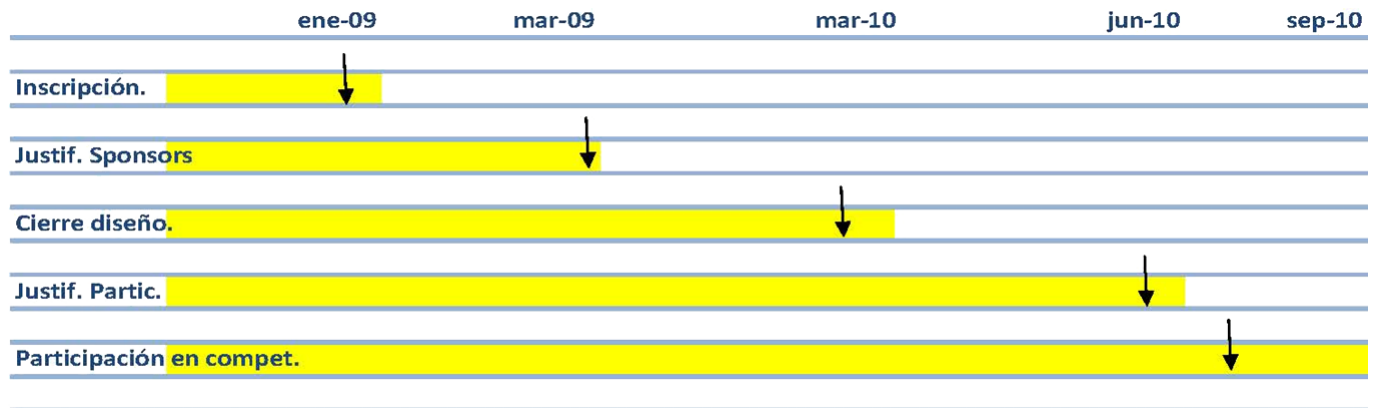
Niveles a superar por los equipos participantes:

	Excluyente	Puntuable
Requisitos mínimos	Si	No
Fase MS1 (Proyecto)	Si	Si
Fase MS2 (Seguridad)	Si	No
Fase MS2 (Pruebas dinámicas)	Si	Si
Fase MS2 (Carrera)	Si	Si

Todos los equipos participantes para ser evaluados en cualquiera de las categorías deben superar el nivel mínimo tanto en MS1 como en MS2, es decir ningún equipo puede fijarse como objetivo participar en una sola de las categorías ya que este hecho conculca el espíritu mismo de la competición.

3. CALENDARIO

El Calendario de la competición tiene una serie de fechas claves para los distintos equipos participantes y que deben cumplir con objeto de que entren en la evaluación final de la competición ya que se trata de desarrollar no solo un prototipo sino un proyecto de Ingeniería.



4. REGLAMENTO

4.1. Idiomas oficiales

Los idiomas oficiales de la competición MotoStudent serán español e inglés. La entrega de documentación, exposiciones públicas e información relativa a la competición será aceptable en ambos idiomas.

4.2. Autoridades sobre el reglamento

El reglamento de MotoStudent es de responsabilidad única de la fundación MEF. Cualquier comunicado oficial que parta de Moto Engineering Foundation se ha de considerar como parte y ha de tener la misma validez que el reglamento aquí publicado.

Las ambigüedades o cuestiones concernientes al significado o intenciones de este reglamento serán resueltas por la fundación MEF. Todas estas cuestiones, formularios de consulta, etc., se encontrarán disponibles, para los equipos participantes, en una base de datos preparada a tal efecto en la web. de MEF. Así mismo quedarán correspondientemente archivadas las consultas y respuestas en una estructura informática dispuestas a nivel general o a nivel particular para cada equipo.

4.3. Validez del reglamento

El reglamento de MotoStudent publicado en la web de la MEF y fechado en el calendario de la competición, serán las normas que tendrán efecto para cada una de las ediciones.

4.4. Conocimiento del reglamento

Se hace responsable a los equipos de la lectura y conocimiento del reglamento y sus normas para la competición a la que se presentan. El reglamento de la competición incluye no solo este reglamento base sino todos los anuncios oficiales que sean publicados en la web. de la competición motostudent.com.

4.5. Cumplimiento del reglamento

Al entrar en la competición, los equipos universitarios, tanto sus miembros individuales, los tutores de cada universidad, y cualquier otro personal adscrito al equipo universitario estarán sujetos al cumplimiento de las normas reflejadas por el reglamento y/o anunciadas por la MEF. Todos los equipos, tutores universitarios y representantes universitarios deben cooperar y seguir las instrucciones de organizadores y jueces de la MEF.

4.6. Violación de las normas del reglamento

La violación intencionada de las normas y reglas aquí expresadas supondrá la expulsión de la competición sin opción a la reclamación en caso de que se pruebe que fue intencionada y esté demostrada. Cualquier cuestión, duda o comentario se deberá remitir al comité organizador del evento según proceda.

4.7. Impugnación a otros equipos

El Comité Organizador de la prueba se reserva el derecho, en cualquier momento de la competición, de inspeccionar y examinar las actividades de los equipos en competición. Cualquier aspecto detectado en la inspección que vulnere los principios de la competición puede llevar aparejado al equipo correspondiente a verse apartado de la competición. Cualquier equipo puede impugnar a otro equipo participante en el caso de observar anomalías. No obstante, deberá presentar una fianza previa a la reclamación que será devuelta por la organización en caso de que la reclamación prospere. “La cuantía de la fianza” será fijada por la organización.

El Comité Organizador de la prueba se reserva el derecho, en cualquier momento de la competición, de inspeccionar y examinar las actividades de los equipos en competición. Cualquier aspecto detectado en la inspección que vulnere los principios de la competición puede llevar aparejado al equipo correspondiente a verse apartado de la competición. Cualquier equipo puede impugnar a otro equipo participante en el caso de observar anomalías. Las impugnaciones deberán obligatoriamente presentarse por escrito, indicando el artículo del reglamento que se considera violado, con pruebas suficientes para su verificación. Adicionalmente, deberá presentarse una fianza simultáneamente a la reclamación que será devuelta por la organización en caso de que la reclamación prospere. “La cuantía de la fianza” será fijada por la organización y podría llegar según el caso a la cuantía del primer premio.

4.8. Cambios en la reglamentación

El Comité Organizador se reserva el derecho de revisar el calendario de la competición y/o modificar el reglamento de la competición en cualquier momento y usando cualquier medio que haga mas eficiente la difusión de las mismas para el evento de MotoStudent, quedando registrado en la página web de la competición.

5. NORMATIVA SOBRE LOS EQUIPOS

5.1. Requisitos individuales de los participantes

La competición pretende, como aspecto fundamental ser un vehículo de formación complementaria para los estudiantes. La competición es puramente de ingeniería y no un campeonato de velocidad por estas consideraciones la elegibilidad esta limitada a estudiantes universitarios de grado o postgrado.

Para pertenecer a un equipo inscrito en la competición los alumnos deben estar matriculados en una Universidad Pública o Privada. Estos deben estar matriculados en un grado o postgrado. Como mínimo, tienen que haber superado el 50% de los créditos de su carrera de grado universitario. Se establece una edad mínima de 18 años para los miembros integrantes del equipo.

5.2. Requisitos de los equipos

Los equipos y los miembros que lo integran, registrados en la competición serán considerados como “participantes de la prueba” desde su inscripción, hasta la conclusión del evento. Cada equipo tendrá un mínimo de 7 participantes y un máximo de 15. Todo equipo universitario participante en MotoStudent deberá llevar como parte de su identificación el nombre de la Universidad o Centro Universitario a la que pertenece.

A su vez también pueden colaborar en la fase de desarrollo con el equipo otros centros Formativos como por ejemplo Centros de Formación de Educación Secundaria que por especiales características de equipamiento pueden complementar a la Universidad participante Sin embargo en las jornadas de Competición solamente podrán acceder a los distintos parques de trabajo los alumnos inscritos oficialmente.

Hasta seis meses (semestre académico) antes de la celebración de las pruebas será posible modificar la composición del equipo, siempre que un mínimo del 60% de sus componentes pertenezca al equipo inicial inscrito. En ningún caso se podrá reducir el número de componentes, es decir, en las modificaciones de la composición sólo se podrá sustituir o añadir participantes. Estas modificaciones deberán comunicarse puntualmente a la Organización. Las sustituciones no conllevan gasto adicional.

5.3. Tutor del equipo. Representantes oficiales de los equipos

Cada equipo debe nombrar un tutor de la universidad, siendo este un profesor de Universidad o personal técnico de la misma. Así mismo dicho tutor deberá acompañar al equipo de estudiantes a la competición y será considerado por los organizadores de la competición como el representante oficial del equipo de la universidad.

El tutor junto con el alumno Delegado, alumno elegido por los estudiantes, serán los responsables de mantener el contacto con la Organización y serán los únicos representantes oficiales de los equipos reconocidos por la Organización.

5.4. Aspectos federativos

Al ser pruebas de ingeniería y no de velocidad, los equipos no tendrán como requisito la necesidad de demostrar que algunos de los integrantes tengan licencias federativas expeditas por la autoridad competente, más

aun, cuando las pruebas dinámicas serán realizadas por pilotos externos a los equipos y elegidos por la organización.

5.5. Seguros

Las universidades inscritas deberán integrar el trabajo realizado en el currículum formativo de forma y manera que esta competición entre dentro de las actividades QUE CUBRE EL SEGURO escolar. No obstante, cada equipo tendrá un seguro privado como garantía ante cualquier accidente que se pudiera presentar y que cubrirá a cada uno de sus integrantes.

5.6. Asistencia externa a los equipos Universitarios

La involucración de Profesores y Técnicos de las Universidades, así como de Técnicos del Sector para el desarrollo de la actividad de los alumnos es de facto imprescindible y deseable para la competición. No obstante, es preciso recordar en este punto que el espíritu de la competición es fortalecer las habilidades de los estudiantes y ofrecer un marco para ello es también responsabilidad de todos. Por ello es preciso remarcar que se valorará como aspecto principal en el proyecto la demostración de que sean los propios estudiantes los que lleven a cabo las tareas y acciones directas en la construcción del prototipo.

5.7. Número de equipos participantes

El número máximo de equipos participantes en la edición 2009-10 se establece en 30 equipos.

Por Universidad pueden presentarse más de un equipo. Cada equipo solo puede presentar un proyecto y prototipo.

6. INSCRIPCIÓN

6.1. Cuotas de inscripción

La cuota de inscripción se establece en 350€ más IVA por estudiante integrante del equipo.

Las tasas de inscripción deberán ser abonadas a la organización de MOTOSTUDENT antes de finalizar el primer mes de Enero de la competición, que se establece con carácter bianual.

Las tasas de inscripción no serán reembolsables.

La inscripción da derecho a los alumnos inscritos a participar en el desarrollo de la competición y a los materiales y servicios que la organización pone a disposición de los equipos. Estos materiales o componentes se indican en el reglamento técnico.

6.2. Formalización de la inscripción

En la fase de constitución de los equipos se enviara a la Organización una página de preinscripción que figura en la página principal de la pagina web de motostudent. En ella se indican los estudiantes que inicialmente van a formar parte del equipo con datos de contacto e identificación.

Todos los miembros del equipo participante deberán aportar, en el momento de la inscripción o registro, los documentos que a continuación se detallan y, así mismo, proveer de datos de contacto para situaciones de emergencia.

La inscripción se formalizara rellenando los documentos que se encuentran en la pestaña de equipos /winchill de la pagina web motostudent.

- ✓ Doc MS_2009-01. Miembros del equipo.
- ✓ Doc MS-2009-02. Constitución del equipo.
- ✓ Doc MS_2009-03. Carta de oficialización del equipo.
- ✓ Doc MS_2009-04. Imagen copia de ingreso.
- ✓ Doc MS_2009-05. Imagen copia de seguro.
- ✓ Doc MS- 2009-06. Solicitud de sistema CAD.

Una vez los equipos hayan presentado la documentación indicada la organización les adjudicara su correspondiente código contraseña de forma que puedan acceder a su dominio particular en que el que se encontrará la información técnica digital correspondiente a los componentes suministrados.

ANEXO A: DESCRIPCION DE LAS PRUEBAS

Como se ha indicado anteriormente los equipos participantes tendrán que someterse a una serie de pruebas sucesivas eliminatorias agrupadas en dos fases MS1 y fase MS2.

A.1. Fases previas a las jornadas competitivas

Como se ha descrito en las informaciones de la competición, con objeto de que la misma tenga realmente carácter industrial se establecen unas fechas límite para una serie de actuaciones previas a las jornadas de competición.

- ✓ Presentación de justificación de patrocinadores. En la que los equipos participantes deben justificar de forma clara que empresas e instituciones sufragan la construcción del prototipo. Se formalizara a través del formulario en la página web y esta justificación debe presentarse antes del 1 de Abril del 2009. Tras esta justificación, al mes siguiente los equipos recibirán los componentes reglamentarios.
- ✓ Presentación de diseño cerrado. Antes del 31 de Marzo del 2010 los equipos participantes presentaran a la organización información gráfica de detalle del chasis y basculante o equivalente con cotas principales que será guardada por la organización. Esta información debe permitir a los jurados sin manipulación informática alguna verificar los futuros prototipos. La organización fija como formato específico documentos pdf de los planos de conjunto y/o detalle con tamaño máximo A3. Esta documentación solo será analizada por los jurados en las jornadas de competición y validarán que el prototipo presentado responde a esa información gráfica. Como es lógico se pueden aceptar modificaciones pero no de carácter sustancial.

El incumplimiento de estos hitos acarrea la separación de la competición.

A.2. Fase MS1

La fase MS1 es una fase demostrativa en la que los equipos participantes deberán mostrar y explicar el prototipo realizado y el proyecto de industrialización del citado prototipo.

A.2.1. Demostración del prototipo

Los grupos presentarán un prototipo para que sea revisado por los inspectores conforma los aspectos dimensionales y de seguridad que indica el reglamento técnico.

Los equipos pueden disponer de los elementos de recambio (cualquier componente o parte de la moto) que consideren oportunos. Estos recambios deberán ser presentados a la organización simultáneamente con el prototipo para su verificación, validación y sellado. La utilización de componentes no sellados por la organización significara la expulsión inmediata de la competición.

Por otra parte realizara una mínima prueba de funcionamiento en parque cerrado. La prueba consistirá en una prueba de arranque y parada y de maniobrabilidad a derechas e izquierdas entre 10 conos situados a 3 m de distancia.

También presentaran en el stand preparado por la organización los paneles informativos que consideren convenientes.

A.2.2. Presentación del proyecto industrial

El proyecto industrial será defendido ante un jurado de expertos elegidos por la organización y deberá contener la información siguiente:

El proyecto se desarrollara sobre los siguientes condicionantes:

Moto de circuito, con una serie anual de 500 unidades y un costo de fabricación máximo de 4500€. En este concepto se contemplan los conceptos siguientes: componentes (compras exteriores), amortización de utillajes en 5 años, mano de obra directa, repercusión infraestructura de empresa y gastos financieros. Esta moto de serie será la moto prototipo con las mínimas diferencias exigidas por el proceso de fabricación en la serie.

El proyecto constará de cuatro apartados independientes, con las siguientes puntuaciones máximas.

- ✓ Diseño del vehículo (150 puntos).
- ✓ Análisis y cálculos técnicos (175 puntos).
- ✓ Definición del sistema de fabricación e industrialización (175 puntos).
- ✓ Análisis de costos del desarrollo del prototipo y proceso industrial de fabricación de la serie (100 puntos).

Cada apartado del proyecto industrial de los distintos equipos se presentará ante un mismo jurado de expertos, elegidos por la organización.

Para la exposición de cada apartado los equipos designaran uno o dos alumnos diferentes.

A.2.3. Jurados

Los jurados que evaluarán los proyectos estarán formados por técnicos del sector Industrial y de la competición de vehículos de dos ruedas elegidos por la organización, tanto para esta categoría como la categoría MS2.

Los jurados se establecerán por temáticas., un jurado de Diseño, otro de Análisis y Cálculos técnicos, otro de Definición del sistema de fabricación e industrialización y otro de Costes.

La evaluación del jurado será inapelable.

A.2.4. Premios

Se otorgarán premios a:

- ✓ Al mejor proyecto industrial que incluirá una mención a la mejor innovación o aplicación técnica (Todas las fases).

El premio será de 6000€ con trofeo para el equipo y un "stage" para integrantes del equipo en empresas industriales del sector o empresas de competición.

- ✓ Dos accésits de 3000€ a:

Mejor diseño.

Mejor innovación tecnológica.

A.3. Fase MS2

La fase MS2 es una fase de validación experimental en la que las motos prototipo de los equipos participantes que hayan superado la Fase MS1 deberán demostrar su calidad de actuación superando distintas pruebas en banco y en circuito.

Created with



nitro PDF

professional

download the free trial online at nitropdf.com/professional

A.3.1. Pruebas de seguridad en banco

Estas pruebas pretenden ser una garantía de robustez , fiabilidad y seguridad ante las pruebas en circuito.

Así las motos deberán superar las siguientes pruebas:

- ✓ Prueba de resistencia de chasis según especificaciones de reglamento técnico
- ✓ Prueba de frenada en banco de rodillos según especificaciones de reglamento técnico
- ✓ Prueba de ruidos

La sistemática de presentación y prueba de las motos se realizara mediante un proceso de verificación que se dará a conocer a los equipos con suficiente antelación.

A.3.2. Evaluación de prestaciones

Los equipos que hayan superado las pruebas de seguridad pondrán sus motos a disposición de profesionales de pruebas y ensayos elegidos por la organización que harán una valoración de sus prestaciones en el circuito de velocidad en una vuelta al circuito.

Cada moto será probada por un mínimo de tres pilotos, los cuales evaluarán:

- ✓ Capacidad de frenada (80 puntos)
- ✓ Capacidad de aceleración (80 puntos)
- ✓ Maniobrabilidad (80 puntos)
- ✓ Estabilidad (80 puntos)
- ✓ Velocidad punta (80 puntos)

La organización facilitará a los equipos piloto, circuito y tiempo de prueba limitado para la puesta a punto de la moto previo a la prueba de evaluación de prestaciones.

Los probadores serán designados por la organización de la prueba y su resolución será inapelable. Como consecuencia de la evaluación conjunta de sus prestaciones, se establecerá una clasificación de las motos. Si alguna de las motos no supera el 25% de la puntuación máxima en alguna de las capacidades valoradas se considerara no apta para la carrera.

A.3.3. Carrera

Las motos que hayan superado la prueba anterior, participarán en una carrera de velocidad en circuito.

Esta prueba tendrá carácter competitivo con una valoración en el computo de las pruebas dinámicas según la siguiente tabla de puntuación:

Posición	Puntos
1º	100
2º	90
3º	85
4º	80

Posición	Puntos
5º	76
6º	72
7º	68
8º	64

Posición	Puntos
9º	60
10º	57
11º	54
12º	51

Posición	Puntos
13º	48
14º	45
15º	42
16º al 30º	40

El equipo que no termine la carrera obtendrá 0 puntos por este concepto.

Para entrar en la puntuación los equipos que terminen deberán haber recorrido al menos el 50% de las vueltas recorridas por el primer clasificado.

Created with

Las motos se pilotarán por pilotos de categoría promoción seleccionados por la organización y sorteadas entre ellos.

Para facilitar la puesta a punto de la moto se facilitaran dos tandas de entrenamiento sin valor clasificatorio, cuyo desarrollo se comunicara oportunamente por parte de la organización.

La carrera se llevara a cabo sobre una longitud mínima de 45 km. La organización establecerá según el caso el número de vueltas o duración de la carrera. En el circuito de velocidad de ALCANIZ será de 8 vueltas.

El orden de la parrilla de salida se establecerá según la clasificación obtenida en la categoría MS1, de forma que el equipo con mejor puntuación ocupará el primer puesto de la parrilla. En caso de empate el orden de parrilla se establecerá por sorteo.

A.3. Premios

Se otorgarán premios a las tres primeras motos clasificadas.

Al equipo de la primera moto clasificada se le entregara un premio de 6000€ y trofeo.

Al equipo clasificado en segundo lugar se le entregara un premio de 3000€ y trofeo.

Al tercer equipo clasificado se le otorgara un premio de 1500€ y trofeo.

Al resto de equipos participantes que hayan finalizado la carrera recibirán un trofeo recordatorio de su participación en la prueba.

ANEXO II

REGLAMENTO TÉCNICO

ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN: Objetivos fundamentales de este reglamento3

2. LA MOTOCICLETA: Orientación general y definición del carácter de la misma4

3. REQUERIMIENTOS GENERALES DE DISEÑO5

 3.1. Dimensiones5

 3.2. Pesos5

4. CICLÍSTICA6

 4.1. Bastidor6

 4.2. Suspensiones6

 4.2.1. Suspensión delantera6

 4.2.2. Suspensión trasera6

 4.3. Dirección6

 4.3.1. Diseño6

 4.3.2. Amortiguador de dirección7

 4.4. Sistema de frenos7

 4.4.1. Freno delantero7

 4.4.2. Freno trasero7

 4.5. Estriberas7

 4.6. Manillar7

 4.7. Basculante8

 4.8. Llantas y neumáticos8

 4.9. Protecciones para caídas8

5. CARENADOS9

 5.1. Restricciones dimensionales9

 5.2. Seguridad9

6. MOTOR10

 6.1. Tipo10

 6.2. Características10

 6.3. Cilindro10

 Caja de láminas: no se permite su modificación. En caso de rotura se permite el recambio original10

 6.4. Culata10

 6.5. Cáster10

 6.6. Caja de cambios10

 6.7. Transmisión secundaria10

 6.8. Embrague10

 6.9. Acelerador11

7. SISTEMA DE ALIMENTACIÓN DE COMBUSTIBLE12

 7.1. Carburador / Inyección12

 7.2. Depósito de combustible12

 7.3. Conductos de combustible12

 7.4. Sistema de llenado12

 7.5. Tipo de combustible12

Created with



8. SISTEMA DE REFRIGERACIÓN	13
8.1. Refrigeración interna del motor	13
8.2. Radiador	13
8.3. Líquidos refrigerantes.....	13
9. SISTEMA DE ADMISIÓN DE AIRE	14
9.1. Conductos de admisión.....	14
9.2. Airbox	14
9.3. Sistemas de sobrepresión.....	14
10. SISTEMA DE ESCAPE	15
11. INSTALACIÓN ELÉCTRICA.....	16
11.1. Cableado	16
11.2. Conectores	16
11.3. Componentes	16
12. SISTEMAS ELECTRÓNICOS	17
12.1. Centralita	17
12.2. Tablier.....	17
12.3. Otros sistemas electrónicos	17
13. SISTEMAS DE ADQUISICIÓN DE DATOS	18
14. OTROS COMPONENTES COMERCIALES	19
15. PROCEDIMIENTO DE VERIFICACIONES TÉCNICAS	20
15.1. Homologación del chasis	20
15.2. Verificación de cotas generales	20
15.3. Verificación de pesos	20
15.4. Verificación de ruidos	20
15.5. Verificación del cumplimiento de la normativa de seguridad	20
16. IDENTIFICACIÓN DE LA MOTOCICLETA	22
16.1. Números y fondos	22
16.2. Identificación frontal	22
16.3. Dorsales laterales.....	22
16.4. Número de identificación de bastidor de la motocicleta.....	22
16.5. Nombre de la universidad	22
16.6. Espacio en el bastidor para adhesivo de verificación técnica.....	22
16.7. Espacio para soporte y alojamiento del transponder	22
17. FIGURAS	24

1. INTRODUCCIÓN: Objetivos fundamentales de este reglamento

Este documento contiene la normativa técnica reguladora de la competición denominada "Motostudent". El principal objetivo consiste en estandarizar y acotar el amplio abanico de posibilidades de construcción de un prototipo. De este modo todos los proyectos se ajustarán a una línea de trabajo orientativa y común. Así pues, se posibilita una competencia objetiva entre los participantes.

2. LA MOTOCICLETA: Orientación general y definición del carácter de la misma

El objeto de la competición es un vehículo de dos ruedas a motor de combustión interna. Dicho vehículo será concebido para el pilotaje de un solo ocupante.

La motocicleta deberá ser un prototipo diseñado y construido para la competición. La especialidad son las carreras de velocidad.

3. REQUERIMIENTOS GENERALES DE DISEÑO

3.1. Dimensiones

Las dimensiones de la motocicleta son libres exceptuando algunos requisitos básicos:

- ✓ La anchura mínima entre los extremos de los semimanillares (o manillar en su caso) ha de ser de 450 mm. (Figura 1)
- ✓ El ángulo mínimo de inclinación lateral de la motocicleta sin que ningún elemento de la misma (exceptuando los neumáticos) toque el pavimento debe ser 50°. Dicha medición se realiza con la motocicleta descargada (sin piloto) pero con todo el equipamiento y líquidos para su funcionamiento. (Figura 1)
- ✓ La distancia libre al pavimento con la motocicleta en posición vertical ha de ser de un mínimo de 100 mm en cualquier situación de compresión de suspensiones y reglajes de geometrías. (Figura 2)
- ✓ Límite posterior: Ningún elemento de la motocicleta podrá rebasar la línea tangente vertical trazada a la circunferencia exterior del neumático trasero. (Figura 2)
- ✓ La distancia de los neumáticos a cualquier elemento de la motocicleta diferente de la rueda no podrá ser inferior a 15 mm. en toda posición de la misma y reglaje de geometría.
- ✓ La anchura máxima del asiento debe ser de 450 mm. No podrá sobresalir de esa anchura ningún otro elemento de la motocicleta del asiento hacia detrás excepto el sistema de escape. (Figura 3)

3.2. Pesos

El peso mínimo del conjunto de la motocicleta en orden de marcha incluido depósito, gasolina y líquidos en ningún momento de las pruebas deberá ser inferior a 90 kg. El peso se podrá verificar tanto al inicio, durante y final de la competición.

Está permitido lastrar el vehículo para alcanzar el peso mínimo.

4. CICLÍSTICA

4.1. Bastidor

El diseño, el proceso y el material utilizado para la fabricación del bastidor es libre excepto en las siguientes consideraciones:

- ✓ No está permitido fabricar el chasis en titanio ni aleaciones de titanio.
- ✓ El bastidor definitivo a presentar en la competición deberá haber superado el proceso de homologación por parte de la organización. (Ver criterios de verificación)
- ✓ No se permite el uso de un chasis comercial ni tan siquiera una unidad modificada. Deberá tratarse de un chasis prototipo de fabricación propia.

4.2. Suspensiones

4.2.1. Suspensión delantera

El diseño de la composición del sistema de suspensión delantera es libre.

En el caso de uso de horquilla en la composición de la suspensión delantera se deberá utilizar la proporcionada por la organización solo autorizándose el cambio de las tijas.

La horquilla proporcionada por la organización no puede ser modificada estructuralmente. Solo está permitido el cambio de características de la horquilla con el cambio de la viscosidad del aceite hidráulico y muelles.

Está prohibido el uso de titanio, aleaciones ligeras y compuestos de fibra en los ejes de rotación de los componentes del sistema de suspensión delantera.

4.2.2. Suspensión trasera

El diseño de la composición del sistema de suspensión trasera es libre.

En el caso de uso de amortiguador en la composición de la suspensión trasera se deberá utilizar el proporcionado por la organización.

El amortiguador proporcionado por la organización no puede ser modificado estructuralmente. Solo se permite el cambio del muelle.

Está prohibido el uso de titanio, aleaciones ligeras y compuestos de fibra en los ejes de rotación de los componentes del sistema de suspensión trasera.

4.3. Dirección

4.3.1. Diseño

En todo el recorrido de giro de la dirección no deberá existir ningún elemento que interfiera en una tolerancia de 30 mm entorno a los puños del manillar y accionamientos. El objetivo es evitar daños en las manos y dedos del piloto en caso de caída. (Figura 3)

El ángulo mínimo de giro de la dirección deberá ser de 15° medidos a cada lado del eje longitudinal de la motocicleta. (Figura 3)

El ángulo de giro de la dirección deberá estar limitado con un tope a cada lado.

4.3.2. Amortiguador de dirección

Está permitido el uso de amortiguador de dirección.

4.4. Sistema de frenos

La motocicleta deberá disponer tanto de freno delantero como freno trasero.

4.4.1. Freno delantero

Deberá utilizarse el conjunto de freno delantero (bomba, latiguillos y pinza) proporcionado por la organización.

Se permite la elección del tipo de pastillas de freno y disco.

Se permite la sustitución de los latiguillos de freno por otros de diferente longitud.

La situación del accionamiento de la bomba de freno y la modificación de la leva de accionamiento es libre con la restricción de que, si su ubicación fuese el manillar, su longitud no podrá ser superior a 200 mm y su extremo deberá ser una esfera de un diámetro mínimo de 18 mm.

4.4.2. Freno trasero

Deberá utilizarse el conjunto de freno trasero (bomba, latiguillos y pinza) proporcionado por la organización.

Se permite la elección del tipo de pastillas de freno y disco.

Se permite la sustitución de los latiguillos de freno por otros de diferente longitud.

La situación del accionamiento de la bomba de freno y la modificación de la leva de accionamiento es libre con la restricción de que, si su ubicación fuese el manillar, su longitud no podrá ser superior a 200 mm y su extremo deberá ser una esfera de un diámetro mínimo de 18 mm.

4.5. Estriberas

Como requisito deberán tener protegidos los extremos con un tope de nilón de un radio mínimo de 8 mm.

Deberán disponer de protectores laterales para evitar que la bota del piloto pueda interferir con elementos móviles como cadena o neumático trasero.

4.6. Manillar

La anchura del manillar medida entre los extremos de los puños no podrá ser inferior a 450 mm. (Figura 1)

Las puntas del manillar deberán ir protegidas con un tope de nilón redondeado de un radio mínimo de 8 mm.

No está permitido el uso la de manillares o semimanillares construidos en aleación ligera.

Los soportes del manillar o semimanillares deberán estar diseñados con el fin de minimizar el riesgo de fractura en caso de caída. Se deberán utilizar radios mínimos de 2 mm en el anclaje para facilitar deformaciones sin fractura.

4.7. Basculante

Está prohibido el uso de titanio, aleaciones ligeras y compuestos de fibra en la fabricación de los ejes de rotación del basculante.

Es obligatorio el uso de un protector de cadena que impida la interferencia entre el cuerpo del piloto y el punto de engrane cadena-corona en la rueda trasera.

4.8. Llantas y neumáticos

La organización suministrará las llantas y neumáticos y se prohíbe su modificación, salvo en anclajes de disco salvaguardando en todo caso la rigidez de las mismas.

Está prohibido el uso de titanio, aleaciones ligeras y compuestos de fibra en la fabricación de los ejes de ruedas.

Esta permitido el uso de protectores de nilón en los extremos del eje para posibles caídas. Estos protectores deberán ser redondeados con un diámetro igual o superior al del eje utilizado.

Los ejes de rueda no podrán sobresalir de su alojamiento en sus extremos más de 30 mm. No se consideren en esta medida posibles protectores de nilón.

4.9. Protecciones para caídas

Se aconseja el uso de topes de nilón para proteger la motocicleta en caso de caída. También se permite el uso de protectores de fibra para chasis y cárter de motor.

5. CARENADOS

5.1. Restricciones dimensionales

Todos los bordes y acabados del carenado han de ser redondeados. Radio mínimo 1 mm.

La anchura máxima del carenado será de 600 mm. (Figura 3)

Límite frontal: el carenado en ningún caso podrá sobrepasar la vertical frontal trazada tangencialmente a la circunferencia exterior del neumático delantero.

Límite posterior: el carenado en ningún caso podrá sobrepasar la vertical posterior trazada tangencialmente a la circunferencia exterior del neumático trasero.

Lateralmente: El carenado no podrá cubrir lateralmente al piloto a excepción de los antebrazos (esta excepción solamente en posición de mínima resistencia aerodinámica del piloto). La llanta posterior no podrá cubrirse en más de 180°.

Entre la altura del asiento y la parte más elevada del colín la cota máxima será de 150 mm.

La utilización de guardabarros no es obligatoria.

El guardabarros delantero no podrá cubrir más de 135° de la circunferencia del neumático medido desde la parte posterior del neumático con origen del ángulo en la horizontal que pasa por el eje de rueda. En esos 135° las dimensiones del guardabarros son libres.

Esta permitido el uso de alerones como pieza del carenado. Deberán no superar la anchura del carenado o del colín ni superar la altura de los extremos del manillar. El radio mínimo será de 2 mm. Se permite el uso de dispositivos móviles aerodinámicos.

5.2. Seguridad

La quilla deberá ser diseñada de modo que en caso de rotura del motor pueda albergar el 50% de la cantidad total de aceite del motor con un mínimo de 5 litros. La quilla deberá tener dos agujeros de descarga que en condiciones de seco estarán tapados y solo en condiciones de mojado podrán mantenerse abiertos.

Todos los sobraderos de la motocicleta deberán redirigirse a un depósito de un mínimo de 250 cm³ de capacidad para evitar vertido de líquidos. (Sobradero de aceite cárter, depósito de gasolina, refrigerante).

6. MOTOR

Deberá utilizarse el motor proporcionado por la organización. El motor se entregará sellado y se prohíbe totalmente su manipulación interna.

6.1. Tipo

Motor monocilíndrico de 125 cm³ 2 tiempos con refrigeración líquida.

6.2. Características

Descritas en las hojas técnicas en la WEB.

6.3. Cilindro

Caja de láminas: no se permite su modificación. En caso de rotura se permite el recambio original.

6.4. Culata

No se permite el mecanizado de la culata para el uso de sensor de detonación.

6.5. Cáster

No se permite la modificación del mismo ni tan siquiera en sus anclajes externos.

6.6. Caja de cambios

Está prohibida la modificación de la caja de cambios en cualquiera de sus componentes. Tan sólo se permite la instalación de sensores para la adquisición de datos.

6.7. Transmisión secundaria

El tipo de transmisión es libre.

6.8. Embrague

La situación del accionamiento de la leva del embrague es libre con la restricción de que su longitud no podrá ser superior a 200 mm y su extremo deberá ser una esfera de un diámetro mínimo de 18 mm. La esfera puede estar rectificadas con un plano de una anchura mínima de 14 mm, los bordes del plano han de ser redondeados.

6.9. Acelerador

El acelerador ha de ser de retorno automático de manera que se asegure su cierre en caso de que el piloto suelte el mismo.



7. SISTEMA DE ALIMENTACIÓN DE COMBUSTIBLE

7.1. Carburador / Inyección

El carburador es de libre elección. Se prohíbe el uso de carburadores cerámicos.

Está permitido el uso de sistemas de inyección de carburante adicionales al carburador y la programación electrónica de los mismos. (Sistemas "powerjet")

7.2. Depósito de combustible

El respiradero del depósito de combustible deberá estar provisto de una válvula de retención. El respiradero deberá verter en el depósito de sobrantes de líquidos.

El depósito de carburante de cualquier tipo deberá ir relleno con material retardante de llama o disponer de incontinente interno de seguridad. En el caso de los depósitos no metálicos es obligatorio el uso de este continente de goma o resina. El fin de la vejiga de seguridad no es otro que impedir el derrame de carburante en caso de rotura del depósito.

Esta prohibido presurizar el depósito de carburante.

El tanque de gasolina deberá ser calificado como "apto" por la organización antes de la realización de las pruebas en cumplimiento de las consideraciones anteriormente expuestas.

7.3. Conductos de combustible

Todos los conductos de combustible del depósito al carburador o sistema de inyección deberán estar provistos de racords estancos de seguridad. De manera que en caso de desprendimiento del depósito de la motocicleta sea el récord el que se desconecte y no otras uniones del conducto. Por tanto, para la apertura del récord la fuerza aplicada deberá ser, máximo, el 50% de la fuerza necesaria para desprender cualquier otra unión o rotura del material componente del conducto.

7.4. Sistema de llenado

El tapón del depósito de combustible deberá ser estanco y estar provisto de un sistema seguro de cierre que impida a posibilidad de desprenderse en caso de caída.

7.5. Tipo de combustible

El combustible será administrado por la organización y corresponderá a gasolina comercial de 98 Octnos.

El aceite para la realización de la mezcla será de libre elección.

Está prohibida la utilización de aditivos al carburante mejoradores del índice de Octano.

8. SISTEMA DE REFRIGERACIÓN

8.1. Refrigeración interna del motor

No se permite la modificación del sistema de refrigeración interna del motor.

8.2. Radiador

El número, la situación, el tamaño y la composición de los radiadores son libres siempre y cuando cumplan con los requerimientos dimensionales de las cotas generales de la motocicleta.

8.3. Líquidos refrigerantes

Los líquidos refrigerantes utilizados podrán ser agua o refrigerantes comerciales.

9. SISTEMA DE ADMISIÓN DE AIRE

9.1. Conductos de admisión

La composición, dimensiones y situación de los conductos de admisión de aire son libres siempre que éstas cumplan los requerimientos dimensionales de las cotas generales de la motocicleta.

9.2. Airbox

La composición, dimensiones y situación de las cajas de aire son libres siempre que éstas cumplan los requerimientos dimensionales de las cotas generales de la motocicleta.

9.3. Sistemas de sobrepresión

Está prohibido el uso de sistemas “turbo” para el aumento de presión de gases en la admisión. Únicamente se permite el aprovechamiento aerodinámico del movimiento del vehículo mediante el uso de tomas de aire y sistemas de airbox.

10. SISTEMA DE ESCAPE

El sistema de escape será de libre elección siempre que cumpla los requerimientos dimensionales generales de la motocicleta y la normativa sonora.



11. INSTALACIÓN ELÉCTRICA

La composición de la instalación eléctrica deberá ser elaborada por cada equipo competidor. Esta prohibido el uso de una instalación comercial.

11.1. Cableado

El tipo de cable a utilizar, el diseño y la ejecución del mazo de cables son libres.

11.2. Conectores

El tipo de conectores es libre. Se deberá tener en cuenta la posibilidad del correcto funcionamiento eléctrico de la motocicleta en condiciones de lluvia.

11.3. Componentes

Se permite el uso de componentes comerciales. (bobinas, baterías, reguladores, conectores).

Todas las motocicletas deberán ir provistas de un botón de paro de seguridad en el lado izquierdo del manillar. Deberá estar indicado en color rojo para su fácil localización en caso de emergencia. Dicho botón de paro deberá cortar el suministro eléctrico a cualquier componente de la motocicleta.

12. SISTEMAS ELECTRÓNICOS

12.1. Centralita

La centralita para la gestión electrónica será proporcionada por la organización (coste aparte) a los equipos que la requieran. Se permite la utilización libre de otras centralitas.

12.2. Tablier

El sistema de información utilizado en el tablier es libre.

12.3. Otros sistemas electrónicos

Está permitido el uso libre de otros sistemas electrónicos como cambio semiautomático, limitadores de vueltas, sistemas de información, limitadores de velocidad, control de servos...

13. SISTEMAS DE ADQUISICIÓN DE DATOS

Esta permitido el uso de sistemas de adquisición de datos relativos a parámetros de motor, dinámica de la motocicleta y comportamiento del piloto.

Se podrán utilizar sistemas comerciales o la adaptación de sistemas de otro tipo de vehículos.

Así mismo, se permite la utilización libre de todo tipo de sensores tanto de fabricación propia como reutilización de adaptaciones.

El software utilizado podrá ser comercial o de diseño propio.

14. OTROS COMPONENTES COMERCIALES

Se permite el uso de elementos de adquisición comercial excepto los prohibidos explícitamente en este reglamento.



15. PROCEDIMIENTO DE VERIFICACIONES TÉCNICAS

Para el control y verificación de vehículos se creará una ficha para cada prototipo. Este documento será relleno por los verificadores técnicos en la fase previa a la competición. Una vez contrastados todos los apartados se deberá dar la calificación de “apto” para poder participar en las diferentes pruebas. Tras la verificación se fijará un adhesivo de la organización comprobante de la aceptación del prototipo.

15.1. Homologación del chasis

La organización se reserva el derecho de verificar el chasis mediante una prueba previa a la competición. Se habrá de presentar previo a la competición un estudio teórico de cargas sobre el chasis.

La prueba se realizará en un potro de ensayo. Se aplicarán dos tipos de carga no simultaneas. Una carga horizontal progresiva de 250 daN longitudinalmente a la motocicleta en los ejes de rueda delantera y otra vertical de 200 daN . No se admitirán deformaciones permanentes en la estructura del chasis.

Introducir sistema y dibujo de anclaje a las bridas de la tija para aplicar carga sistema de medición.

15.2. Verificación de cotas generales

Se medirán y supervisarán las cotas generales de diseño estipuladas en este reglamento.

15.3. Verificación de pesos

Se acondicionará un centro de verificaciones y controles donde los participantes podrán verificar su vehículo.

Se podrá solicitar por la organización controles de pesos en cualquier fase de la competición.

Los controles se realizarán sobre el vehículo en orden de marcha con todos sus sistemas y componentes además de los líquidos necesarios para su uso.

Inicialmente se realizará una calibración del sistema de medida.

Se realizarán tres pesadas del vehículo y la media de los tres resultados será el valor asignado.

La tolerancia en la medida es 1 kg por debajo del mínimo.

15.4. Verificación de ruidos

El prototipo será analizado en un espacio abierto donde no existan obstáculos en un radio de 10 m.

El ruido ambiente no podrá ser superior a 90 dB/A en un radio de 10 m.

La medida se realizará a 50 cm del extremo del tubo de escape y en un ángulo de 45°.

La medida límite será de 113 dB/A.

La verificación se realizará a un rango fijo de revoluciones del motor 5000 rpm.

15.5. Verificación del cumplimiento de la normativa de seguridad

Se realizará una verificación completa de cada uno de los puntos referentes a seguridad de cada uno de los apartados descritos en este reglamento. Por encima de cualquier criterio técnico a nivel de prestaciones o

construcción del vehículo deberá prevalecer, como prioritario, la seguridad de los participantes. Para ello, todos los prototipos deberán cumplir los requisitos de seguridad en cualquier fase de la competición. De manera especial se hace hincapié en la verificación del vehículo tras haber sufrido un accidente con el fin de garantizar la seguridad del mismo.

16. IDENTIFICACIÓN DE LA MOTOCICLETA

16.1. Números y fondos

Las medidas mínimas de los números serán de 140 mm de alto por 30 mm de ancho.

Las medidas mínimas de los fondos serán de 275 mm de ancho por 200 mm de alto.

El color de los números deberá ser negro y el fondo blanco.

Al menos 25 mm entorno a los números deberán estar libres de otros grafismos.

16.2. Identificación frontal

La motocicleta deberá ser identificada con un dorsal frontal que permita una visualización clara del vehículo durante la competición.

16.3. Dorsales laterales

Del mismo modo se deberá identificar la motocicleta lateralmente con el dorsal asignado.

16.4. Número de identificación de bastidor de la motocicleta

Cada prototipo deberá disponer de número de chasis grabado en el mismo para la identificación del mismo en cualquier situación.

16.5. Nombre de la universidad

En todos los prototipos deberá aparecer el nombre de la universidad o las iniciales en caracteres de un tamaño no inferior a 50 mm de alto por 30 mm de ancho.

16.6. Espacio en el bastidor para adhesivo de verificación técnica

Se deberá proveer al bastidor de un espacio mínimo de 70 mm de ancho por 40 mm de alto para la fijación del adhesivo de verificación de la organización. Si no directamente en el bastidor, se deberá habilitar una placa para la fijación del mismo.

16.7. Espacio para soporte y alojamiento del transponder

Se deberá habilitar un espacio para la fijación del transponder y su soporte. Este espacio deberá ser de un mínimo de 120 mm de alto por 120 mm de ancho, 60 mm de fondo.

El espacio deberá estar localizado en la parte derecha del vehículo y en una posición protegida de posibles caídas.

No deberá existir obstáculo de interferencia en la línea entre el transponder y el receptor en el lugar de medición. La organización suministrará las características dimensionales del transponder así como el tipo de soporte.

Created with



nitro PDF

professional

download the free trial online at nitropdf.com/professional

Es responsabilidad del equipo la correcta fijación del transponder.

Created with

17. FIGURAS

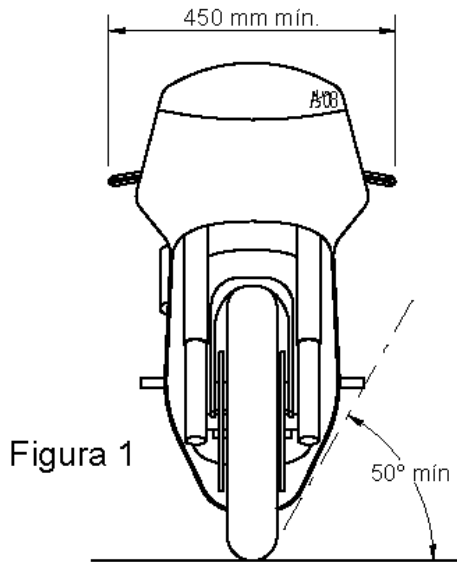


Figura 1

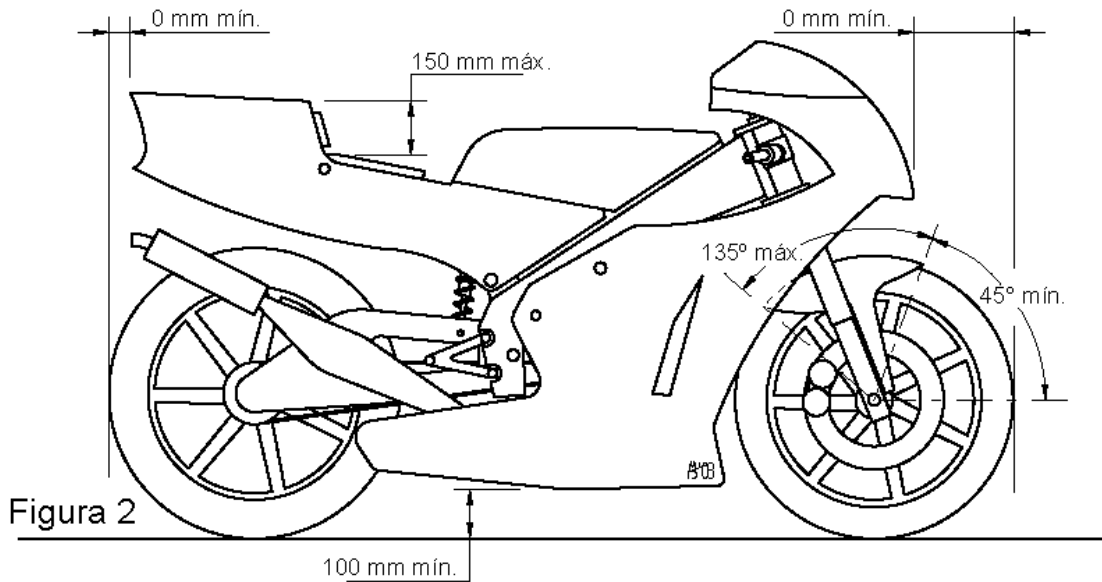


Figura 2

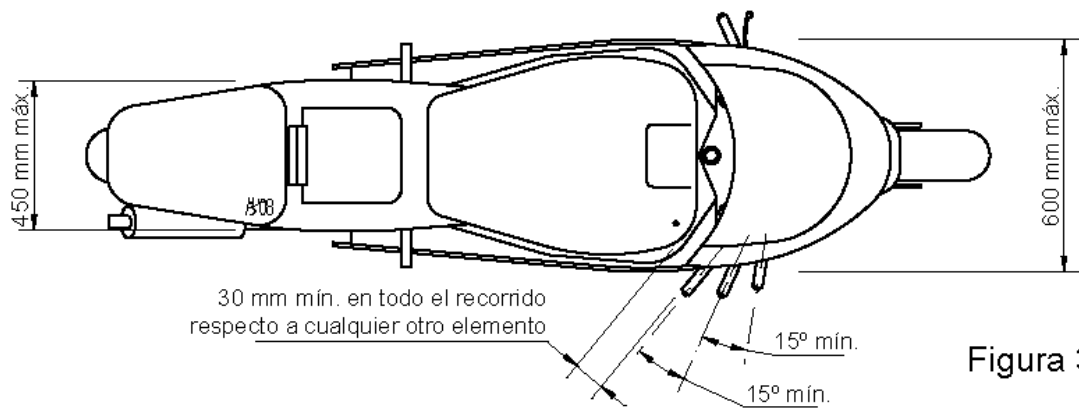


Figura 3

Created with

Moto Engineering Foundation. Competición Moto Student 2010 professional

download the free trial online at nitropdf.com/professional

ANEXO III

MANUAL DE UTILIZACIÓN DEL SOFTWARE BASADO EN EL MÉTODO DE LA MANIOBRA ÓPTIMA: XÓPTIMA





UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA
**DIPARTIMENTO DI INNOVAZIONE MECCANICA
E GESTIONALE**



**Manuale di utilizzo del software basato sul metodo della
manovra ottima:**

XOptima

Versione 2008
data: 30 Giugno 2009

Autori: Simon Bobbo, Francesco Biral

XOptima2008 SUPERBIKE

Modello motocicletta con sospensioni

1. DESCRIZIONE DEL MODELLO

1.2 Gradi di Libertà:

$u(t), v(t),$	velocità longitudinale e laterale (dof 1, 2)
$z(t),$	scuotimento verticale del telaio (dof 3)
$\psi(t), \phi(t), \mu(t),$	imbardata, rollio, beccheggio (dof 4,5,6)
$\delta(t),$	sterzo (dof 7)
$zsr(t), zsf(t);$	deformazioni delle sospensioni (dof 8, 9)

1.3 Variabili aggiuntive:

$\psi_4(t), \phi_4(t),$	imbardata e rollio della ruota anteriore
$\omega_{a1}(t), \omega_{a4}(t);$	velocità angolari della ruota posteriore e anteriore rispettivamente
$S_r(t), N_r(t), F_r(t);$	forze agenti sui pneumatici posteriore: longitudinale, verticale, laterale
$S_f(t), N_f(t), F_f(t);$	forze agenti sui pneumatici anteriore: longitudinale, verticale, laterale

1.4 ingressi del modello matematico:

$\tau(t),$	coppia di sterzo
$s_r(t), s_f(t)$	forze longitudinali (adimensionali)

1.5 Terne e corpi:

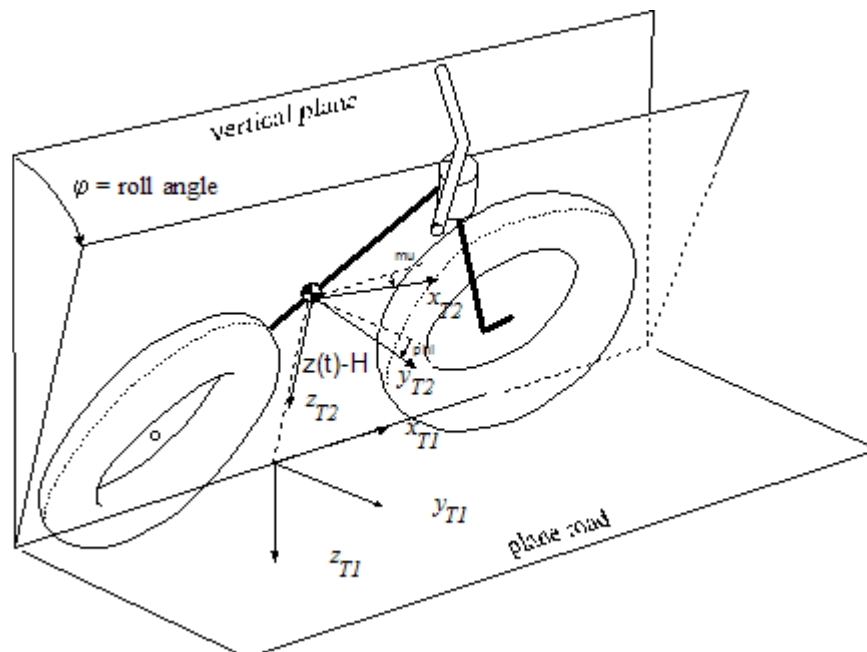


Figura 1: Terne **T1** e **T2**

Terna **T1**: terna con origine nella proiezione del baricentro del veicolo a livello della strada;

Terna T2: terna fissa a telaio con origine nel baricentro;

Per passare da T1 a T2 si opera una rotazione attorno l'asse X dell'angolo di rollio $\phi(t)$, una rotazione attorno l'asse Y dell'angolo di beccheggio $\mu(t)$ e una traslazione lungo l'asse Z di $-H$ (altezza del baricentro)

Terna TWRO: terna con origine nel centro della ruota posteriore e asse X sempre orizzontale

Rispetto la terna T2 si effettua dunque una traslazione lungo l'asse X della quantità $-B$ (posizione orizzontale del baricentro rispetto il perno della ruota posteriore), una traslazione lungo Z della quantità $H-R_r+z_{sr}(t)$ (con R_r raggio della ruota posteriore, $z_{sr}(t)$ deformazione della sospensione posteriore) e una rotazione attorno l'asse Y di $-\mu(t)$ (per riportare l'asse X orizzontale).

La terna TWR è analoga alla TWRO con l'unica differenza che è solidale alla ruota, quindi è ruotata attorno l'asse Y della quantità $\theta(t)$.

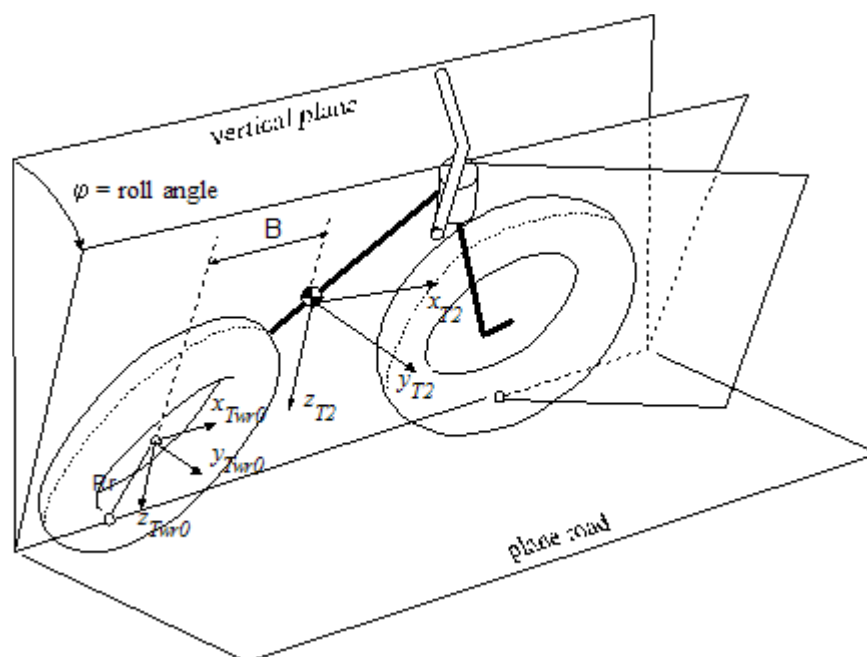


Figura 2: Terne T1, T2 e TWRO

Terna T4: terna fissa con l'avantreno.

Rispetto la terna T2 si effettua dunque una traslazione lungo l'asse X della quantità a_1 (distanza tra baricentro della moto e punto Gf), una rotazione attorno l'asse Y di ϵ (angolo di inclinazione dello sterzo) e una rotazione attorno l'asse Z di $\delta(t)$ (angolo di sterzo).

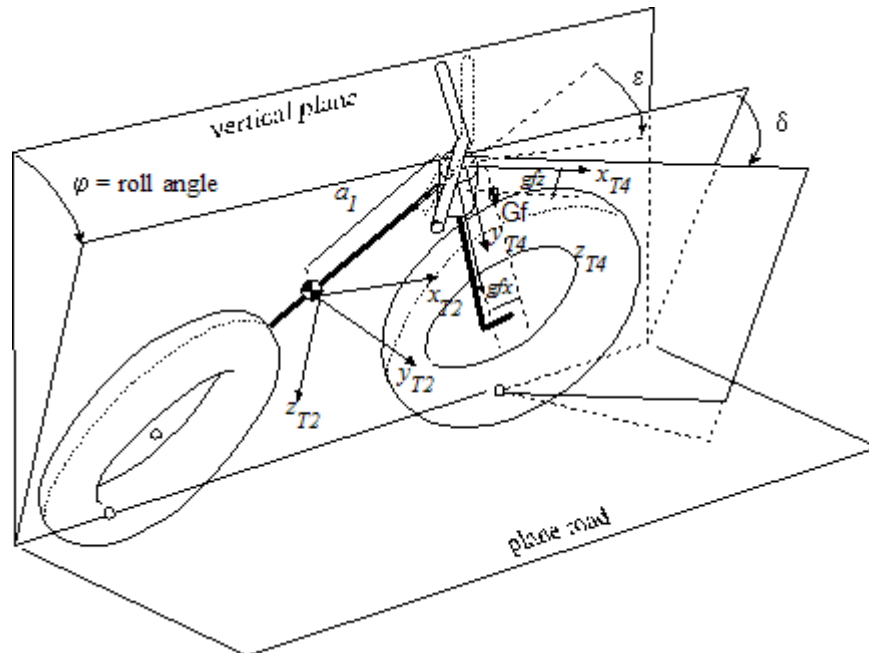


Figura 3 Terne T_1, T_2, T_{wr0} e T_4

In questa terna è definito il punto G_f , baricentro dell'avantreno. Come è rappresentato in Figura 3 Terne T_1, T_2, T_{wr0} e T_4 , tale punto risulta avere coordinate $(g_{fx}, 0, g_{fz})$ in terna T_4 .

Terna T_{4p} : terna con origine nel centro ruota anteriore e asse X orizzontale. Il centro ruota anteriore è chiamato WF , lo stesso punto in condizioni statiche ($\mu(t) = \varphi(t) = \delta(t) = z_{sf}(t) = z(t) = 0$) è chiamato WF_0 .

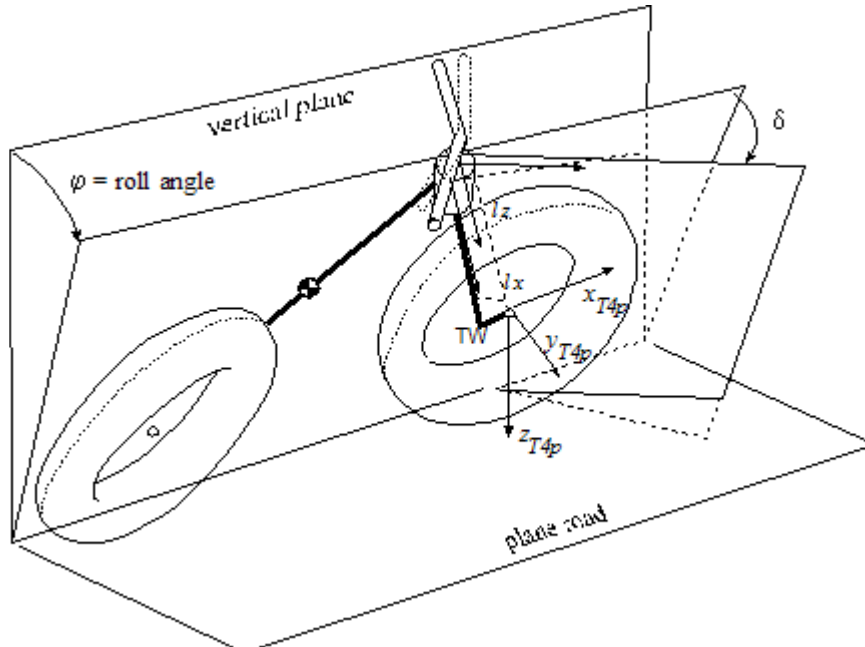


Figura 4 Terna T_{4p}

1.6 Forze attive & reattive:

<code>_gravity</code>	: forza di gravità;
<code>steering_torque</code>	: coppia di sterzo;
<code>Mr(t)</code>	: coppia frenante alla ruota posteriore e coppia motore;
<code>Mf(t)</code>	: coppia frenante alla ruota anteriore;
<code>CA</code>	: forza di drag aerodinamico;
<code>RSZ(t)</code>	: forza sospensione posteriore (precarico, molla, ammortizzatore);
<code>FSZ(t)</code>	: forza sospensione anteriore (precarico, molla, ammortizzatore);
<code>Sr(t), Fr(t), Nr(t)</code>	: forze longitudinale, laterale e verticale agenti sul pneumatico posteriore;
<code>Sf(t), Ff(t), Nf(t)</code>	: forze longitudinale, laterale e verticale agenti sul pneumatico anteriore;

2. STRADA

Il modello della strada è descritto lungo l'ascissa curvilinea. Le grandezze possono essere viste in figura:

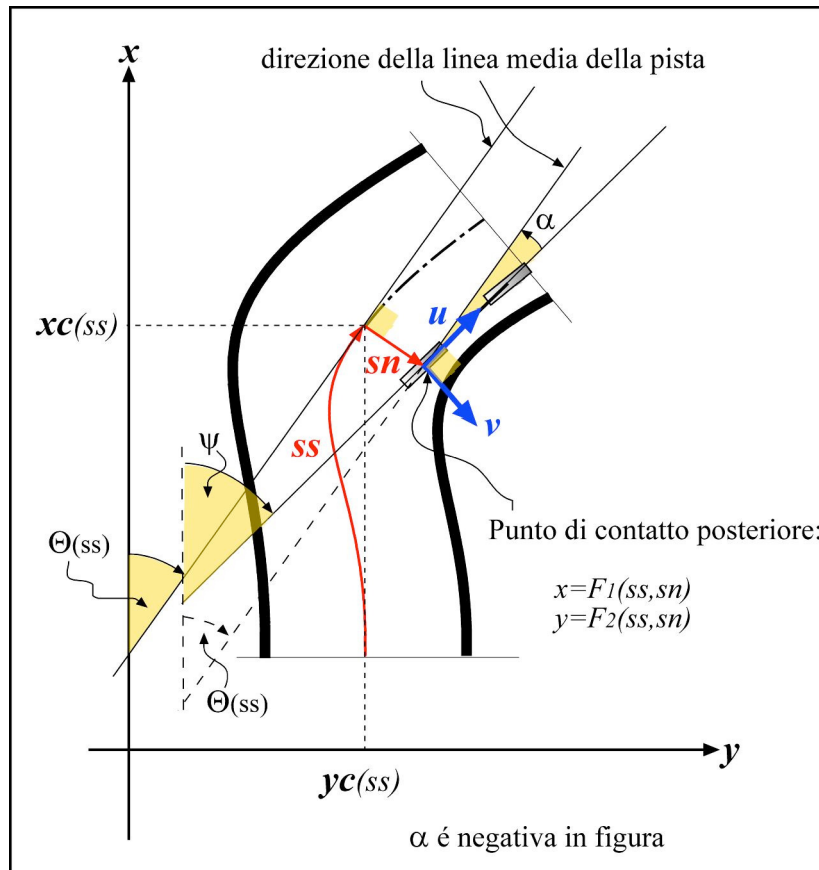


Figura 5 Modello della strada

3. FILE DI INPUT

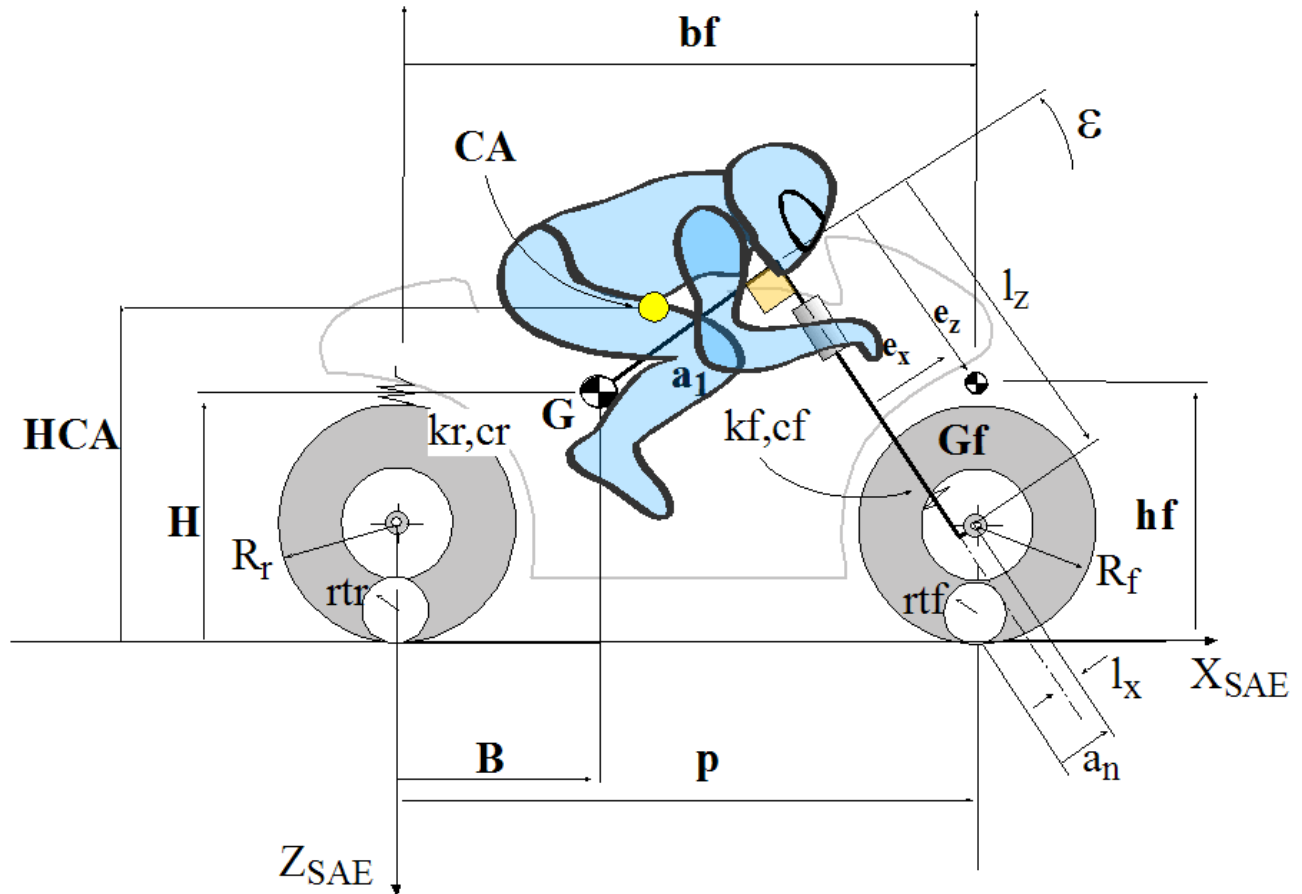


Figura 6 Rappresentazione grafica dei principali parametri geometrici

3.1 Parametri principali:

Rr	=	Raggio della ruota posteriore [m]
Rf	=	Raggio della ruota anteriore [m]
M	=	Massa totale del veicolo compreso il pilota [kg]
B	=	Posizione orizzontale del baricentro complessivo [m]
H	=	Posizione verticale del baricentro complessivo [m]
p	=	Passo [m]
epsilon	=	Inclinazione dell'avantreno [rad]
a_n	=	Avancorsa normale [m]
g	=	Accelerazione di gravità [m/s ²]
hf	=	Posizione verticale del baricentro dell'avantreno [m]
bf	=	Posizione orizzontale del baricentro dell'avantreno [m]
factor	=	Coefficiente moltiplicativo curva di coppia del motore (default=1)
mu	=	Coefficiente di aderenza

Costanti:

Created with

 **nitroPDF** professional

download the free trial online at nitropdf.com/professional

upna

Universidad
Pública de Navarra
Nafarroako
Unibertsitatea Publikoa
Todos los derechos reservados
Eskubide guztiak erresalbatu dira

tau_stab = Coeficiente utile alla stabilizzazione delle equazioni (default=0.01)
 tauF = Coeficiente che regola il filtro sulla velocità di sterzo (default=0.4)

Momenti d'inerzia totali:

CXZ = Momento d'inerzia misto attorno gli assi X e Z dell'intero veicolo [kg*m²]
 IX = Momento d'inerzia principale attorno l'asse X [kg*m²]
 IY = Momento d'inerzia principale attorno l'asse Y [kg*m²]
 IZ = Momento d'inerzia principale attorno l'asse Z [kg*m²]

Avantreno:

mf = Massa dell'avantreno [kg]
 Ifx = Momento d'inerzia principale attorno l'asse X [kg*m²]
 Ify = Momento d'inerzia principale attorno l'asse Y [kg*m²]
 Ifz = Momento d'inerzia principale attorno l'asse Z [kg*m²]

Ruota e pneumatico posteriori:

KlambdaR = C_{λ} pneumatico posteriore [rad⁻¹]
 KphiR = C_{ϕ} pneumatico posteriore [rad⁻¹]
 Rear_DX = Limite di aderenza longitudinale del pneumatico posteriore D_x
 Rear_DY = Limite di aderenza laterale del pneumatico posteriore D_y
 umr = massa non sospesa ruota posteriore (rotanti e non rotanti) [kg]
 mwr = massa rotante equivalente della ruota posteriore [kg] ($I_{ax}=m_{wr} * R_r^2$)
 sigmaR = lunghezza di rilassamento pneumatico posteriore [m]
 r+1 = raggio ridotto della ruota (raggio ruota - raggio toroide) [m]
 rho1 = raggio del toroide del pneumatico posteriore [m]

Ruota e pneumatico anteriori:

KlambdaF = C_{λ} pneumatico anteriore [rad⁻¹]
 KphiF = C_{ϕ} pneumatico anteriore [rad⁻¹]
 Front_DX = Limite di aderenza longitudinale del pneumatico anteriore D_x
 Front_DY = Limite di aderenza laterale del pneumatico anteriore D_y
 umf = massa non sospesa ruota anteriore (rotanti e non rotanti) [kg]
 mwf = massa rotante equivalente della ruota anteriore [kg] ($I_{ax}=m_{wf} * R_f^2$)
 sigmaF = lunghezza di rilassamento pneumatico anteriore [m]
 r+4 = raggio ridotto della ruota (raggio ruota - raggio toroide) [m]
 rho4 = raggio del toroide del pneumatico anteriore [m]

Sospensione posteriore:

RSZ0 = Precarico molla posteriore [N]
 cre = Coeff di smorzamento in estensione per la sospensione posteriore [kg/s]
 crc = Coeff di smorzamento in compressione per la sospensione posteriore [kg/s]
 kr = Rigidezza ridotta posteriore [Nm]

Sospensione anteriore:

FSZ0 = Precarico molla anteriore [N]

Created with

download the free trial online at nitropdf.com/professional

cfe	=	Coeff di smorzamento in estensione per la sospensione anteriore [kg/s]
cfc	=	Coeff di smorzamento in compressione per la sospensione anteriore [kg/s]
kf	=	Rigidezza ridotta anteriore [Nm]

Rigidezze dei pneumatici

kpf	=	rigidezza radiale pneumatico anteriore [N/m]
kpr	=	rigidezza radiale pneumatico posteriore [N/m]

Forza aerodinamica

HCA	=	posizione verticale del punto di applicazione della forza aerodinamica [m]
kD ¹	=	coefficiente di resistenza aerodinamica del motoveicolo [kg/m]

Altri parametri

Cdelta	=	Ammortizzatore di sterzo [Nms/rad]
minimumSpeed	=	Velocità minima [m/s]

Parametri dipendenti (NON EDITABILI)

a2	=	distanza tra CoG e avantreno [m]
lx1	=	offset longitudinale avantreno [m]
lz1	=	lunghezza avantreno [m]
gfx1	=	Coordinata X del centro di gravità dell'avantreno in terna T4 [m]
gfz1	=	Coordinata Z del centro di gravità dell'avantreno in terna T4 [m]

3.2 Controlli

Il modello della motocicletta qui riportato contiene 3 differenti controlli:

- 1- Derivata seconda della coppia di sterzo: **atau**
- 2- Derivata prima della forza sulla ruota posteriore: **vSr**
- 3- Derivata prima della forza sulla ruota anteriore: **vSf**

I controlli possono essere definiti attraverso l'attribuzione di valori numerici alle seguenti variabili:

<controllo>ControlType	=	tipo di controllo (U_QUADRATIC, U_PARABOLA)
<controllo>ControlEpsi	=	valore della penalità del controllo dal quale inizia la parte della funzione che decade esponenzialmente
<controllo>ControlTolerance	=	valore dell'argomento del controllo dal quale inizia la parte della funzione che decade esponenzialmente
<controllo>Max	=	valore massimo del controllo
<controllo>Min	=	valore minimo del controllo

3.3 Penalità

Le funzioni penalità servono per mantenere i valori assunti dai parametri della motocicletta entro i rispettivi limiti fisici che possono essere tradotti matematicamente attraverso una disequazione.

¹ $kD = \frac{1}{2} \rho C_d A$ dove con ρ si indica la densità dell'aria, C_d coefficiente aerodinamico e A area frontale del veicolo.

Risulta così che la forza aerodinamica D è pari a $D = kD * VX^2$

Created with

Queste funzioni attribuiscono un costo alla variabile che controllano quando essa si avvicina al suo limite.

Ci sono 3 tipi diversi di penalità:

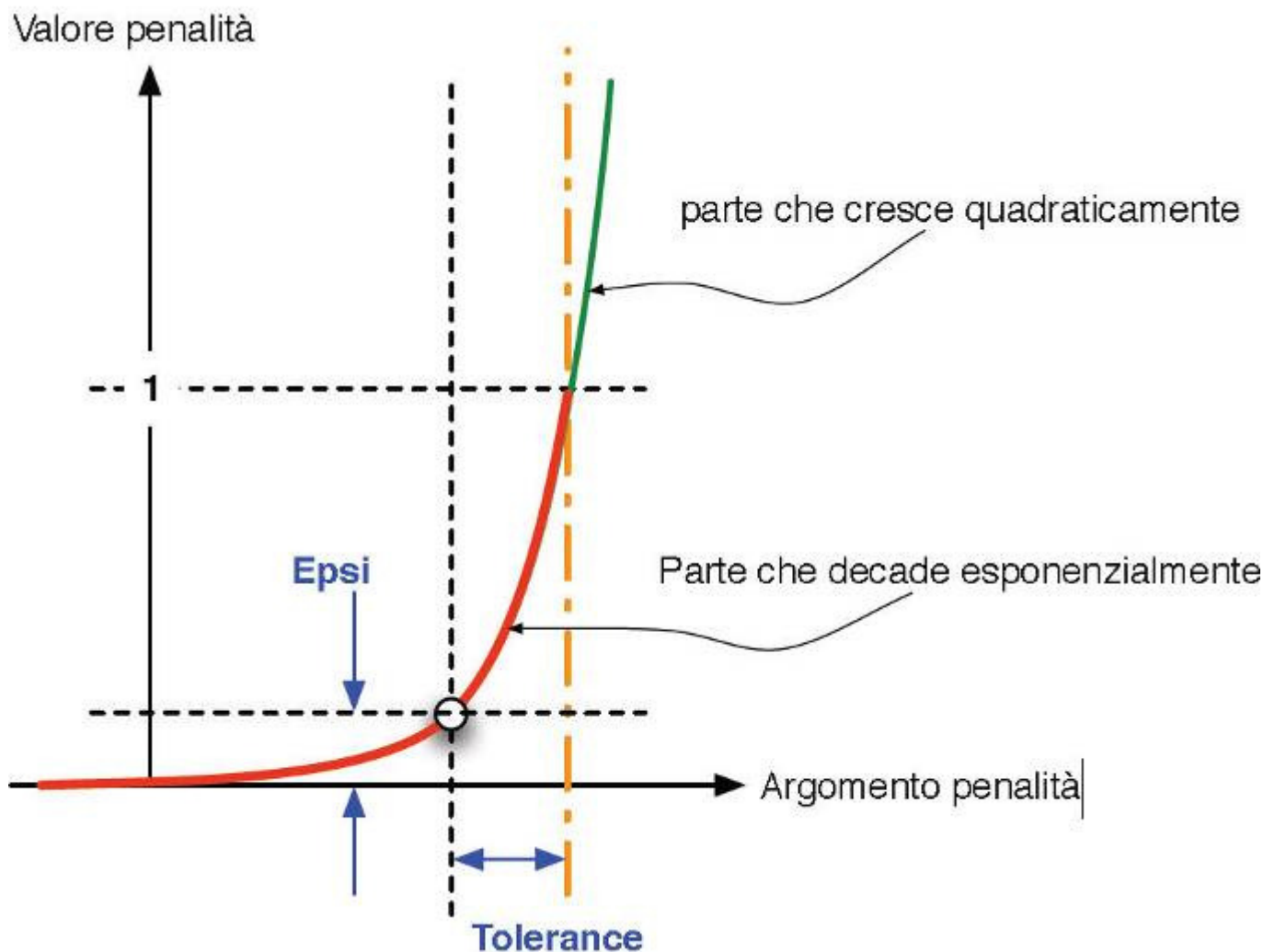
- 1- PenaltyLT che traduce la disequazione: $\text{parametro} < 0$
- 2- PenaltyGT che traduce la disequazione: $\text{parametro} > 0$
- 3- PenaltyBIPOWER che traduce la disequazione: $\text{parametro} < |\text{valore_limite}|$

Ciascuna funzione penalità è regolata nella propria forma attraverso l'uso dei parametri:

WEIGHT: peso da attribuire alla penalità;

EPSI: valore della penalità dalla quale parte il tratto che decade esponenzialmente. Questo parametro è importante perché descrive il comportamento nella parte "centrale" della funzione penalità: un valore molto piccolo permette a XOptima di muoversi in maniera più libera all'interno del range ammissibile dei valori dell'argomento della penalty, ma la convergenza è rallentata.

TOLERANCE: valore che definisce il punto dopo il quale il valore della penalty cresce quadraticamente.



Nel codice sono previste le seguenti funzioni penalità:

`roadRightLateralBoundaries` : bordo destro della corsia
 $(sn - \text{rightWidth}(\zeta)) < 0$

Created with

nitroPDF professional

download the free trial online at nitropdf.com/professional

sn(zeta) = posizione laterale rispetto l'ascissa curvilinea [m];
 rightWidth(zeta) = distanza del bordo destro dal centro della pista [m]

roadLeftLateralBoundaries : bordo sinistro della corsia
 $(sn + leftWidth(\zeta)) > 0$

sn(zeta) = laterale rispetto l'ascissa curvilinea [m];
 leftWidth(zeta) = distanza del bordo sinistro dal centro della pista [m]

FrontAdherenceEllipse : ellisse di aderenza per il pneumatico anteriore

$$\frac{\frac{ff^2}{Front_DY^2} + \frac{sf^2}{Front_DX^2}}{nf(\zeta)^2} - 1 < 0$$

ff(zeta) = Forza laterale agente sul punto di contatto della ruota anteriore adimensionalizzata rispetto il peso;
 sf(zeta) = Forza longitudinale agente sul punto di contatto della ruota anteriore adimensionalizzata rispetto il peso;
 nf(zeta) = Forza normale agente sul pneumatico anteriore adimensionalizzata rispetto il peso.

RearAdherenceEllipse : ellisse di aderenza per il pneumatico posteriore

$$\frac{\frac{fr^2}{Rear_DY^2} + \frac{sr^2}{Rear_DX^2}}{nr(\zeta)^2} - 1 < 0$$

fr(zeta) = Forza laterale agente sul punto di contatto della ruota posteriore adimensionalizzata rispetto il peso;
 sr(zeta) = Forza longitudinale agente sul punto di contatto della ruota posteriore adimensionalizzata rispetto il peso;
 nr(zeta) = Forza normale agente sul pneumatico posteriore adimensionalizzata rispetto il peso.

FrontVerticalLoad : limitazione sulla forza normale agente sul pneumatico anteriore adimensionalizzata rispetto il peso

$$nf(zeta) - NfMin > 0$$

NfMin = valore minimo del carico normale adimensionalizzato rispetto il peso.

RearVerticalLoad : limitazione sulla forza normale agente sul pneumatico anteriore adimensionalizzata rispetto il peso

$$nr(zeta) - NrMin > 0$$

NrMin = valore minimo del carico normale adimensionalizzato rispetto il peso.

limitLongForceDifference : limitazione sulla differenza delle forze longitudinali (adimensionalizzate rispetto il peso) agenti sui pneumatici.

$$sr(zeta) - sf(zeta) < |limitLongForceDifferenceScale|$$

Created with

maxTractionLimit : limita la forza longitudinale di trazione disponibile alla ruota in base alla coppia erogabile dal motore.

$$sr - \frac{\maxTorque \left(\frac{VX}{rear_roll_r} \right)}{rear_roll_r M g} < 0$$

maxTorque = coppia disponibile al perno ruota [N]

rear_roll_r = raggio di rotolamento della ruota posteriore [m]

frontTraction : evita che la ruota anteriore fornisca una spinta propulsiva.

$$sf(zeta) < 0$$

steerAngleConstraint : limita l'angolo di sterzo δ [rad]

$$\delta < |steerAngleConstraintScale|$$

steerRateConstraint : limita la velocità di sterzo $\dot{\delta}$ [rad/s]

$$\dot{\delta} < |steerRateConstraintScale|$$

rollAngleConstraint : limita l'angolo massimo di rollio ϕ [rad]

$$\phi < |rollAngleConstraintScale|$$

rollRateConstraint : limita la velocità di rollio $\dot{\phi}$ [rad/s]

$$\dot{\phi} < |rollRateConstraintScale|$$

yawRateConstraint : limita la velocità di imbardata $\dot{\psi}$ [rad/s]

$$\dot{\psi} < |yawRateConstraintScale|$$

tauConstraint : limita la coppia applicata allo sterzo τ [Nm]

$$\tau < |tauConstraintScale|$$

vtauConstraint : limita la velocità con cui viene applicata la coppia allo sterzo [Nm/s]

$$\dot{\tau} < |vtauConstraintScale|$$

sectionSpeedConstraint : limita la velocità di avanzamento VX [m/s]

$$VX - sectionSpeedLimit(\zeta) < 0$$

minimumSpeedConstraint : definisce la velocità minima di avanzamento [m/s]

$$VX - minimumSpeed > 0$$

steerRateHPConstraint : filtro passa basso per la velocità di sterzo

$$\dot{\delta} - \dot{\delta}_{LP} < |steerRateHPConstraintScale|$$

vtauHPConstraint : filtro passa basso per la velocità della coppia di sterzo

$$v\tau - v\tau_{LP} < |vtauHPConstraintScale|$$

3.4 Condizioni al contorno

Probabilmente costituiscono l'aspetto più critico nella soluzione di un problema a due vincoli, infatti utilizzando una condizione al contorno non consistente non si arriverà alla soluzione del problema. Fondamentalmente le condizioni al contorno fissano lo stato iniziale e finale della variabili del problema. Si possono determinare due possibili condizioni al contorno:

SET boundary condition: viene fissato un valore allo stato iniziale (o finale) della variabile in esame. È una condizione critica perché un valore errato può portare all'inesistenza di una soluzione (ad esempio un valore troppo elevato della velocità iniziale di avanzamento potrebbe costringere la motocicletta ad uscire dalla pista alla prima curva).

FREE boundary condition: non viene fissato il valore iniziale (o finale) della variabile in esame e questo verrà calcolato attraverso l'ottimizzazione (ad esempio lasciando libera la velocità iniziale il software calcolerà la massima velocità iniziale possibile).

All'interno del file di input si trovano le condizioni al contorno per tutti i parametri. Prima viene fissato il tipo di condizione (SET oppure FREE) in seguito è fissato il valore (che viene assegnato solo nel caso di condizione SET).

Viene di seguito proposto a titolo di esempio il template con le condizioni iniziali al contorno e i relativi significati dei parametri.

```
-- Initial Conditions
initial_t           = SET , t_i           = 0 , -- initial time [s]
initial_sn          = SET , sn_i          = 0 , -- initial lateral position [m]
initial_alpha       = SET , alpha_i       = 0 , -- initial relative yaw [rad/s]
initial_zeta_dot    = SET , zeta_dot_i     = 20, -- initial derivate of the curvilinear abscissa [m/s]
initial_VX          = SET , VX_i          = 20, -- initial X velocity [m/s]
initial_VY          = SET , VY_i          = 0 , -- initial Y velocity [m/s]
initial_VZ          = SET , VZ_i          = 0 , -- initial Z velocity [m/s]
initial_z           = SET , z_i           = 0 , -- initial z position [m]
initial_mu          = SET , mu_i          = 0 , -- initial pitch [rad]
initial_phi         = SET , phi_i         = 0 , -- initial roll angle [rad]
initial_omega_X     = SET , omega_X_i     = 0 , -- initial angular velocity X component [rad/s]
initial_omega_Y     = SET , omega_Y_i     = 0 , -- initial angular velocity Y component [rad/s]
initial_omega_Z     = SET , omega_Z_i     = 0 , -- initial angular velocity Z component [rad/s]
initial_delta       = SET , delta_i       = 0 , -- initial steering angle [rad]
initial_delta_dot   = SET , delta_dot_i   = 0 , -- initial steering velocity [rad/s]
initial_delta_dot_LP = SET , delta_dot_LP_i = 0 , -- initial filtered steering velocity [rad/s]
initial_fr          = SET , fr_i          = 0 , -- initial rear lateral force (dimensionless)
initial_ff          = SET , ff_i          = 0 , -- initial front lateral force (dimensionless)
initial_sr          = SET , sr_i          = 0 , -- initial front force (dimensionless)
initial_sf          = SET , sf_i          = -0.01 , --initial rear force (dimensionless)
initial_tau         = SET , tau_i         = 0 , -- initial steering torque [Nm]
initial_vtau        = SET , vtau_i        = 0 , -- initial steering torque [Nm/s]
initial_vtau_LP     = SET , vtau_LP_i     = 0 , -- initial filtered steering torque [Nm/s]
initial_zsr         = SET , zsr_i         = 0 , -- initial rear suspension deflexion [m]
initial_zsr_dot     = SET , zsr_dot_i     = 0 , -- initial rear suspension deflexion rate [m/s]
initial_zsf         = SET , zsf_i         = 0 , -- initial front suspension deflexion [m]
initial_zsf_dot     = SET , zsf_dot_i     = 0 , -- initial front suspension deflexion rate [m/s]
```

le condizioni finali si devono intendere analoghe a quelle iniziali con l'unica differenza del pedice "f" in luogo del pedice "i".

NOTE:

Per facilitare la convergenza si suggeriscono le seguenti regole:

- $zeta_dot_i$: fissare il valore uguale alla velocità iniziale VX_i ;
- sf_i : fissare un valore negativo (default -0.01);
- $delta_dot_f$: fissare il valore (finale) pari a zero (facilita la convergenza e limita le vibrazioni allo sterzo);
- $vtau_f$: fissare il valore (finale) pari a zero (facilita la convergenza e limita le vibrazioni allo sterzo);
- lasciando libere tutte le altre grandezze finali si velocizza la convergenza.

3.5 Motore

Viene inserita al termine del file di input la curva di coppia del motore e i rapporti di trasmissione del cambio. Il software prevede un numero di marce pari a 6.

base_index = indice utile al software da lasciare invariato (default =1)
 wheel_radius = raggio della ruota posteriore (default = Rr)
 gear_ratio0 = rapporto di trasmissione pignone-corona
 gear_ratio = rapporti del cambio (compresi tra parentesi graffe e separati da virgole)

la curva di coppia viene data per punti. A titolo d'esempio il template:

```
torque_curve = {
    { 0 ,      1      *factor},
    { 6000 ,   85.36 *factor},
    { 6500 ,   88.17 *factor},
    { 7000 ,   91.56 *factor},
    { 7500 ,   95.29 *factor},
    { 8000 ,   99.16 *factor},
    { 8500 ,  102.9  *factor},
    { 9000 ,  106.3  *factor},
    { 9500 ,  109.2  *factor},
    {10000 ,  111.3  *factor},
    {10500 ,  112.4  *factor},
    {11000 ,  112.3  *factor},
    {11500 ,  110.7  *factor},
    {12000 ,  107.5  *factor},
    {12500 ,  102.4  *factor},
    {13000 ,  95.16  *factor},
    {13500 ,   1     *factor}
},
```

factor = fattore moltiplicativo della curva di coppia.

Va tenuto presente che il software calcola una *spline cubica* attraverso i punti appena descritti, quindi è vivamente consigliato di descrivere la curva di coppia attraverso un numero abbastanza elevato di punti.

4. FILE DI OUTPUT

Il file di output si presenta come un file nominato *Superbike_results.txt* nel quale sono presenti i valori delle variabili di output in funzione dell'ascissa curvilinea.

Di seguito vengono chiariti i significati delle variabili presenti nel file.

1.	<i>numnode</i>	numero del nodo
2.	<i>zeta</i>	ascissa curvilinea [m]
3.	<i>kappa</i>	curvatura della traiettoria [1/m]
4.	<i>leftWidth</i>	distanza del bordo sinistro dal centro strada [m]
5.	<i>rightWidth</i>	distanza del bordo destro dal centro strada [m]
6.	<i>sectionSpeedLimit</i>	velocità limite della sezione [m/s]
7.	<i>adherence</i>	aderenza
8.	<i>xLane</i>	ascissa della linea media [m]
9.	<i>yLane</i>	ordinata della linea media [m]
10.	<i>theta</i>	imbardata assoluta [rad]
11.	<i>zeta_dot</i>	velocità curvilinea [m/s]
12.	<i>sn</i>	posizione laterale [m]
13.	<i>alpha</i>	imbardata relativa [rad]
14.	<i>VX</i>	velocità longitudinale del baricentro in terna T2 [m/s]
15.	<i>z</i>	scuotimento verticale del baricentro [m]
16.	<i>VZ</i>	velocità verticale del baricentro in terna T2 [m/s]
17.	<i>mu</i>	angolo di beccheggio [rad]
18.	<i>omega_Y</i>	velocità di beccheggio riferita al baricentro in terna T2 [rad/s]
19.	<i>VY</i>	velocità laterale del baricentro in terna T2 [m/s]
20.	<i>omega_Z</i>	velocità di imbardata riferita al baricentro in terna T2 [rad/s]
21.	<i>phi</i>	angolo di rollio [rad]
22.	<i>omega_X</i>	velocità di rollio riferita al baricentro in terna T2 [rad/s]
23.	<i>delta</i>	angolo di sterzo [rad]
24.	<i>delta_dot</i>	velocità di sterzo [rad/s]
25.	<i>fr</i>	forza laterale sul pneumatico anteriore (adimensionalizzata rispetto il peso)
26.	<i>ff</i>	forza longitudinale sul pneumatico anteriore (adimensionalizzata rispetto il peso)
27.	<i>zsr</i>	deformazione verticale della sospensione posteriore [m]
28.	<i>zsr_dot</i>	velocità di deformazione della sospensione posteriore [m/s]
29.	<i>zsf</i>	deformazione verticale della sospensione anteriore [m]
30.	<i>zsf_dot</i>	velocità di deformazione della sospensione anteriore [m/s]
31.	<i>sf</i>	forza longitudinale sul pneumatico anteriore (adimensionalizzata rispetto il peso)
32.	<i>sr</i>	forza longitudinale sul pneumatico posteriore (adimensionalizzata rispetto il peso)
33.	<i>tau</i>	coppia di sterzo [N]
34.	<i>vtau</i>	velocità della coppia di sterzo [N/s]
35.	<i>vtau_LP</i>	velocità filtrata della coppia di sterzo [N/s]
36.	<i>delta_dot_LP</i>	velocità di sterzo filtrata [N/s]
37.	<i>t</i>	tempo [s]
38.	<i>lambda1</i>	} integratori
:		
64.	<i>lambda27</i>	
65.	<i>vSr</i>	variazione temporale della spinta longitudinale <i>sr</i> sul pneumatico posteriore [N/s]
66.	<i>vSf</i>	variazione temporale della spinta longitudinale <i>sf</i> sul pneumatico anteriore [N/s]
67.	<i>atau</i>	accelerazione della coppia di sterzo [N/s ²]
68.	<i>vSrControl</i>	controllo sulla <i>vSr</i>
69.	<i>vSfControl</i>	controllo sulla <i>vSf</i>
70.	<i>atauControl</i>	controllo su <i>atau</i>
71.	<i>roadRightLateralBoundaries</i>	penalty relativa al bordo destro della strada
72.	<i>roadLeftLateralBoundaries</i>	penalty relativa al bordo sinistro della strada
73.	<i>FrontVerticalLoad</i>	penalty relativa al carico verticale della ruota anteriore







74.	<i>RearVerticalLoad</i>	penalty relativa al carico verticale della ruota posteriore
75.	<i>FrontAdherenceEllipse</i>	penalty relativa all'ellisse di aderenza del pneumatico anteriore
76.	<i>RearAdherenceEllipse</i>	penalty relativa all'ellisse di aderenza del pneumatico posteriore
77.	<i>limitLongForceDifference</i>	penalty relativa alla differenza tra le spinte longitudinali agenti sui pneumatici
78.	<i>maxTractionLimit</i>	penalty relativa alla spinta disponibile fornita dal motore
79.	<i>frontTraction</i>	penalty relativa alla spinta sulla ruota anteriore
80.	<i>steerAngleConstraint</i>	penalty relativa all'angolo di sterzo
81.	<i>steerRateConstraint</i>	penalty relativa alla velocità di sterzo
82.	<i>steerRateHPConstraint</i>	penalty relativa alla velocità di sterzo filtrata
83.	<i>tauConstraint</i>	penalty relativa alla coppia di sterzo
84.	<i>vtauHPConstraint</i>	penalty relativa alla velocità della coppia di sterzo filtrata
85.	<i>rollAngleConstraint</i>	penalty relativa all'angolo di rollio
86.	<i>rollRateConstraint</i>	penalty relativa alla velocità di rollio
87.	<i>yawRateConstraint</i>	penalty relativa alla velocità di imbardata
88.	<i>sectionSpeedConstraint</i>	penalty relativa alla velocità massima associata al tratto corrispondente
89.	<i>minimumSpeedConstraint</i>	penalty relativa alla velocità minima associata al tratto corrispondente
90.	<i>u</i>	velocità longitudinale del baricentro proiettata in terna T1 [m/s]
91.	<i>v</i>	velocità laterale del baricentro proiettata in terna T1 [m/s]
92.	<i>mu_dot</i>	velocità di beccheggio in terna T1 [m/s]
93.	<i>psi_dot</i>	velocità di imbardata in terna T1 [m/s]
94.	<i>phi_dot</i>	velocità di rollio in terna T1 [m/s]
95.	<i>udot[m/s²]</i>	accelerazione longitudinale [m/s ²]
96.	<i>rear_rolling_radius</i>	raggio di rotolamento posteriore [m]
97.	<i>front_rolling_radius</i>	raggio di rotolamento anteriore [m]
98.	<i>xLeft</i>	ascissa del bordo destro [m]
99.	<i>yLeft</i>	ordinata del bordo destro [m]
100.	<i>xRight</i>	ascissa del bordo sinistro [m]
101.	<i>yRight</i>	ordinata del bordo sinistro [m]
102.	<i>xTrajectory</i>	ascissa della traiettoria [m]
103.	<i>yTrajectory</i>	ordinate della traiettoria [m]
104.	<i>max_Torque</i>	massima coppia disponibile a terra [Nm]
105.	<i>max_Traction</i>	massima forza propulsiva disponibile a terra [N]
106.	<i>torque_at_rear_wheel</i>	coppia a terra utilizzata [Nm]
107.	<i>RearLongitudinalForce</i>	forza longitudinale agente sul pneumatico posteriore [N]
108.	<i>RearLateralForce</i>	forza laterale agente sul pneumatico posteriore [N]
109.	<i>RearVerticalForce</i>	forza verticale agente sul pneumatico posteriore [N]
110.	<i>FrontLongitudinalForce</i>	forza longitudinale agente sul pneumatico anteriore [N]
111.	<i>FrontLateralForce</i>	forza laterale agente sul pneumatico anteriore [N]
112.	<i>FrontVerticalForce</i>	forza verticale agente sul pneumatico anteriore [N]
113.	<i>ff/nf</i>	rapporto tra forza laterale e carico sul pneumatico anteriore
114.	<i>sf/nf</i>	rapporto tra forza longitudinale e carico sul pneumatico anteriore
115.	<i>FrontTireEngagement</i>	quota di aderenza del pneumatico anteriore utilizzata [0:1] ²
116.	<i>fr/nr</i>	rapporto tra forza laterale e carico sul pneumatico posteriore
117.	<i>sr/nr</i>	rapporto tra forza longitudinale e carico sul pneumatico posteriore
118.	<i>RearTireEngagement</i>	quota di aderenza del pneumatico posteriore utilizzata [0:1]
119.	<i>RearSuspForce</i>	forza agente sulla sospensione posteriore [N]
120.	<i>FrontSuspForce</i>	forza agente sulla sospensione anteriore [N]
121.	<i>RearSideslip</i>	angolo di slip posteriore [rad]
122.	<i>FrontSideslip</i>	angolo di slip anteriore [rad]
123.	<i>RearWheelSpinVelocity</i>	velocità di rotazione della ruota posteriore [rad/s]
124.	<i>FrontWheelSpinVelocity</i>	velocità di rotazione della ruota anteriore [rad/s]

$$^2_{front_engagment} = \frac{\left(\frac{f_f}{FrontDX}\right)^2 + \left(\frac{s_f}{FrontDY}\right)^2}{n_f^2}$$


5. GUIDA ALL'UTILIZZO

Per poter utilizzare correttamente il software devono essere seguiti i seguenti passi:


1. Inserire all'interno della stessa cartella dell'eseguibile i seguenti file *.dll:

-  *3D_road.dll*
-  *blas_win32.dll*
-  *FortranLibs.dll*
-  *lapack_win32.dll*
-  *lua5.1.dll*
-  *pthread-2-7-0-i686.dll*



2. Inserire nella stessa cartella il seguenti file necessario al codice per la lettura corretta della pista.

-  *Circuit.lua*

All'interno di questo file (in linguaggio LUA) è possibile scrivere delle istruzioni che il programma eseguirà prima della simulazione. Ad esempio in questo file è possibile ordinare l'esecuzione del *RoadConverter.exe*. questo eseguibile traduce in un formato utilizzabile dalla manovra ottima le piste e i tracciati descritti dall'utente attraverso un insieme di punti X-Y oppure attraverso la definizione di alcuni punti chiave e la loro tangente locale. Se non si vuole utilizzare il convertitore per la pista si deve inserire manualmente il file relativo al tracciato che si vuole utilizzare:

-  *track.lua*

3. Editare il file *Motorcycle.lua* con i valori dei parametri relativi alla motocicletta che si vuole simulare. Come descritto ai paragrafi precedenti è necessario impostare anche i valori delle penalties e dei controlli.
4. Eseguire *SUPERBIKE.EXE*.
5. Al termine dell'esecuzione del programma (sia in caso di corretta convergenza che in caso di mancata convergenza) vengono creati i seguenti file:

-  *Superbike_results.txt*
-  *Superbike_torque.txt*




Il primo file racchiude tutti i parametri in output come descritto al paragrafo precedente, il secondo file riporta la curva di coppia del motore utilizzata durante la simulazione.

6. ANALISI DEI RISULTATI

6.1 Confronto con i modelli precedenti

Come primo passo per la validazione del nuovo modello di motocicletta con sospensioni agganciato al nuovo solutore matematico si sono andati a confrontare i modelli precedentemente sviluppati all'interno di MDRG e che a loro volta avevano prodotto risultati significativamente attendibili.

Vengono di seguito presentati dei grafici relativi al confronto tra i vari modelli di motocicli sviluppati e i relativi solutori. Nello specifico sono messi a confronto:

-  **SUPERBIKE**: Nuovo modello di motocicletta con sospensioni e nuovo solutore.
-  **BIKE**: Nuovo modello di motocicletta senza sospensioni e nuovo solutore.
-  **OLDBIKE**: Vecchio modello di motocicletta senza sospensioni e vecchio solutore.

L'associazione tra colori e modello verranno mantenuti per tutto il paragrafo.

Vengono presi in esame diverse simulazioni effettuate con lo stesso motocicletta (Ducati 999 RS 180 CV) ma condotte su diversi tracciati per investigare diverse manovre.

Per poter mettere a confronto le tre soluzioni nel modello con sospensioni (Xoptima2008 SUPERBIKE) viene conferita alle molle anteriori e posteriori delle sospensioni una rigidità molto elevata in modo tale da rendere minimo il movimento dato dalle stesse.

6.1.1 Rettilineo

La simulazione ha lo scopo di verificare che il nuovo modello SUPERBIKE (moto con sospensioni) simuli in modo corretto il trasferimento di carico che avviene nelle fasi di accelerazione e frenata.

A scopo di ciò viene lanciata la motocicletta a 30 m/s lungo un rettilineo di lunghezza totale 300m con una condizione finale per la velocità di avanzamento di soli 10 m/s.

Si suppone pertanto che la moto ad inizio simulazione acceleri violentemente per poi frenare e raggiungere la velocità imposta a fine rettilineo.

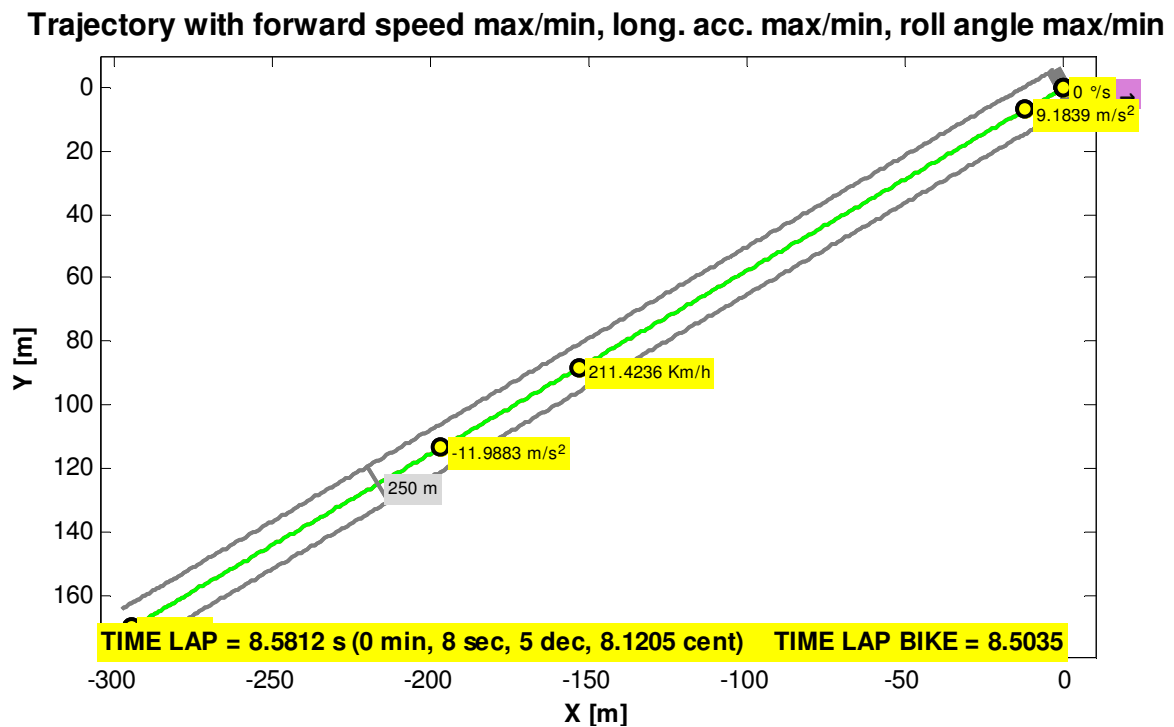


Figura 7 Traiettorie: Superbike VS Bike

Ovviamente la motocicletta rimane sempre perfettamente in condizioni di rollio nullo, quindi non si nota alcuna differenza nelle traiettorie.

Si registra un'accelerazione iniziale fino ad una velocità massima di circa 211 km/h per poi frenare violentemente (raggiungendo una decelerazione massima di 9.1839 m/s²).

La differenza in termini di tempo tra modello SUPERBIKE e BIKE è di circa 8 centesimi.

Vista la differenza tra i due modelli BIKE e SUPERBIKE si va ora ad analizzare quale sia la differenza tra il nuovo modello SUPERBIKE ed il vecchio modello OLDBIKE utilizzato fino ad oggi nella vecchia versione della Manovra Ottima.

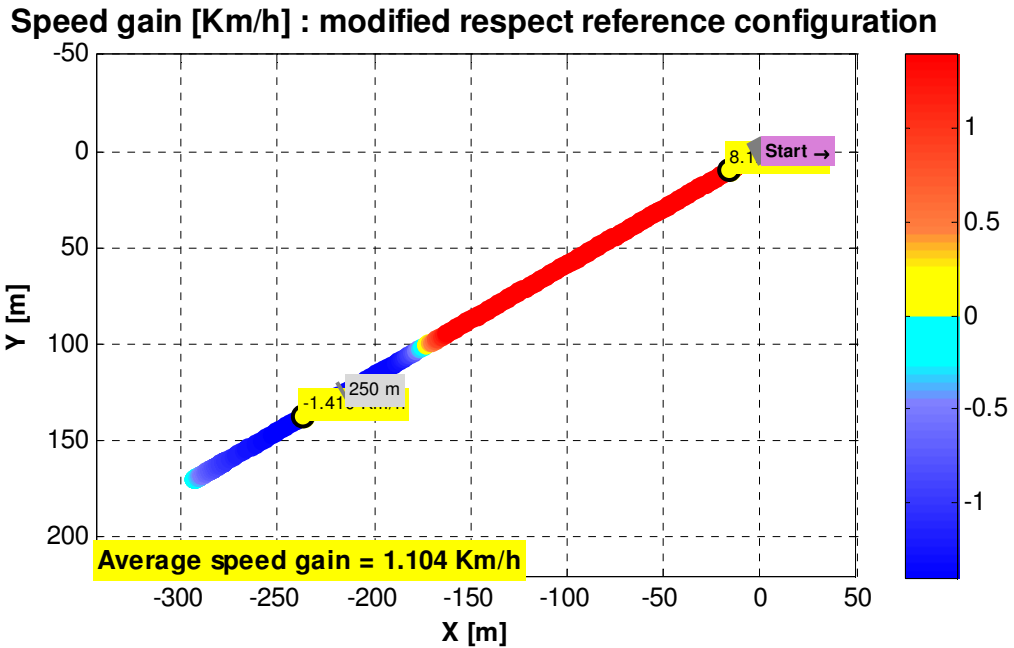


Figura 8: Velocità di percorrenza: SUPERBIKE VS OLDBIKE

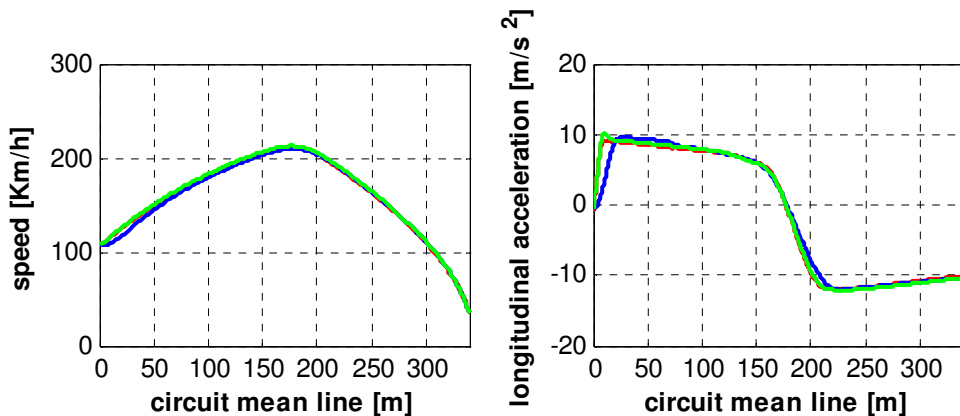


Figura 9: Velocità di avanzamento e accelerazione longitudinale

Si noti come i due modelli SUPERBIKE e BIKE agganciati al nuovo solutore riescano ad accelerare più rapidamente rispetto al vecchio modello OLDBIKE. Questo è da attribuire principalmente alle potenzialità maggiori del nuovo solutore e alla differenza nei controlli.

Nella simulazione qui riportata, infatti, si è dovuto mantenere il valore del controllo a_{Sr} e a_{Sf} (accelerazioni dei carichi normali sulle ruote posteriore e anteriore) limitato a $\pm 25000 \text{ Nm/s}^3$, in quanto un valore maggiore impediva la convergenza al modello. Nei nuovi modelli SUPERBIKE e BIKE, invece, la motocicletta è controllata attraverso v_{Sr} e v_{Sf} (velocità dei carichi normali sulle ruote posteriore e anteriore) e si riescono a aggiungere performance più elevate.

Tutto ciò è ancora più evidente andando ad analizzare i grafici relativi ai carichi agenti sui pneumatici anteriore e posteriore riportati nei grafici seguenti:

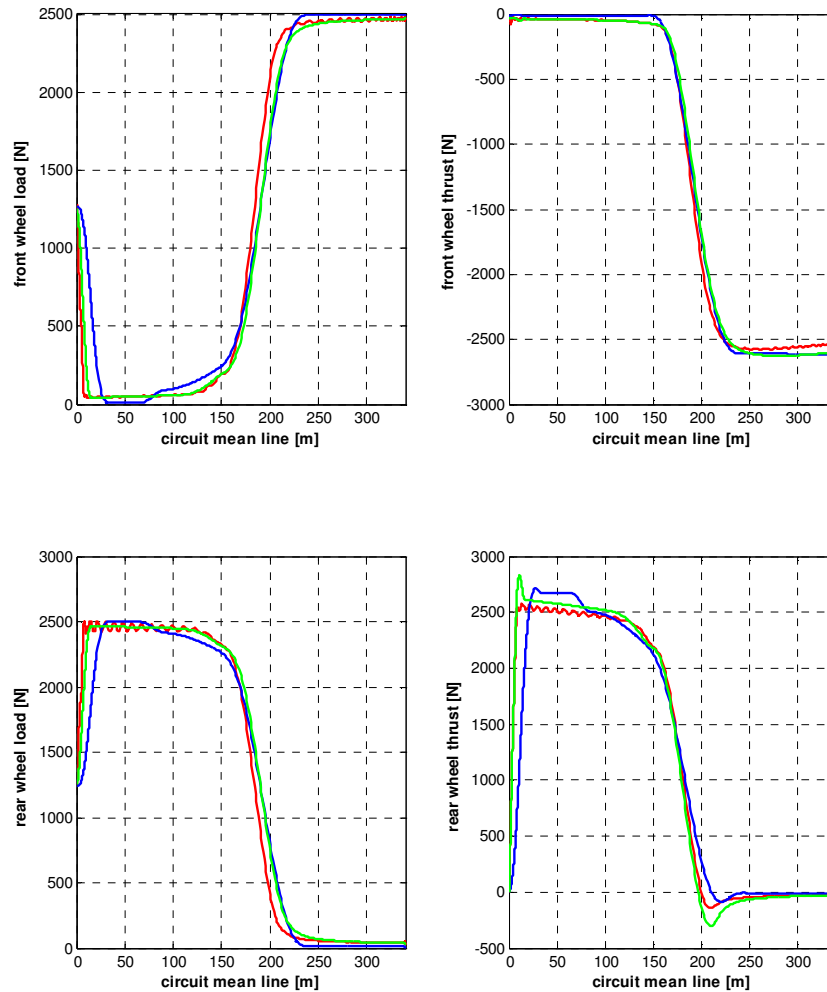


Figura 10: Carico normale e spinta longitudinale sui pneumatici

I dati in output si possono definire concordi tra loro, quindi il nuovo modello SUPERBIKE simula correttamente la motocicletta in condizioni di angolo di rollio nullo.

Inoltre si può affermare che il nuovo solutore apporti potenzialità maggiori in termini di capacità di calcolo e permetta il raggiungimento di performance più elevate.

6.1.2 Ovale

Viene lanciata la motocicletta a 30 m/s in senso orario all'interno di un ovale i cui rettilinei sono lunghi 300m, le curve sono costituite da due semicerchi di 50m di raggio. Essa compie un giro completo partendo da metà di un rettilineo e le vengono lasciati liberi i valori finali. Di seguito è riportato il confronto tra le traiettorie di SUPERBIKE e BIKE.

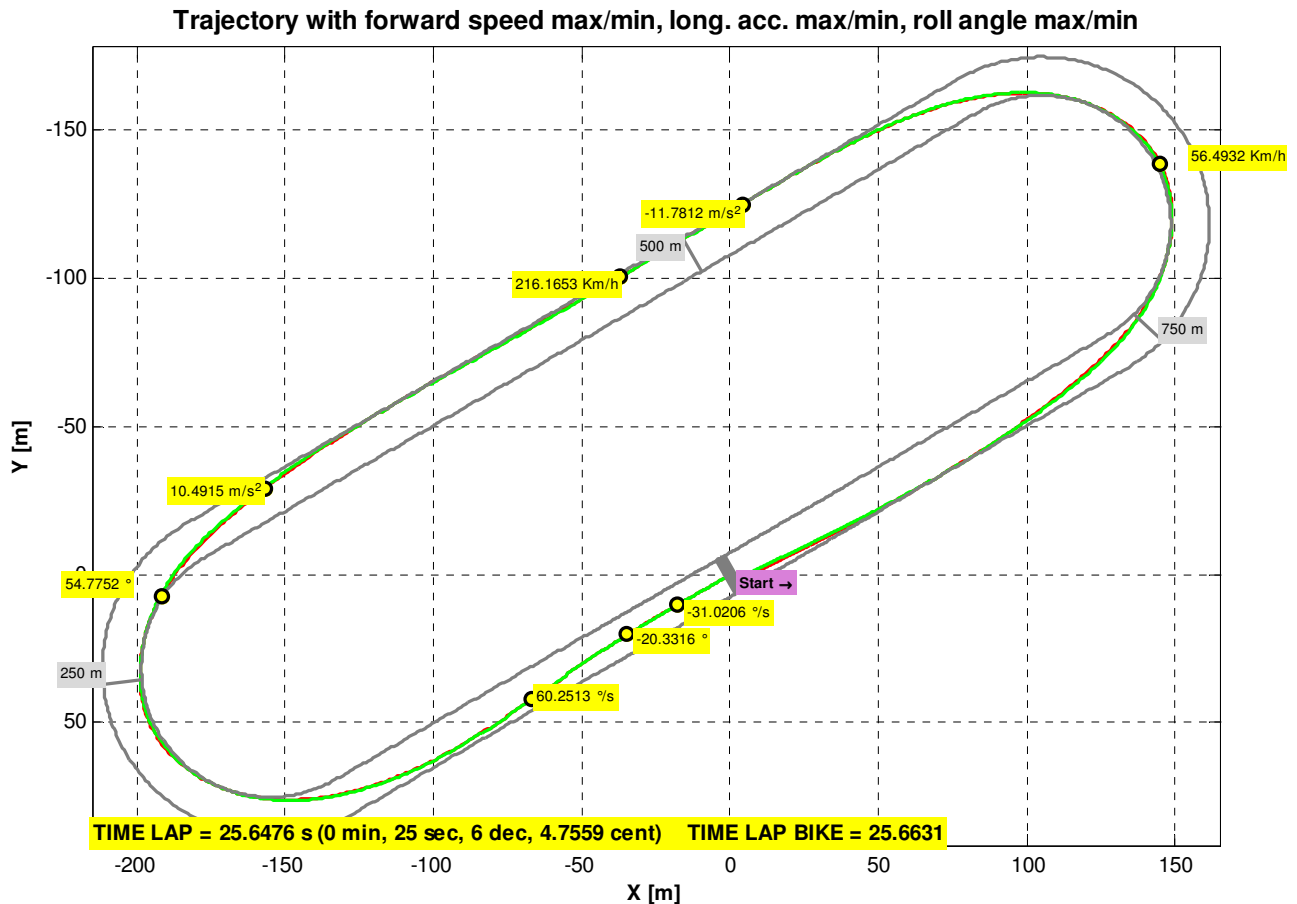


Figura 11 Traiettorie: Superbike VS Bike

La differenza in termini di tempo è di 0.0155s.

Speed gain [Km/h] : modified respect reference configuration

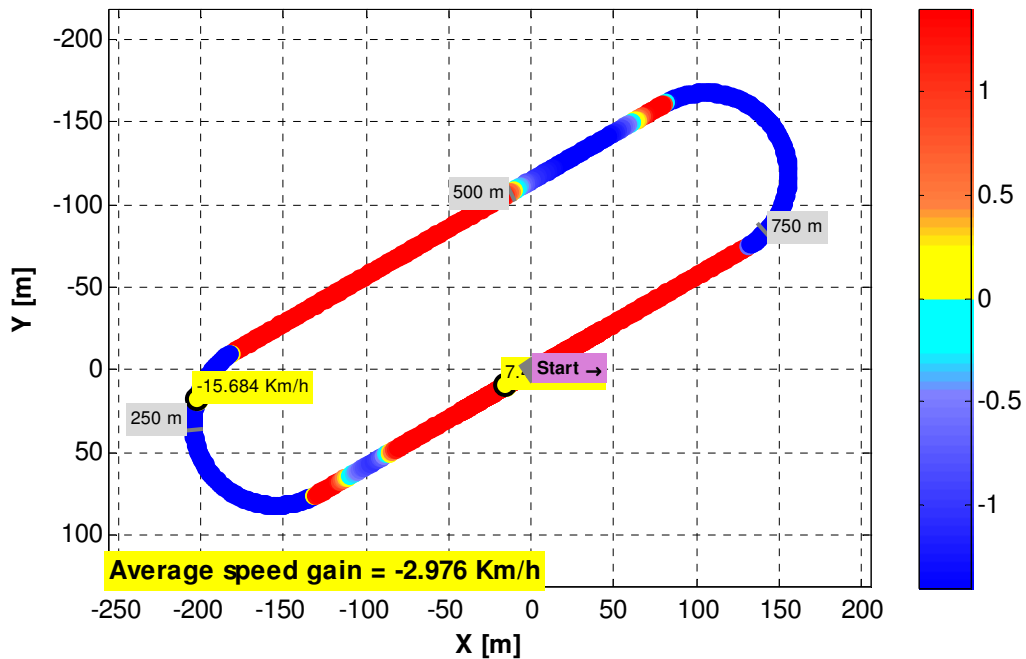


Figura 12: Velocità di percorrenza: SUPERBIKE VS OLDBIKE

Viene di seguito analizzata la seconda curva che compone l'ovale. I grafici seguenti faranno riferimento a questo tratto di pista.

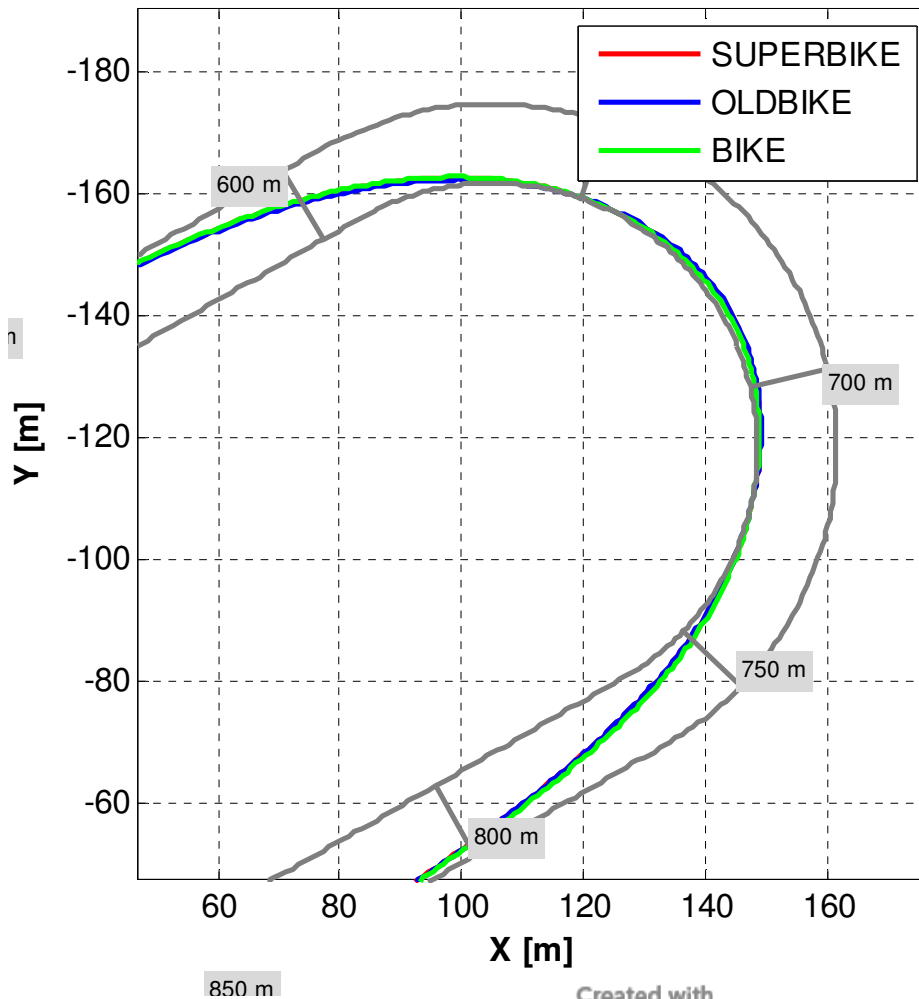


Figura 13: Zoom traiettorie

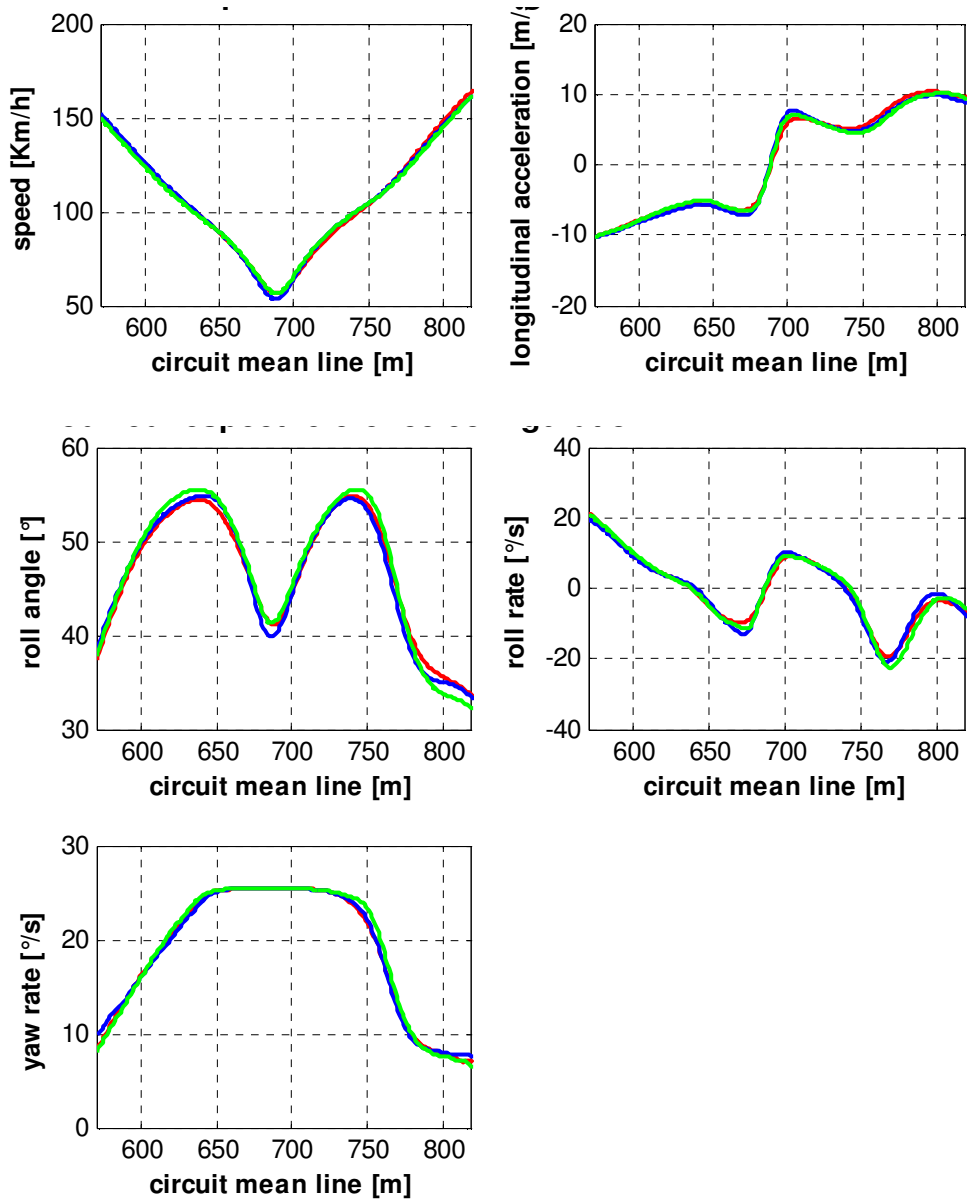


Figura 14: Velocità, accelerazione longitudinale, angolo di rollio, velocità di rollio e velocità di imbardata

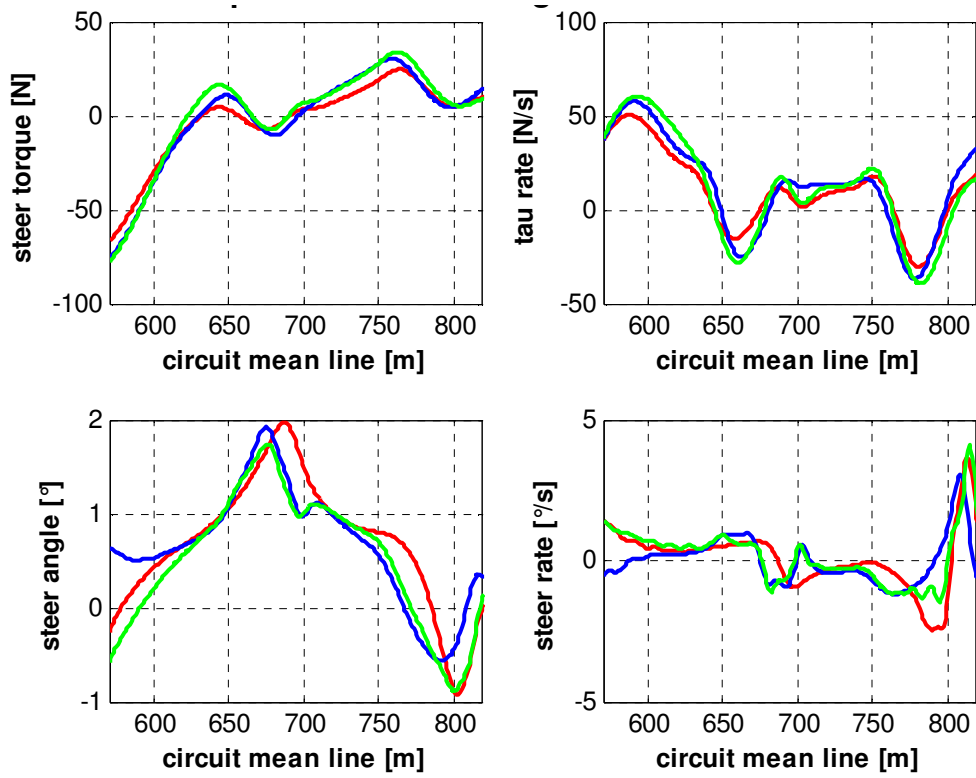


Figura 15: Coppia e angolo di sterzo con le relative velocità

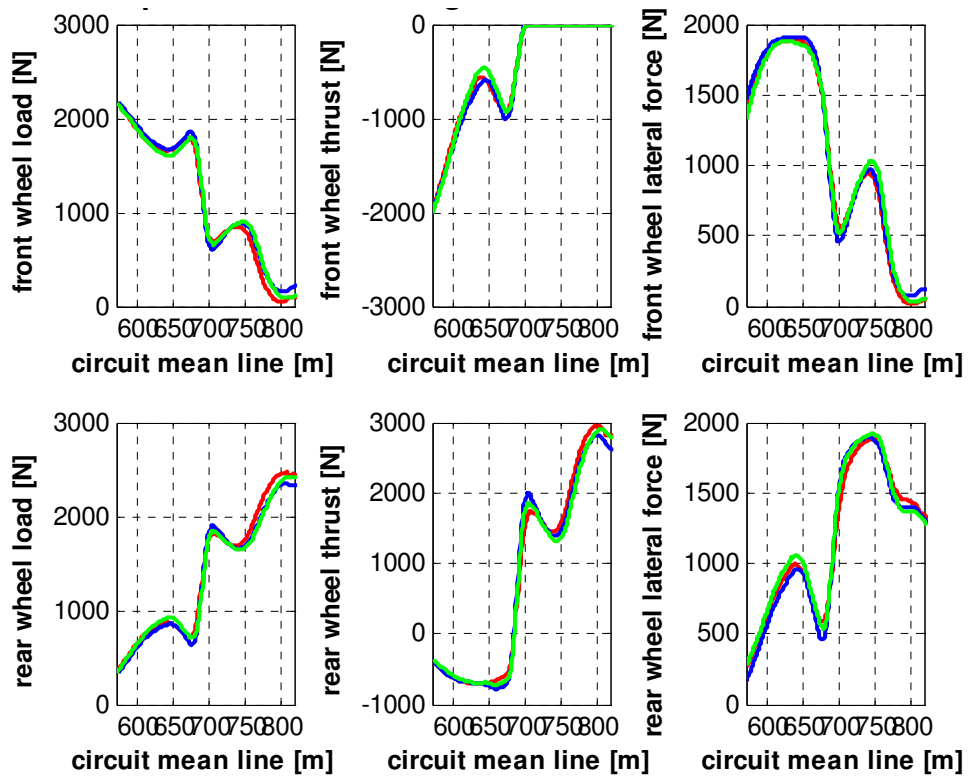


Figura 16: Carichi e forze sui pneumatici anteriore e posteriore

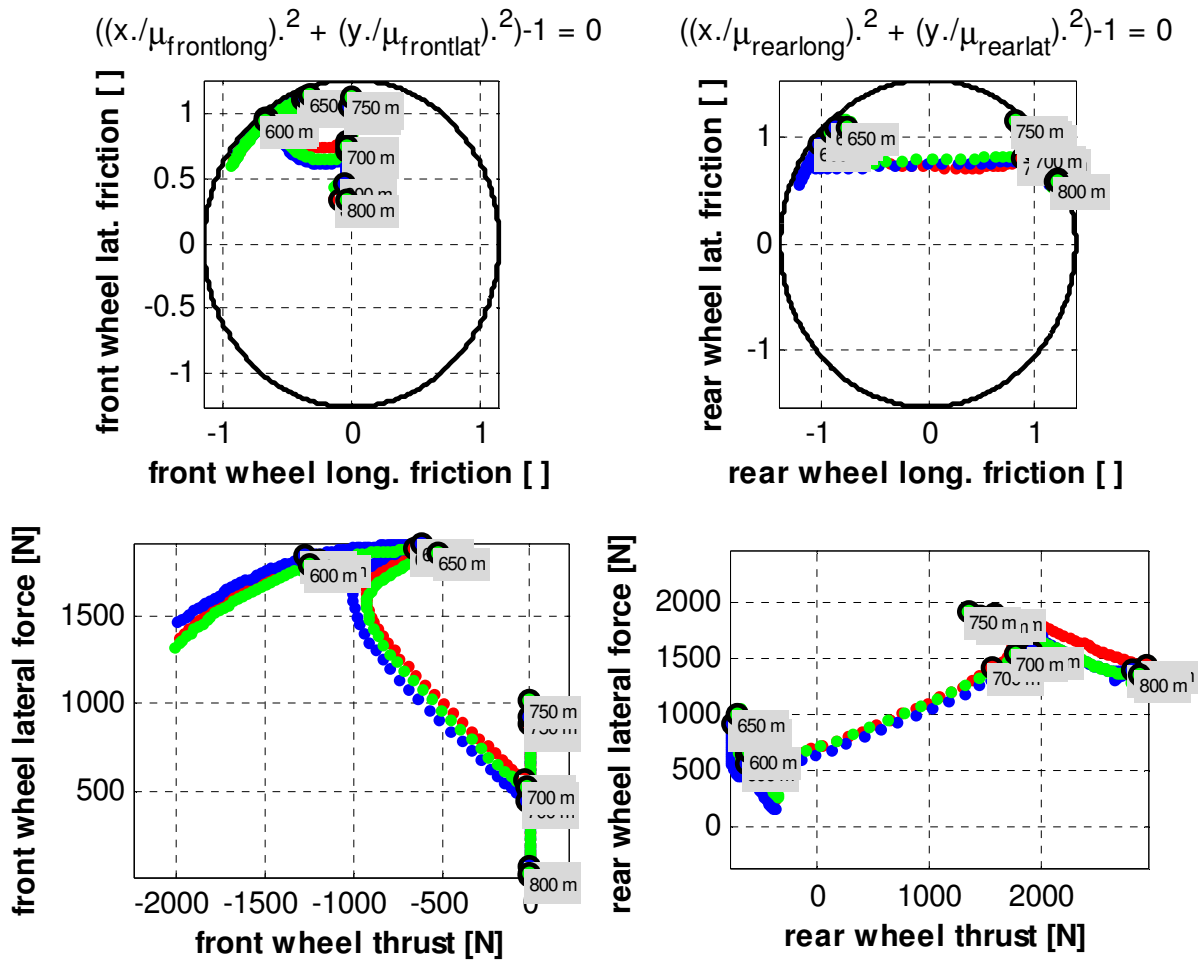


Figura 17: Ellissi di trazione

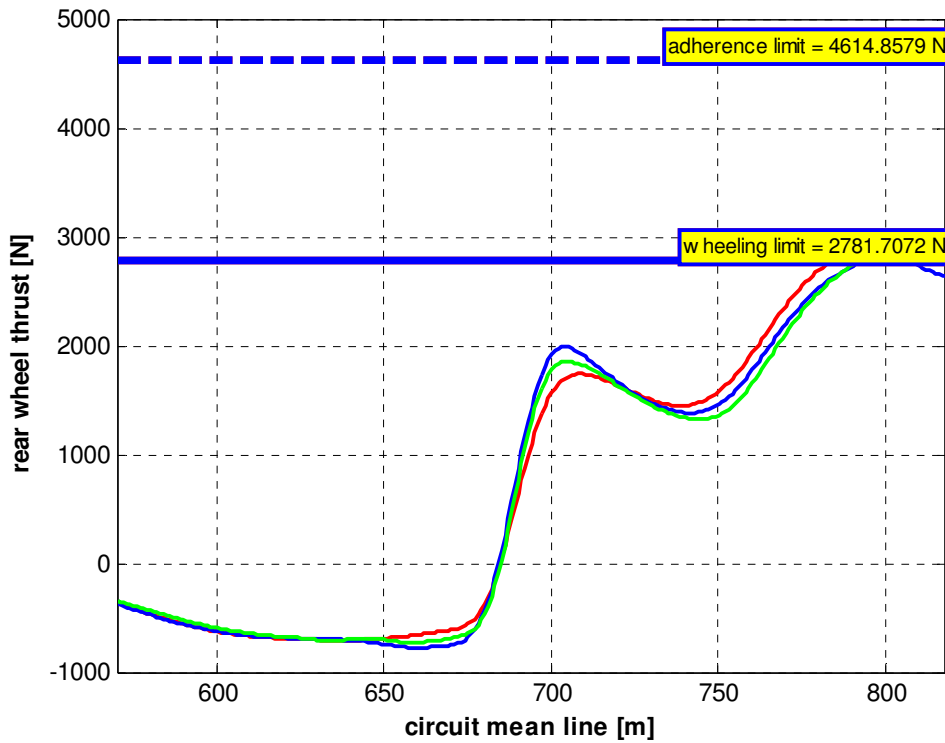


Figura 18: Spinta alla ruota posteriore

Created with

Questa simulazione è stata condotta allo scopo di verificare il comportamento della motocicletta in condizioni transitorie e stazionarie ed in presenza di un angolo di rollio diverso da zero.

Le maggiori differenze tra i modelli si verificano per i valori in output relativi all'angolo di sterzo, alla sua velocità e alla coppia applicata.

Tali discrepanze sono da attribuire fondamentalmente alla presenza delle sospensioni (le quali, anche se molto rigide, comunque vibrano) nel modello SUPERBIKE e la differenza nel metodo di controllo nei modelli BIKE e SUPERBIKE (che agiscono sulla velocità di variazione della forza normale ai pneumatici e non sull'accelerazione come nel modello OLDBIKE). Gli andamenti delle curve e i valori massimi e minimi, comunque, sono gli stessi, per cui si può concludere che anche in queste condizioni i tre modelli forniscano risultati paragonabili e altrettanto attendibili.

6.1 Circuito di Santa Monica in Misano Adriatico (RN)

Per verificare l'attendibilità dei risultati si è scelto di andare ad applicare il software *XOptima2008* ad un circuito reale, in particolare il nuovo tracciato di Misano Adriatico (RN), il circuito di Santa Monica. Il tracciato, recentemente, è stato completamente rivisitato per motivi di sicurezza, è stato invertito il senso di marcia, ma sono state modificate anche alcune curve.

Oggi il circuito, dalle immagini satellitari, si presenta in questo modo:



Figura 19 Circuito di Santa Monica: vista satellitare

In questo circuito si ha a disposizione la telemetria relativa ad una motocicletta Ducati 999RS con una potenza massima di circa 180CV e guidata da un pilota professionista durante le sessioni di prova, di qualifiche e di gara del campionato CIV (Campionato Italiano Velocità).

Dal confronto dei risultati in output al software e i dati registrati dalla telemetria si vuole andare a verificare l'esattezza e quindi l'efficacia di previsione del modello.

Si è quindi proceduto con la compilazione del file *Motorcycle.lua* (come mostrato ai capitoli precedenti) in modo tale che la motocicletta *virtuale* abbia le stesse caratteristiche geometriche e dinamiche di quella veramente guidata nel circuito di Misano.

6.1.1 Risultati della simulazione

Di seguito sono riportati i risultati della simulazione lungo il tracciato in questione.

Il grafico seguente riporta la migliore traiettoria che il software ha calcolato per percorrere il circuito nel minore tempo possibile.

Come risultato della simulazione otteniamo un tempo sul giro pari a:

XOptima2008 100.7061 s -> 1 min 40 sec 0.60875 cent

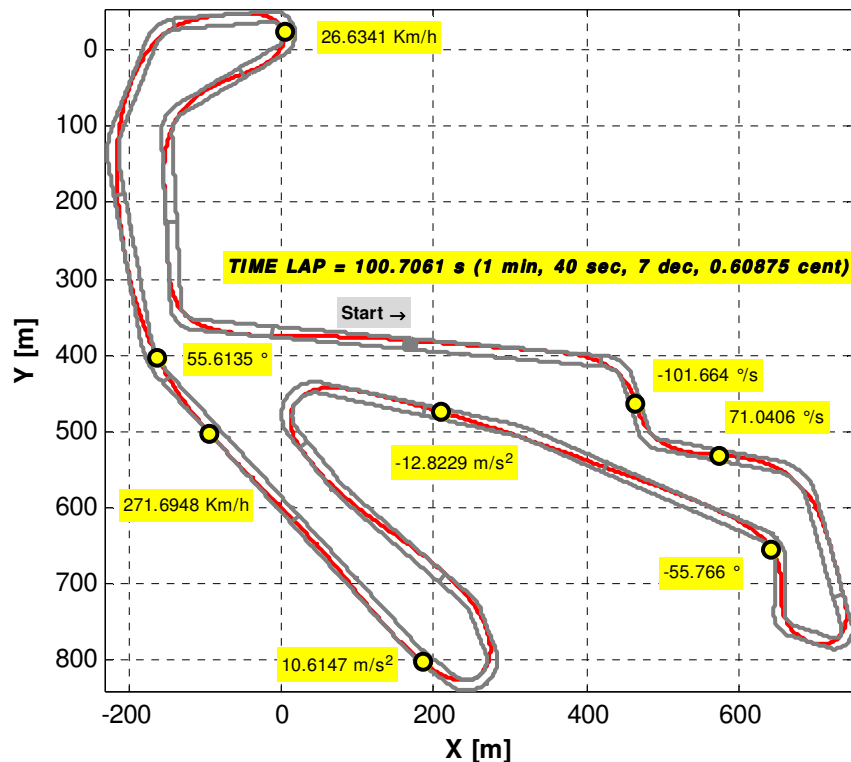


Figura 20 Traiettoria Ottima

Nella figura sono inoltre mostrati i valori massimi e minimi per quanto riguarda la velocità di avanzamento, l'accelerazione longitudinale e l'angolo e la velocità di rollio.

Con i rapporti del cambio impostati di default si ottiene il seguente grafico che riporta l'utilizzo del cambio all'interno del circuito:

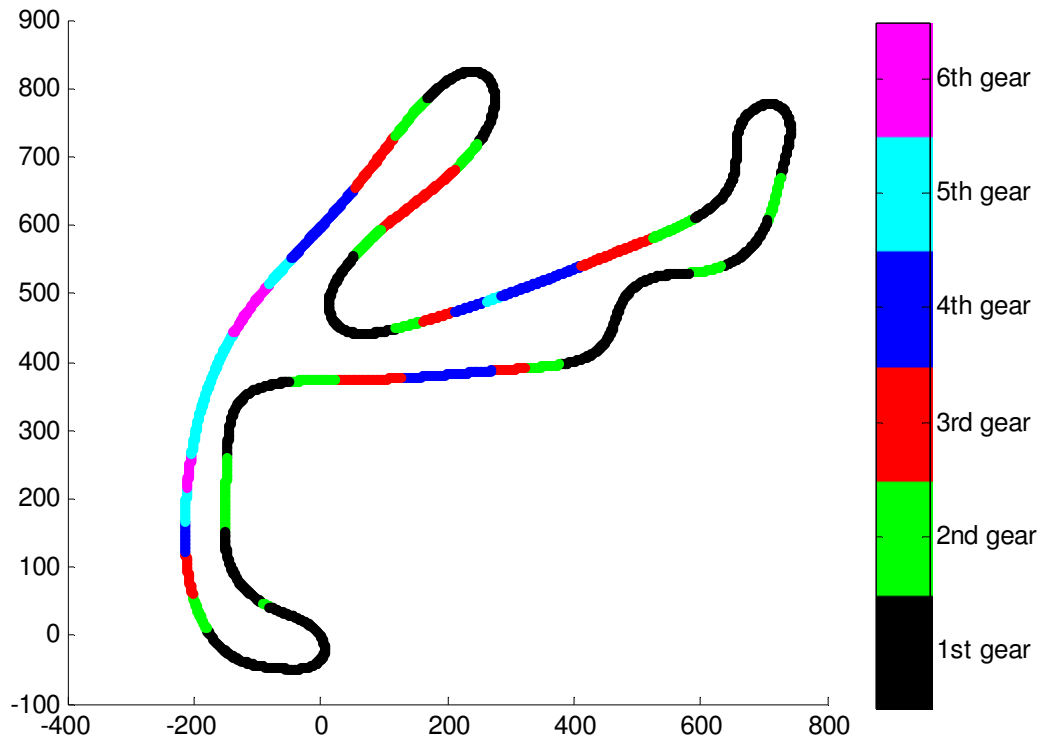


Figura 21 Cambio

Sempre considerando i rapporti del cambio utilizzati per ottenere il grafico precedente si può andare a verificare l'effettivo utilizzo del motore lungo il tracciato; si propone una scala da 0 a 100 dove con 100 si va ad indicare un pieno sfruttamento della coppia effettivamente sviluppata dal motore, con 0 uno sfruttamento nullo.

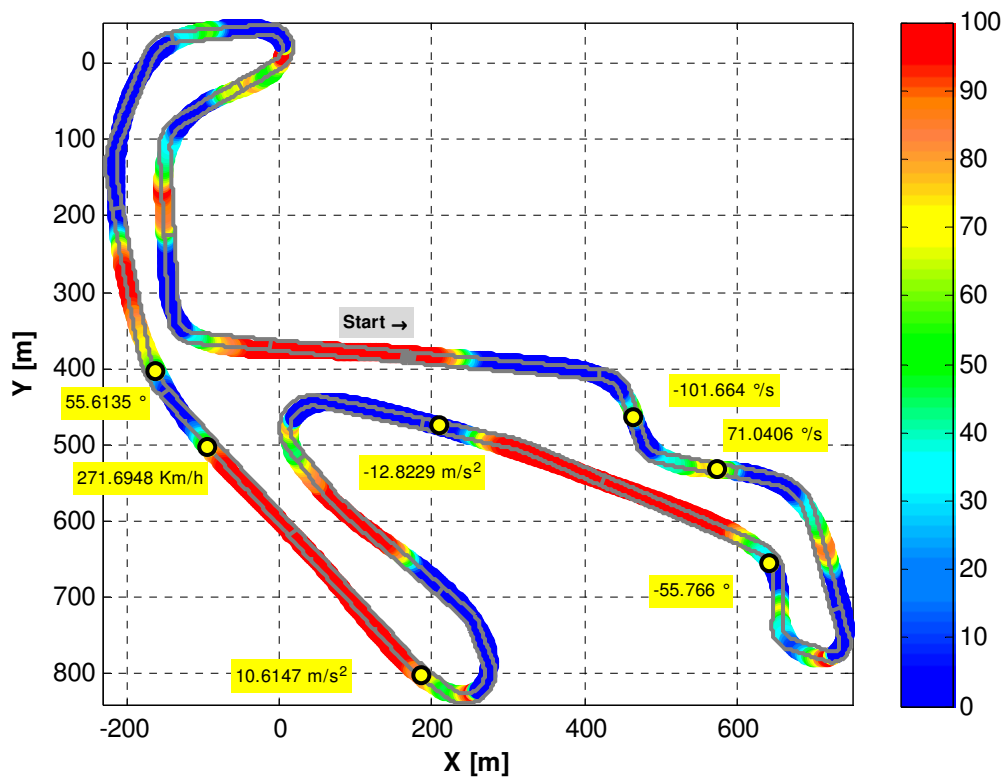


Figura 22 Sfruttamento del motore

Nei grafici seguenti è illustrata la massima potenza sviluppata dal motore in funzione della velocità di rotazione della ruota posteriore (indicata con i simboli \blacklozenge e di colore diverso in funzione della marcia migliore utilizzabile). La potenza, invece, realmente utilizzata è indicata con i simboli \times di diverso colore a seconda del rapporto utilizzato come indicato in legenda. Analogamente per quanto riguarda i giri motore (RPM).

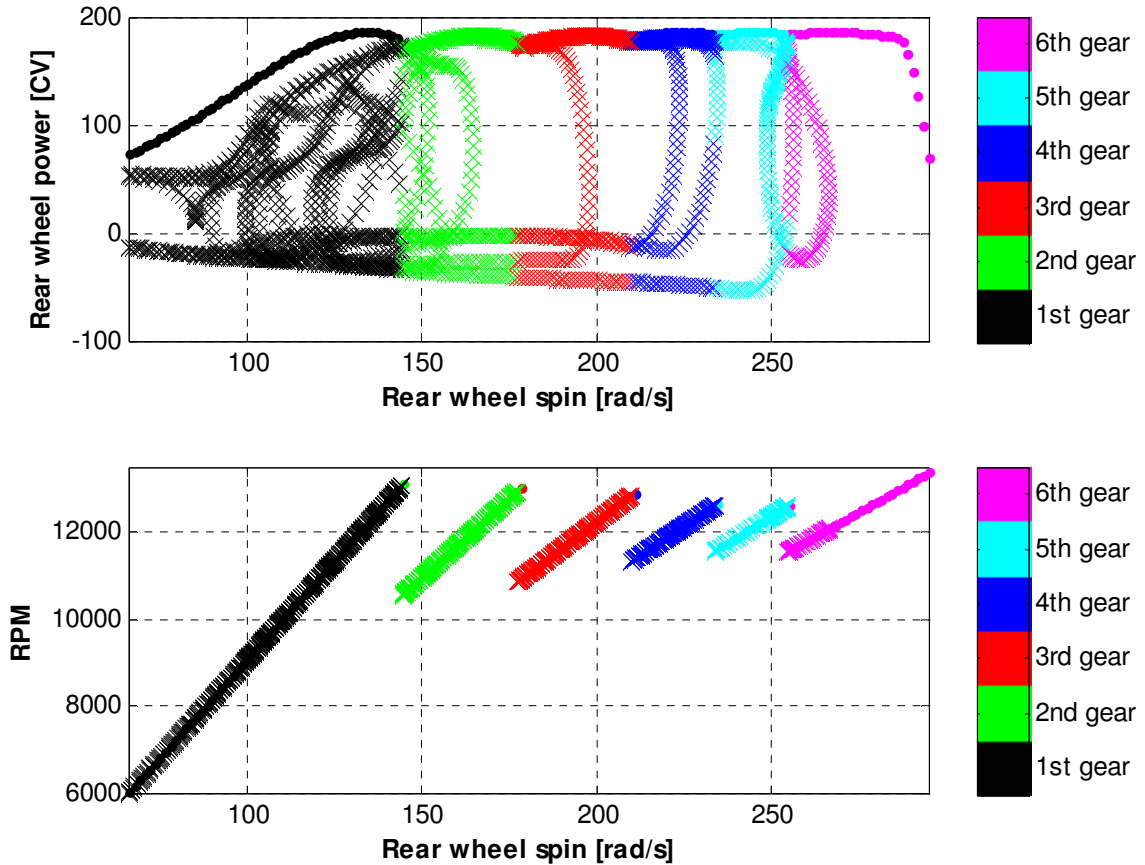


Figura 23 Massima potenza e giri motore

Il prossimo grafico analizza la differenza tra la spinta utilizzata e quella effettivamente disponibile alla ruota posteriore. Nel secondo grafico è riportata la differenza (in valore assoluto) delle due.

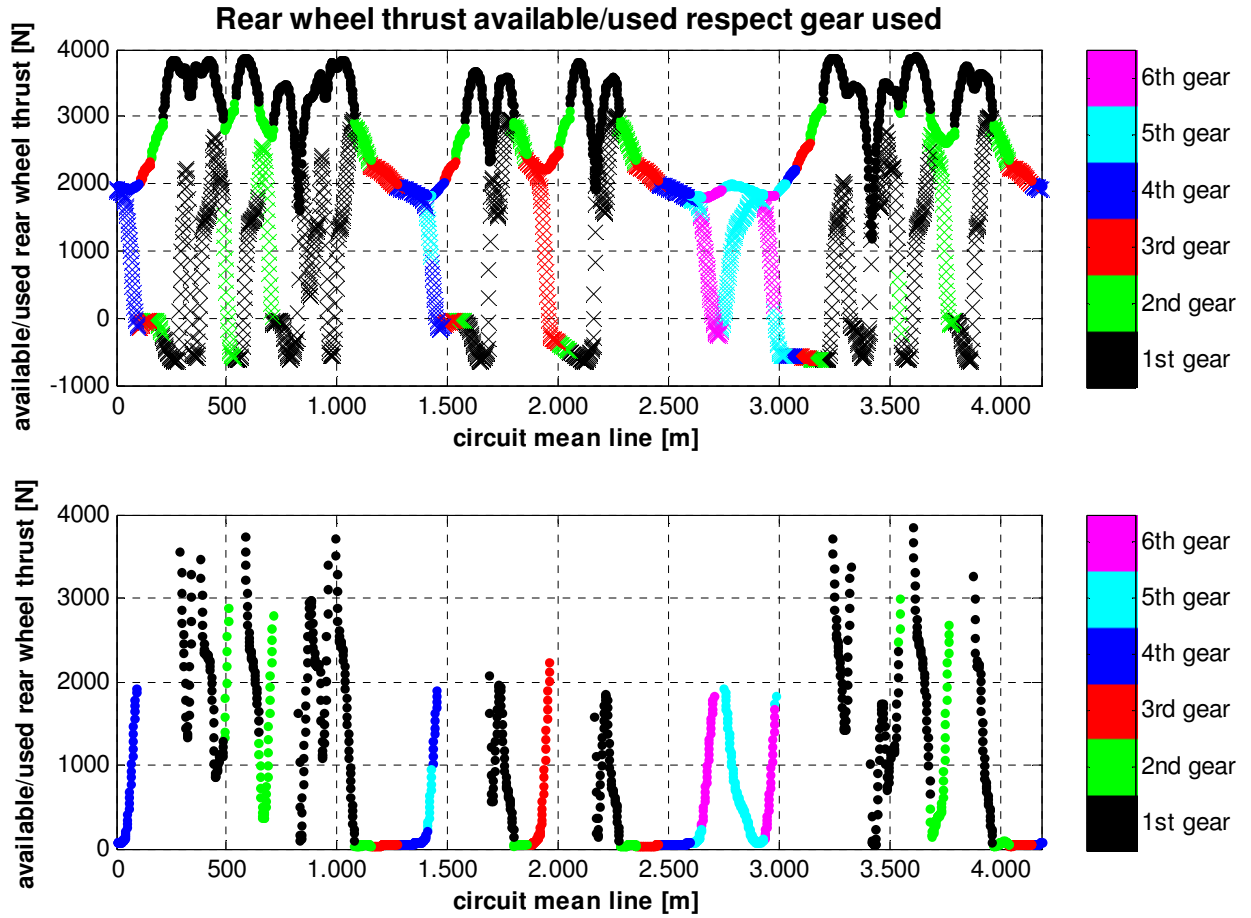


Figura 24 Spinta utilizzata VS disponibile

6.1.1 *Dati della telemetria*

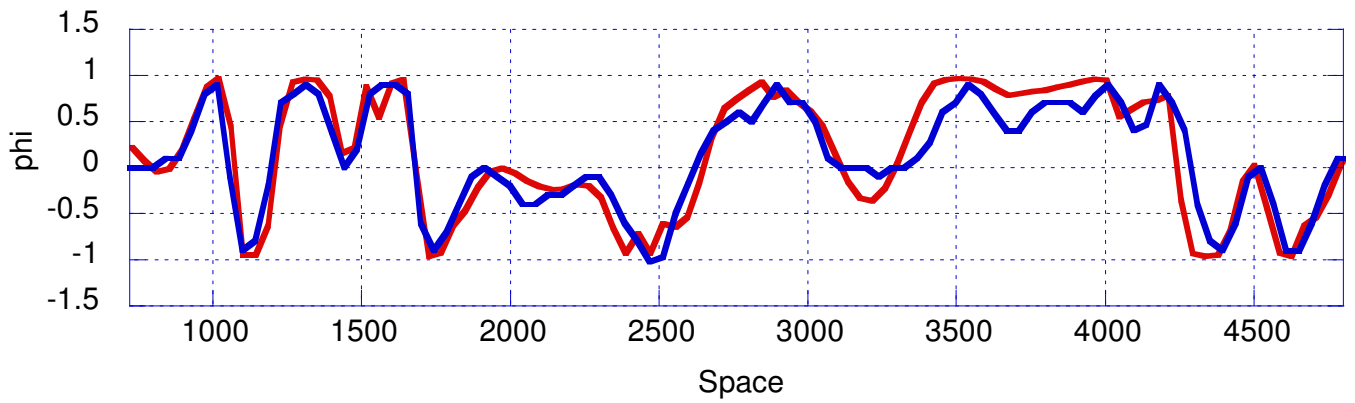


Figura 25 *angolo di rollio [rad]*

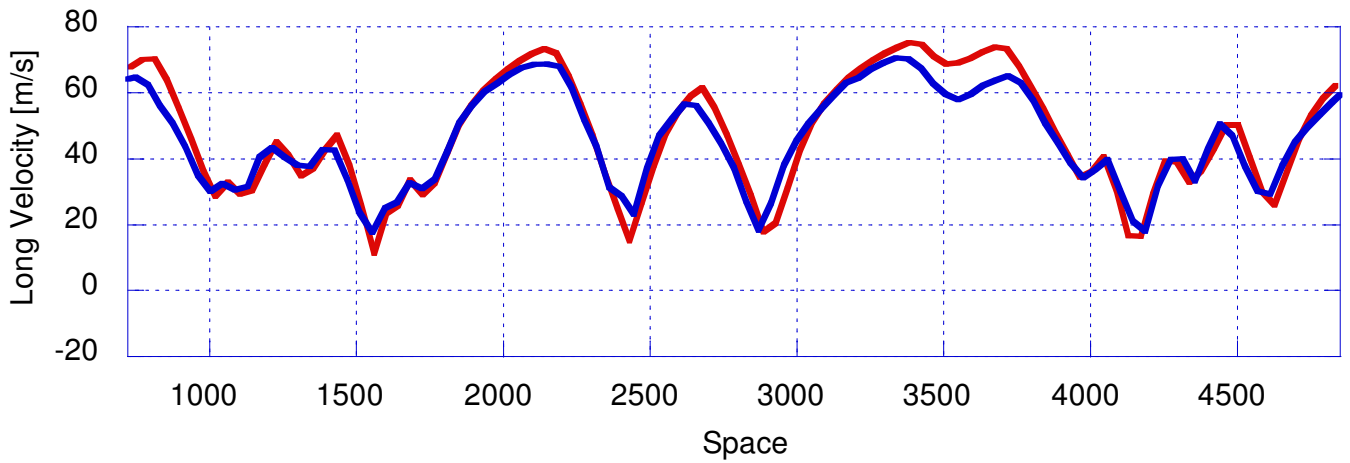


Figura 26 *Velocità di avanzamento*