

**UNIVERSIDAD CARLOS III DE MADRID
ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR
Departamento de Ingeniería Mecánica**



INGENIERÍA TÉCNICA INDUSTRIAL MECÁNICA

PROYECTO FIN DE CARRERA

**SIMULACIÓN DEL COMPORTAMIENTO
DINÁMICO EN 3D DE UNA
MOTOCICLETA EN FASE DE
ACELERACIÓN Y FRENADA DURANTE
LA TRAZADA DE UNA CURVA**

**AUTOR: MARTA ZÁRATE FRAGA
TUTOR: JOSÉ G. PÉREZ ALONSO
DIRECTOR: Dr. JUAN CARLOS GARCÍA PRADA**

MAYO, 2009



ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS DEL PROYECTO.....	1
2. LA MOTOCICLETA.....	2
2.1. HISTORIA DE LA MOTOCICLETA.....	2
2.2. TIPOS DE MOTOCICLETAS.....	3
2.3. PARTES PRINCIPALES DE UNA MOTOCICLETA.....	11
2.3.1. CHASIS.....	11
2.3.2. BASCULANTE.....	13
2.3.3. SUSPENSIÓN.....	13
2.3.3.1. Suspensión delantera.....	14
2.3.3.2. Suspensión trasera.....	15
2.3.4. RUEDAS.....	16
2.3.4.1. Llantas.....	16
2.3.4.2. Neumáticos.....	17
2.3.5. FRENOS.....	18
2.3.6. MOTOR.....	21
2.3.7. TRANSMISIÓN.....	22
2.3.7.1. Transmisión primaria.....	22
2.3.7.2. Embrague.....	23
2.3.7.3. Cambio de velocidades.....	23
2.3.7.4. Transmisión secundaria.....	24
3. COMPORTAMIENTO DE UNA MOTOCICLETA.....	25
3.1. EJES DE REFERENCIA MÁS USADOS.....	25
3.2. MECANISMOS DE MANEJO DE UNA MOTOCICLETA.....	25
3.3. FUERZAS EXTERNAS EN EL VIRAJE.....	26
3.4. EFECTO GIROSCÓPICO EN UNA MOTOCICLETA.....	27
3.4.1. EFECTO GIROSCÓPICO DEBIDO AL VIRAJE.....	28
3.4.2. EFECTO GIROSCÓPICO DEBIDO AL BALANCEO.....	30
3.4.2.1. Efecto giroscópico en el manillar.....	30
3.4.2.2. Efecto giroscópico global sobre la motocicleta.....	31
3.4.3. EFECTO GIROSCÓPICO DEBIDO AL GIRO DEL MANILLAR....	32
3.5. TRANSFERENCIA DE PESO.....	33
3.6. ACCIÓN DE UN PILOTO EN UN VIRAJE SIMPLE.....	35



4. MODELADO DE LA MOTOCICLETA.....	36
4.1. SUBCONJUNTOS.....	37
4.1.1. MOTOR, CHASIS, DEPÓSITO Y PILOTO.....	37
4.1.1.1. Motor.....	37
4.1.1.2. Chasis.....	38
4.1.1.2.1. Chasis.....	38
4.1.1.2.2. Subchasis.....	39
4.1.1.2.3. Pletinas.....	39
4.1.1.3. Depósito de combustible.....	40
4.1.1.4. Piloto.....	40
4.1.2. SUSPENSIÓN DELANTERA.....	41
4.1.2.1. Tijas – botellas.....	41
4.1.2.2. Barras.....	42
4.1.3. BASCULANTE.....	42
4.1.4. RUEDAS.....	43
4.1.5. SUSPENSIÓN TRASERA.....	43
4.2. UNIÓN DE LOS ELEMENTOS.....	44
4.3. SUSPENSIONES.....	46
4.4. CONTACTO RUEDA-SUELO.....	47
5. SIMULACIONES.....	48
5.1. CONSIDERACIONES PREVIAS.....	48
5.2. ACELERACIÓN DURANTE LA CURVA.....	50
5.2.1. GRUPO TRES: PAR DESDE 410 NM EN ADELANTE.....	53
5.2.2. GRUPO DOS: PAR DESDE 320 NM A 400 NM.....	55
5.2.3. GRUPO UNO: PAR DESDE 0 A 310 NM.....	58
5.3. PAR EN LA DIRECCIÓN PARA TRAYECTORIA DADA.....	65
5.4. FRENADA DURANTE LA CURVA.....	75
6. CONCLUSIONES.....	85
7. FUTUROS DESARROLLOS.....	87
8. BIBLIOGRAFÍA.....	88



ÍNDICE DE FIGURAS

<i>Figura 2.2.1: Suzuki GSXR 750.....</i>	<i>3</i>
<i>Figura 2.2.2: Honda Goldwing GL1800.....</i>	<i>3</i>
<i>Figura 2.2.3: Honda Pan-European ST1300.....</i>	<i>4</i>
<i>Figura 2.2.4: Harley Davidson XL 883.....</i>	<i>4</i>
<i>Figura 2.2.5: Suzuki GS 500.....</i>	<i>5</i>
<i>Figura 2.2.6: CSR GLORY 125.....</i>	<i>6</i>
<i>Figura 2.2.7: Piaggio Liberty 50.....</i>	<i>6</i>
<i>Figura 2.2.8: Yamaha Tenere.....</i>	<i>7</i>
<i>Figura 2.2.9: Honda Montesa Cotq 4RT.....</i>	<i>7</i>
<i>Figura 2.2.10: Yamaha YZ – 250 F.....</i>	<i>8</i>
<i>Figura 2.2.11: Yamaha XTZ 250 LANDER.....</i>	<i>8</i>
<i>Figura 2.2.12: Quads Daelim ET300.....</i>	<i>9</i>
<i>Figura 2.2.13: Polaris 600 IQ.....</i>	<i>9</i>
<i>Figura 2.2.14: Polaris MSX 140 H.O.....</i>	<i>10</i>
<i>Figura 2.2.15: Aixam Berlina Roadline.....</i>	<i>10</i>
<i>Figura 2.3.1: Partes principales de una motocicleta.....</i>	<i>11</i>
<i>Figura 2.3.1.1: Partes del chasis.....</i>	<i>11</i>
<i>Figura 2.3.1.2: Chasis multitubular.....</i>	<i>12</i>
<i>Figura 2.3.1.3: Chasis de doble viga.....</i>	<i>12</i>
<i>Figura 2.3.2.1: Basculante.....</i>	<i>13</i>
<i>Figura 2.3.3.1.1: Horquilla telescópica.....</i>	<i>14</i>
<i>Figura 2.3.3.2.1: Monoamortiguador trasero.....</i>	<i>15</i>
<i>Figura 2.3.4.1.1: Llanta de aleación ligera.....</i>	<i>16</i>
<i>Figura 2.3.4.1.2: Llantas.....</i>	<i>17</i>
<i>Figura 2.3.4.2.1: Neumático.....</i>	<i>17</i>
<i>Figura 2.3.5.1: Frenos de disco.....</i>	<i>19</i>
<i>Figura 2.3.5.2: Freno de disco lobulado.....</i>	<i>20</i>
<i>Figura 2.3.5.3: Freno de disco delantero.....</i>	<i>20</i>
<i>Figura 2.3.5.4: Freno de disco trasero.....</i>	<i>21</i>
<i>Figura 2.3.6.1: Motor de una motocicleta.....</i>	<i>22</i>
<i>Figura 2.3.7.3.1: Caja de cambios.....</i>	<i>23</i>
<i>Figura 2.3.7.4.1: Transmisión secundaria por cadena.....</i>	<i>24</i>
<i>Figura 2.3.7.4.2: Transmisión secundaria por correa.....</i>	<i>24</i>
<i>Figura 2.3.7.4.3: Transmisión secundaria por cardan.....</i>	<i>24</i>



<i>Figura: 3.1.1: Ejes de rotación.....</i>	<i>25</i>
<i>Figura 3.3.1: Esquema de fuerzas en un viraje.....</i>	<i>26</i>
<i>Figura 3.4.1: Efecto giroscópico.....</i>	<i>27</i>
<i>Figura 3.4.1.1: Efecto giroscópico debido al viraje.....</i>	<i>28</i>
<i>Figura 3.4.1.2: Efecto giroscópico debido al viraje.....</i>	<i>29</i>
<i>Figura 3.4.2.1.1: Efecto giroscópico del movimiento de inclinación.....</i>	<i>30</i>
<i>Figura 3.4.2.2.1: Efecto giroscópico global sobre la motocicleta.....</i>	<i>31</i>
<i>Figura 3.4.3.1: Efecto giroscópico debido al giro del manillar.....</i>	<i>32</i>
<i>Figura 3.5.1: Motocicleta en fase de frenado.....</i>	<i>33</i>
<i>Figura 4.1: Modelo de la motocicleta.....</i>	<i>36</i>
<i>Figura 4.1.1.1: Subconjunto motor-chasis-depósito-piloto.....</i>	<i>37</i>
<i>Figura 4.1.1.1.1: Motor.....</i>	<i>37</i>
<i>Figura 4.1.1.1.2: Bloque motor y caja de cambios.....</i>	<i>38</i>
<i>Figura 4.1.1.2.1: Chasis.....</i>	<i>38</i>
<i>Figura 4.1.1.2.1.1: Chasis.....</i>	<i>39</i>
<i>Figura 4.1.1.2.2.1: Subchasis.....</i>	<i>39</i>
<i>Figura 4.1.1.2.3.1: Pletinas.....</i>	<i>39</i>
<i>Figura 4.1.1.3.1: Depósito de combustible.....</i>	<i>40</i>
<i>Figura 4.1.1.4.1: Piloto.....</i>	<i>40</i>
<i>Figura 4.1.2.1: Suspensión delantera.....</i>	<i>41</i>
<i>Figura 4.1.2.1.1: Tijas – botellas de la suspensión delantera.....</i>	<i>41</i>
<i>Figura 4.1.2.2.1: Barras de la suspensión delantera y eje de la rueda delantera.....</i>	<i>42</i>
<i>Figura 4.1.3.1: Basculante.....</i>	<i>42</i>
<i>Figura 4.1.4.1: Ruedas.....</i>	<i>43</i>
<i>Figura 4.1.5.1: Suspensión trasera.....</i>	<i>43</i>
<i>Figura 4.1.5.2: Vástago y cuerpo de la suspensión trasera.....</i>	<i>44</i>
<i>Figura 4.2.1: Tabla de juntas de unión de la parte delantera.....</i>	<i>44</i>
<i>Figura 4.2.2: Juntas de unión de la parte delantera.....</i>	<i>45</i>
<i>Figura 4.2.3: Tabla de juntas de unión de la suspensión trasera.....</i>	<i>45</i>
<i>Figura 4.2.4: Juntas de unión de la suspensión trasera.....</i>	<i>45</i>
<i>Figura 4.2.5: Tabla de juntas de unión de la parte trasera.....</i>	<i>45</i>
<i>Figura 4.2.6: Juntas de unión de la parte trasera.....</i>	<i>45</i>
<i>Figura 4.3.1: Suspensiones delantera y trasera.....</i>	<i>46</i>
<i>Figura 4.3.2: Tabla de parámetros de las suspensiones.....</i>	<i>46</i>
<i>Figura 4.4.1: Tabla de parámetros de la fuerza de impacto.....</i>	<i>47</i>
<i>Figura 4.4.2: Tabla de coeficientes de rozamiento.....</i>	<i>47</i>
<i>Figura 5.2.1: Par de aceleración.....</i>	<i>50</i>



<i>Figura 5.2.2: Sentido del par de aceleración.....</i>	<i>51</i>
<i>Figura 5.2.3: Par de dirección.....</i>	<i>51</i>
<i>Figura 5.2.4: Trayectorias.....</i>	<i>52</i>
<i>Figura 5.2.5: Ángulos de balanceo.....</i>	<i>53</i>
<i>Figura 5.2.1.1: Ángulos de balanceo.....</i>	<i>54</i>
<i>Figura 5.2.1.2: Deslizamiento de la rueda trasera.....</i>	<i>54</i>
<i>Figura 5.2.1.3: Trayectorias.....</i>	<i>55</i>
<i>Figura 5.2.2.1: Trayectorias.....</i>	<i>55</i>
<i>Figura 5.2.2.2: Reacción vertical de la rueda delantera con el suelo (400 Nm)...</i>	<i>56</i>
<i>Figura 5.2.2.3: Recorrido de la suspensión delantera (400 Nm).....</i>	<i>56</i>
<i>Figura 5.2.2.4: Recorrido de la suspensión delantera (320 Nm).....</i>	<i>57</i>
<i>Figura 5.2.3.1: Motocicleta con ángulo de balanceo de 50° (310 Nm).....</i>	<i>58</i>
<i>Figura 5.2.3.2: Ángulos de balanceo.....</i>	<i>59</i>
<i>Figura 5.2.3.3: Trayectorias.....</i>	<i>59</i>
<i>Figura 5.2.3.4: Reacción vertical de la rueda delantera con el suelo.....</i>	<i>60</i>
<i>Figura 5.2.3.5: Reacción vertical de la rueda trasera con el suelo.....</i>	<i>61</i>
<i>Figura 5.2.3.6: Reacción horizontal de la rueda delantera con el suelo.....</i>	<i>61</i>
<i>Figura 5.2.3.7: Reacción horizontal de la rueda trasera con el suelo.....</i>	<i>62</i>
<i>Figura 5.2.3.8: Recorrido de la suspensión delantera.....</i>	<i>63</i>
<i>Figura 5.2.3.9: Recorrido de la suspensión trasera.....</i>	<i>64</i>
<i>Figura 5.3.1: Trayectorias.....</i>	<i>65</i>
<i>Figura 5.3.2: Trayectorias.....</i>	<i>66</i>
<i>Figura 5.3.3: Par de dirección.....</i>	<i>66</i>
<i>Figura 5.3.4: Ángulo de giro de manillar.....</i>	<i>67</i>
<i>Figura 5.3.5: Ángulos de balanceo.....</i>	<i>68</i>
<i>Figura 5.3.6: Relación entre contacto vertical de la rueda delantera y de la trasera.....</i>	<i>69</i>
<i>Figura 5.3.7: Recorridos de la suspensión delantera.....</i>	<i>69</i>
<i>Figura 5.3.8: Recorridos de la suspensión delantera.....</i>	<i>70</i>
<i>Figura 5.3.9: Relación entre contacto vertical de la rueda delantera y de la trasera.....</i>	<i>71</i>
<i>Figura 5.3.10: Recorridos de la suspensión trasera.....</i>	<i>71</i>
<i>Figura 5.3.11: Reacciones verticales entre la rueda delantera y el suelo.....</i>	<i>72</i>
<i>Figura 5.3.12: Reacciones horizontales entre la rueda delantera y el suelo.....</i>	<i>73</i>
<i>Figura 5.3.13: Reacciones verticales entre la rueda trasera y el suelo.....</i>	<i>73</i>
<i>Figura 5.3.14: Reacciones horizontales entre la rueda trasera y el suelo.....</i>	<i>74</i>
<i>Figura 5.4.1: Efecto giroscópico del movimiento de inclinación.....</i>	<i>75</i>



<i>Figura 5.4.2: Par aplicado en la dirección.....</i>	<i>76</i>
<i>Figura 5.4.3: Par de frenada aplicado en la rueda delantera.....</i>	<i>77</i>
<i>Figura 5.4.4: Sentido del par de frenada.....</i>	<i>77</i>
<i>Figura 5.4.5: Velocidad lineal de la motocicleta.....</i>	<i>78</i>
<i>Figura 5.4.6: Trayectorias.....</i>	<i>78</i>
<i>Figura 5.4.7: Giro del tren delantero de la motocicleta.....</i>	<i>79</i>
<i>Figura 5.4.8: Ángulo del tren delantero de la motocicleta.....</i>	<i>79</i>
<i>Figura 5.4.9: Ángulos de balanceo.....</i>	<i>80</i>
<i>Figura 5.4.10: Recorrido de la suspensión delantera.....</i>	<i>81</i>
<i>Figura 5.4.11: Recorrido de la suspensión trasera.....</i>	<i>81</i>
<i>Figura 5.4.12: Reacciones verticales de la rueda delantera con el suelo.....</i>	<i>82</i>
<i>Figura 5.4.13: Reacciones horizontales de la rueda delantera con el suelo.....</i>	<i>83</i>
<i>Figura 5.4.14: Reacciones verticales de la rueda trasera con el suelo.....</i>	<i>83</i>
<i>Figura 5.4.15: Reacciones horizontales de la rueda trasera con el suelo.....</i>	<i>84</i>



1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS DEL PROYECTO

La finalidad de este proyecto es el estudio del comportamiento de una motocicleta acelerando y frenando durante el trazado de una curva. Para ello se ha simulado con el programa *Cosmos Motion*, utilizando un modelo de la motocicleta Guzzi Daytona RS creado por *José G. Pérez Alonso* con el programa *Solid Works*.

Los objetivos principales de este estudio son:

- Comprender los factores que afectan al comportamiento dinámico de una motocicleta al trazar una curva, al acelerar y al frenar.
- Entender cómo afectan las distintas modificaciones que se hagan en los parámetros que definen la simulación.
- Valorar cuáles son los factores de la simulación de mayor relevancia.
- Estudiar la viabilidad del diseño y los programas utilizados.
- Determinar el par máximo de aceleración que es capaz de soportar la motocicleta para una curva dada.
- Analizar los cambios que se han de realizar para cambiar la trayectoria de la motocicleta.
- Determinar el máximo par de frenada que es capaz de soportar la motocicleta para una curva dada.



2. LA MOTOCICLETA

El impacto que tuvo en la sociedad el surgimiento de la motocicleta fue importante e impactante en todo el mundo por su facilidad de uso, economía y además las hay de varios tipos para cada estilo o necesidad.

2.1. HISTORIA DE LA MOTOCICLETA

La definición de motocicleta es, según la Real Academia Española, un “vehículo automóvil de dos ruedas, con uno o dos sillines y, a veces, con sidecar”. El cuadro y las ruedas constituyen la estructura fundamental del vehículo. La rueda directriz es la delantera y la rueda motriz es la trasera. Todas las motocicletas están compuestas por los mismos elementos, aunque con diversas variaciones en la configuración de motor, chasis, frenos, carrocería o equipamiento.

El estadounidense *Sylvestre Howard Roper* (1823-1896) inventó un motor de dos cilindros a vapor (accionado por carbón) en 1867. Ésta puede ser considerada la primera motocicleta, si se permite que la descripción de una motocicleta incluya un motor a vapor.

Wilhelm Maybach y *Gottlieb Daimler* construyeron una moto con cuadro y cuatro ruedas de madera y motor de combustión interna en 1885. Su velocidad era de 18 km/h y el motor desarrollaba 0,5 caballos.

Gottlieb Daimler usó un nuevo motor inventado por el ingeniero *Nikolaus August Otto*. *Otto* inventó el primer motor de combustión interna de cuatro tiempos en 1876. Lo llamó “Motor de Ciclo Otto” y, tan pronto como lo completó, *Daimler* (antiguo empleado de *Otto*) lo convirtió en una motocicleta que algunos historiadores consideran la primera de la historia. Desde entonces la evolución de la motocicleta no ha cesado y se ha convertido en un medio de transporte muy versátil y de gran importancia en la sociedad.

2.2. TIPOS DE MOTOCICLETAS

DEPORTIVAS

Son las que su estética trata de imitar a las motos de competición de velocidad, adoptando carenados en los que se favorece la penetración aerodinámica, a cambio de la disminución de la protección del piloto. Se trata de motos muy potentes, en las que sus motores se diseñan para obtener de ellos las máximas prestaciones, en detrimento de su comportamiento a bajos y medios regímenes. Tecnológicamente están siempre a la última.



Figura 2.2.1: Suzuki GSXR 750

GRAN TURISMO

Son motocicletas dotadas de amplios carenados, con los que se ofrece una gran protección a los ocupantes, dado que están pensadas para circular con pasajero. Dado su alto peso, disponen de motores de alta cilindrada, con gran cantidad de par a bajo y medio régimen, por lo que su nivel de prestaciones es inferior a lo que se podría deducir de su cilindrada.



Figura 2.2.2: Honda Goldwing GL1800

TURISMO

Se suele englobar en esta categoría a las motos de cualquier cilindrada sin grandes prestaciones deportivas, incluyendo por tanto a las denominadas *naked*, o motos sin carenado, si bien suelen disponer de una pequeña cúpula e incluso de un semicarenado. Suelen ser motos económicas, si se comparan con otras de la misma cilindrada y mayores pretensiones, siendo ante todo muy prácticas.



Figura 2.2.3: Honda Pan-European ST1300

CUSTOM

Son motos que no se diseñan pensando en sus prestaciones y comportamiento dinámico, sino en su imagen y estética. Por lo general son motos incómodas, ofreciendo una postura de conducción antiaerodinámica. Existen en todas las cilindradas, siendo en cualquier caso motos muy pesadas, dado el escaso desarrollo tecnológico del que hacen gala.



Figura 2.2.4: Harley Davidson XL 883

NAKED

Estas motos están desprovistas de cualquier tipo de carenado que las vista. Se comenzó a utilizar esta denominación, con una nueva generación de motocicletas, posterior a la implantación masiva del carenado, en la que se pretende ofrecer una imagen retro, tal y como eran las motos hasta entonces. Por tanto, al igual que en las *custom*, la estética juega en ellas un papel fundamental, si bien, a diferencia de las mismas, su comportamiento y sus prestaciones no están condicionadas por la misma, a excepción, lógicamente, de la protección al piloto y la velocidad máxima, ofreciendo por tanto, un comportamiento similar al de una moto convencional.



Figura 2.2.5: Suzuki GS 500

SCOOTERS

Es un vehículo ante todo práctico, dotado generalmente de cambio automático, el cual ofrece una gran protección y limpieza, permitiendo su utilización con ropa de calle, sin riesgo a ensuciarse, al estar ocultos sus órganos metálicos. Suelen disponer de carrocería de plástico, con chasis tubular metálico y compartimentos para transportar objetos. Hasta ahora, sus prestaciones eran modesta, dada la escasa cilindrada de sus propulsores, si bien recientemente, han aparecido modelos con propulsores de hasta 650 c.c., con lo que se aumentan sus posibilidades de uso. A estos modelos con más de 250 c.c. se les encuadra dentro de una categoría propia, conociéndose como *megascoters*.



Figura 2.2.6: CSR GLORY 125

CICLOMOTORES

Constituyen el grueso de la producción de motocicletas, aunque la legislación no las considere como tales. Su cilindrada está limitada a 50 c.c. y su velocidad máxima a 60 km/h. En esta categoría se pueden encontrar desde *scooters* hasta motos *naked*, deportivas, de campo, etc. Deben su éxito a su bajo precio y ala posibilidad de conducirlos sin carnet (tan sólo una licencia específica), incluso desde los 14 años.



Figura 2.2.7: Piaggio Liberty 50

TRAIL

En la actualidad son modelos de carretera, con ciertas aptitudes para circular por caminos y sendas forestales de escasa dificultad. Para ello, cuentan con suspensiones de gran recorrido y rueda delantera de mayor diámetro, en ambos casos respecto a los modelos de carretera. Son motos muy prácticas, con grandes cualidades turísticas, dada su posición de conducción, no exenta de un matiz deportivo, dada la manejabilidad que proporciona su ancho manillar.



Figura 2.2.8: Yamaha Tenere

MOTOS DE CAMPO

Se pueden clasificar en tres grandes grupos, pertenecientes a otras tantas especialidades deportivas.

Trial

Poseen un tamaño exiguo, para así favorecer su manejo, y su postura de conducción está diseñada para ir de pie, dado que su velocidad de utilización es muy baja. Suelen tener una cilindrada en torno a los 300 c.c..



Figura 2.2.9: Honda Montesa Cota 4RT

Cross

Especialidad velocística que se lleva a cabo en un circuito de tierra con grandes desniveles. Dada la superficie por la que ruedan, poseen unas suspensiones de gran recorrido y eficacia, para absorber las numerosas irregularidades que presenta la misma. Su cilindrada oscila entre los 80 y los 650 c.c..



Figura 2.2.10: Yamaha YZ – 250 F

Enduro o Todo Terreno

Especialidad similar al cross, con la diferencia de que se lleva a cabo en circuitos abierto, por caminos y senderos de una zona. Para ello, disponen de instalación de alumbrado, para así poder ser homologadas para su uso en vías públicas, permitiendo su matriculación. También ofrecen ligeras diferencias en cuanto al escalonamiento de la caja de cambios.



Figura 2.2.11: Yamaha XTZ 250 LANDER

MOTOS DE CATALOGACIÓN ESPECIAL

Quads

Son vehículos de cuatro ruedas con motor de motocicleta con una cilindrada que oscila entre los 50 y los 650 c.c. cuya estructura general tiene muchas similitudes con una moto. La dirección actúa sobre ambas ruedas delanteras a la vez.



Figura 2.2.12: Quads Daelim ET300

Motos de nieve

Apoyadas sobre patines, transmiten el movimiento a través de una cadena de orugas. Van impulsadas por motores específicos de planteamiento similar al de las motocicletas pero con ciertas particularidades que los distinguen de éstas.



Figura 2.2.13: Polaris 600 IQ

Motos de agua

Realizan la sustentación directamente sobre el casco. La impulsión se realiza mediante uno o más chorros de agua generados por una turbina que a su vez es accionada por un motor, que en la mayoría de los casos es de dos tiempos con gran cilindrada.



Figura 2.2.14: Polaris MSX 140 H.O.

Cuatriciclos

Son vehículos que en poco se parecen a una motocicleta, si acaso el motor deriva en ciertos casos de alguna de ellas, siendo la mayoría específicos, existiendo incluso versiones Diesel. La reglamentación vigente los equipara con lo ciclomotores en cuanto a los requisitos necesarios para conducirlos, de ahí su inclusión en estas páginas.



Figura 2.2.15: Aixam Berlina Roadline

2.3. PARTES PRINCIPALES DE UNA MOTOCICLETA

A continuación se va a describir los elementos más importantes de que se compone una motocicleta.

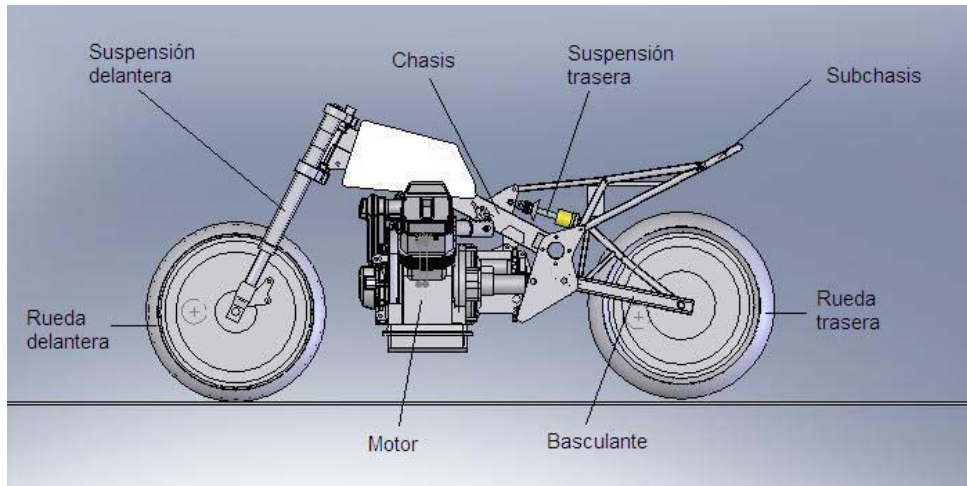


Figura 2.3.1: Partes principales de una motocicleta.

2.3.1. CHASIS

La función del chasis es servir de apoyo y sujeción al resto de los elementos que forman la motocicleta. Por una parte, sujetar el motor, y por otra, las ruedas, suspensiones y a los propios ocupantes. Hay muchas variedades tanto en estructura como en materiales, siempre persiguiendo conseguir rigidez y bajo peso.

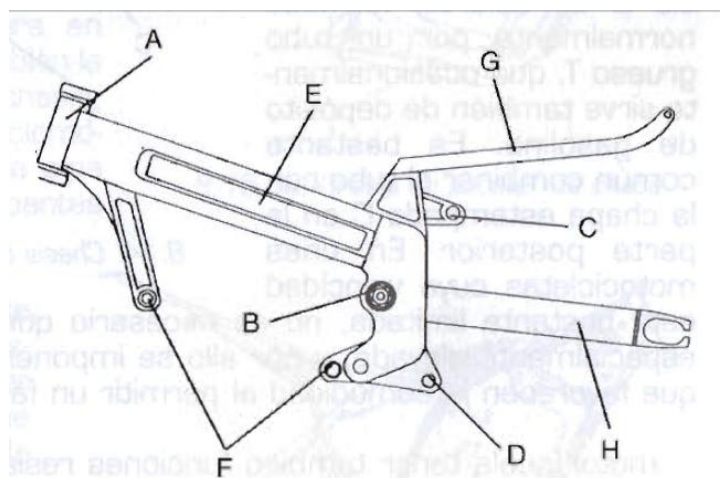


Figura 2.3.1.1: Partes del chasis

La estructura general de un chasis, independientemente de su tipo, es prácticamente invariable en todas. Como se aprecia en la *figura 2.3.1.1*, por una parte tenemos la zona de anclaje de la suspensión delantera A. Al ser ésta habitualmente una horquilla telescópica, es un eje que se denomina “pipa de dirección”. El otro punto de anclaje de la suspensión suele ser el eje del bastidor B, que debe combinarse con un soporte para el o los amortiguadores traseros C, e incluso los anclajes de las bieletas de la suspensión trasera D, si es que éstas existen. Hay que unir ambos anclajes con una estructura E, y aquí es donde la variedad abunda. Los distintos tipos pueden realizarlo con tubos, chapas, vigas gruesas, etc..

Otros elementos que debe tener el chasis son los anclajes para el motor F, lo suficientemente resistentes como para que no les afecte ni el peso ni las vibraciones. También hay que sujetar al piloto mediante la estructura G y los diferentes elementos accesorios como el depósito de gasolina y la carrocería en general, así como los accesorios del piloto. Si se incluye el basculante trasero H como un elemento del chasis, hay que señalar que esta pieza está sometida a unos grandes esfuerzos y que debe ser muy resistente.

Las estructuras que más comúnmente pueden encontrarse en un chasis son la *multitubular* (*figura 2.3.1.2*) y de *doble viga* (*figura 2.3.1.3*). Una estructura multitubular se caracteriza por estar formada por tubos cortos y rectos, normalmente de acero, que “envuelve” al motor. Los chasis de doble viga se caracterizan porque de la pipa de la dirección, parten dos vigas que rodean la parte superior del motor y acaban en la zona donde se ancla el basculante.



Figura 2.3.1.2: Chasis multitubular



Figura 2.3.1.3: Chasis de doble viga

2.3.2. BASCULANTE

El basculante es el elemento que conecta la rueda trasera al chasis. Podemos considerar que tiene tres puntos clave de unión. Uno es la unión con la rueda. Los otros dos relacionan el basculante con el chasis. Uno de ellos se encuentra en el extremo del basculante, donde pivota sobre el chasis, permitiendo así el recorrido de la suspensión trasera (segundo punto de relación con el chasis, que se produce mediante el amortiguador trasero).

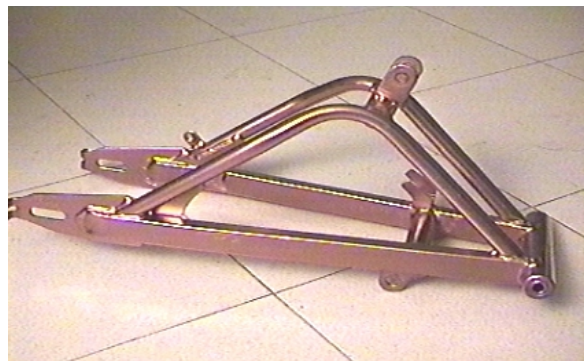


Figura 2.3.2.1: Basculante

Respecto a la *figura 2.3.2.1*, en la parte izquierda va colocada la rueda trasera; el anclaje de la derecha iría unido al chasis mediante unos rodamientos, para que pueda haber giro relativo entre ellos; y en los anclajes de la parte superior se fija el *monoamortiguador* trasero.

2.3.3. SUSPENSIÓN

Las motocicletas necesitan incorporar en su estructura unos anclajes elásticos entre la estructura principal y el terreno. La razón es bien sencilla; como el piso por el que transitan no es completamente liso, se producen constantes elevaciones y hundimientos del conjunto. Esto no plantea excesivos problemas a baja velocidad, pero si ésta aumenta, se llega a un punto en el que la moto salta sobre el terreno por efecto de la inercia, perdiendo contacto con el suelo, y, por tanto, capacidad de maniobra. Además, los constantes saltos causan incomodidad al piloto y los pasajeros, que se ven continuamente sacudidos sobre el vehículo.

Para evitar estos efectos, se intercala algún mecanismo entre las ruedas, que deben estar en contacto firme con el suelo y el resto del bastidor. Estos mecanismos forman el conjunto de lo que se denomina “suspensión”, al mantener en este estado la gran mayoría de la motocicleta.

2.3.3.1. Suspensión delantera

El sistema de suspensión más empleado, y prácticamente universal, es la horquilla telescópica.

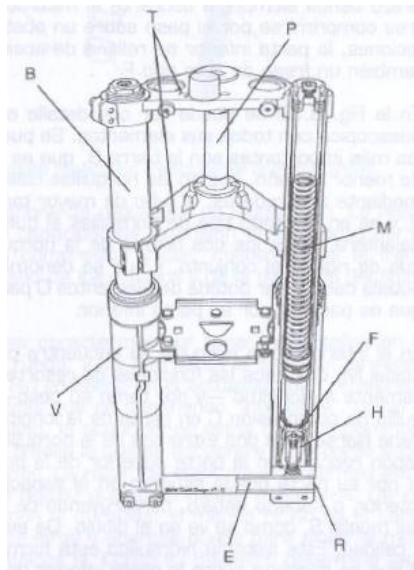


Figura 2.3.3.1.1: Horquilla telescópica

En la *figura 2.3.3.1.1* se ilustra una horquilla telescópica en un sistema muy simple, la horquilla está formada por dos brazos B que unen la pipa de dirección P a la rueda R, ansiándose respectivamente en las tijas T y en el eje de la rueda delantera E. Cada brazo está formado por dos tubos B y V, uno de mayor diámetro que el otro, y situados concéntricamente, de manera que uno de ellos puede introducirse en el interior del otro, variando la distancia existente entre el eje y las tijas.

El sistema empleado para que el mecanismo realice tareas de suspensión es introducir un muelle M en su interior, de modo que cada brazo tienda siempre a estirarse al máximo, y a volver a esta posición tras comprimirse por el paso sobre un obstáculo. Para frenar las oscilaciones, la parte inferior se rellena de aceite hidráulico H, y se instala también un freno F.

Las horquillas estudiadas se caracterizan por tener las botellas en la parte inferior y las barras en la superior. Sin embargo en la actualidad han proliferado de manera espectacular otras que se denominan “invertidas”, en este caso, la situación de estos dos componentes cambia. La razón de efectuar este cambio viene dado por el aumento de la rigidez que experimenta el sistema.

2.3.3.2. Suspensión trasera

La suspensión trasera une el chasis con el basculante, y su principal finalidad es la de mantener la rueda trasera en el suelo, para poder aplicar tanto el par motor, como el par de frenada. Tradicionalmente se utilizaban dos amortiguadores para conectar el chasis y el basculante, pero hoy en día el método más utilizado es el sistema de monoamortiguador. El sistema consta de un único elemento resorte-amortiguador conectado entre el chasis y el basculante. Se encuentra formado por el cuerpo y el vástago. El cuerpo realiza una función parecida a las de las botellas en la suspensión delantera, por lo que se trata de la parte con mayor anchura del amortiguador. Contiene además elementos de absorción y amortiguamiento como en el caso de la horquilla.



Figura 2.3.3.2.1: Monoamortiguador trasero

2.3.4. RUEDAS

Las motocicletas se mueven mediante el giro de sus ruedas sobre el terreno. Todos los elementos que componen el resto de la motocicleta están encaminados o bien a mantener al piloto sobre el vehículo, o a posibilitar que estas dos ruedas se mantengan en movimiento y en continuo contacto con el suelo.

Las ruedas se componen de dos elementos, las llantas y los neumáticos, aunque en la mayoría de las ocasiones llevan anclados a ellas otros elementos como los frenos, elementos de transmisión o sistemas de medición.

La llanta es la parte rígida de la rueda, que se une al sistema de suspensión de modo fijo, mientras que el neumático es el elemento en contacto con el terreno, que posee características elásticas y dispone de una cierta capacidad de deformación, para adaptarse a las superficies por donde transita la moto.

2.3.4.1. Llantas

Desde hace un par de décadas se han sustituido las llantas de radios por llantas de aleación ligera en las motocicletas de carretera, que, con altas velocidades, necesitan la mínima masa no suspendida posible y una rigidez mayor por los esfuerzo que deben soportar.

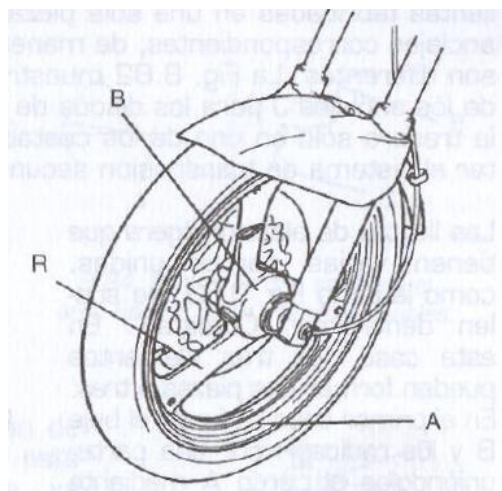


Figura 2.3.4.1.1: Llanta de aleación ligera

Las llantas de aleación ligera suelen estar formadas por una pieza única, por dos e incluso tres, aunque la solución más habitual es la primera. En este caso buje B, radios R y arco A, se realizan en fundición ligera de aluminio, magnesio e incluso fibra de carbono en modelos de competición. Los grupos de múltiples radios se sustituyen por varios radios de gran resistencia que pueden variar desde un mínimo de tres radios hasta un máximo de siete.



Figura 2.3.4.1.2: Llantas

2.3.4.2. Neumáticos

Los neumáticos están formados por una banda de caucho que se calza sobre el arco de la llanta. La sección del neumático se divide en varias zonas bien diferenciadas, que se pueden ver en la figura 2.3.4.2.1. La parte del neumático en contacto con el suelo S se denomina “banda de rodadura”, la que se encarga de apoyarse en la llanta A se denomina “talón”, mientras que la superficie lateral F que une la banda de rodadura con el talón recibe el nombre de “flanco” u “hombro”.

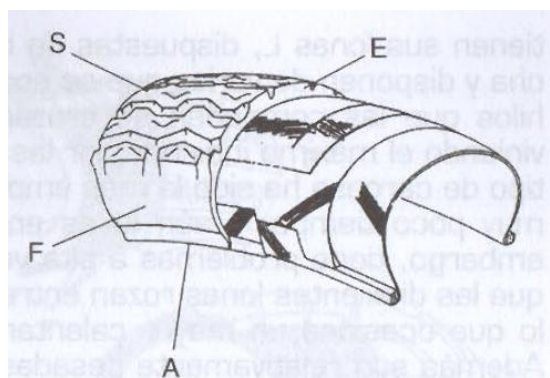


Figura 2.3.4.2.1: Neumático



En la *figura 2.3.4.2.1* también se aprecia que interiormente el neumático está compuesto por una funda exterior de goma E que forma la banda de rodadura S y la cubierta del flanco F y el talón A. Este material debe tener un cierto espesor en la zona en contacto con el suelo, ya que el uso provoca un cierto desgaste. La banda de rodadura normalmente no es lisa, sino que dispone de unos ciertos canales que se emplean para evacuar el agua en caso de necesidad. Algunos tipos de neumáticos empleados para conducción deportiva y únicamente sobre asfalto seco no disponen de estos canales, normalmente conocidos como “dibujo” y se denominan “slicks”.

La banda de rodadura no dispone, por el tipo de material empleado, de la suficiente consistencia, por lo que necesita una estructura interna que se la confiera. Este esqueleto se llama “carcasa”, y está formado por una serie de lonas, realizadas con diferentes materiales, que abrazan por completo la superficie del neumático.

Se puede distinguir básicamente dos tipos de neumáticos según su carcasa: los neumáticos diagonales y los neumáticos radiales. Los primeros tienen sus lonas dispuestas de manera oblicua al sentido de la marcha y disponen de varias que se encuentran situadas de manera que los hilos que las componen se cruzan. Tiene problemas a alta velocidad, sobre todo de desgaste, ya que las diferentes lonas rozan entre si cuando el neumático se deforma. Se ha evolucionado hacia la carcasa de tipo radial, que dispone únicamente de una lona y orientada de manera especial, ya que sus hilos se encuentran perpendiculares al sentido de la marcha. Esto permite que con una sola lona se complete la estructura de la carcasa, eliminando peso, y también las fricciones entre las diferentes capas que provocaba parte del calentamiento.

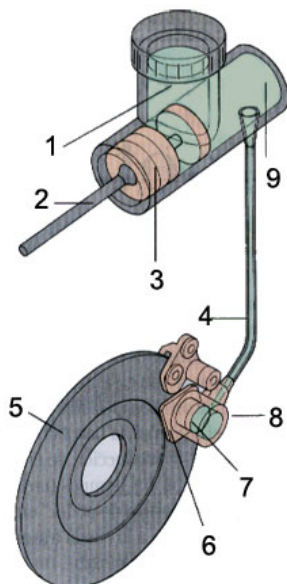
2.3.5. FRENOS

La capacidad de detención del vehículo es imprescindible, hasta el punto de que una motocicleta jamás debe alcanzar una velocidad superior a la que le permitan sus frenos. La energía cinética que posee el vehículo, debido a su masa y a su velocidad, se transforma en energía calorífica, surgida del rozamiento de los elementos de fricción (que no giran) con las correspondientes superficies móviles, solidarias a las ruedas. Es importante conocer este principio, ya que la eficacia de frenado se mantiene, sólo si existe una eficaz disipación del calor generado.

Los frenos más usados son los frenos de tambor y de disco, aunque en la actualidad los sistemas tambor han quedado relegados a vehículos económicos. La frenada de los tambores depende de varios factores. En primer lugar, de la superficie de fricción, que viene dada por la anchura de la zapata y el diámetro del tambor, en segundo lugar, por el coeficiente de fricción entre la zapata y el metal del tambor, y en tercer lugar, por la presión a que se sometan los dos.

Los frenos de disco, al contrario que los de tambor, tienen un accionamiento totalmente externo, lo que redundaría en la mejora de uno de los principales problemas de los sistemas anteriores, el sobrecalentamiento y la pérdida de rendimiento consiguiente.

El freno de disco está formado por un disco metálico anclado a la rueda, alrededor del cual se coloca un elemento denominado “pinza de freno”. En el interior de ésta se encuentran dos pastillas, dotadas de un forro de fricción en la cara que toca con el disco de freno. Las pastillas son empujadas por la acción de unos cilindros metálicos denominados “pistones”, que a su vez son accionados por un sistema hidráulico o un cable en contadas ocasiones. Si el sistema es hidráulico, el circuito interior dispone de un conducto hacia el exterior, regulado con una válvula formada por un tornillo hueco para permitir el purgado del circuito.



- 1 - Reserva de líquido de frenos
- 2 - Barra de empuje
- 3 - Pistón
- 4 - Líquido de frenos hidráulico
- 5 - Disco de la rueda
- 6 - Pastilla de freno
- 7 - Pistón
- 8 - Caliper
- 9 - Cilindro maestro

Figura 2.3.5.1: Freno de disco

En frenos de disco, la última tendencia son discos de “flor” o lobulados (*Figura 2.3.5.2*), que no son más que frenos de disco con una especial configuración para favorecer la disipación del calor y disminuir el peso.



Figura 2.3.5.2: Freno de disco lobulado

Al contrario de cómo ocurre en los coches, el freno delantero y trasero de las motocicletas se accionan independientemente. Aunque en la actualidad se está trabajando para desarrollar un sistema de frenado eficaz y seguro con un solo accionador.

El freno delantero es el que mayor importancia tiene a la hora de enfrentarnos a una deceleración fuerte, debido a la transferencia de carga a la rueda delantera. Alrededor de un 70% del esfuerzo de frenada es realizado por él. Por ello las motos deportivas suelen contar con dos frenos de disco ubicados en la rueda delantera y además de mayor diámetro que la rueda trasera. El freno delantero es activado mediante la maneta derecha del manillar.



Figura 2.3.5.3: Freno de disco delantero

El freno trasero debido a la transferencia de pesos tiene menos importancia en la deceleración. Por ello suele utilizarse un sistema de disco más pequeño y de menos potencia que el delantero. Este, se acciona mediante el pie derecho.



Figura 2.3.5.4: Freno de disco trasero

2.3.6. MOTOR

El motor es el encargado de generar el par para acelerar la motocicleta. Suelen usarse motores de combustión interna de dos o cuatro tiempos. El motor de cuatro tiempos, aunque puede considerarse como el más versátil, ha de competir en las pequeñas cilindradas con el motor de dos tiempos, que le aventaja en simplicidad y ligereza, y en las grandes con su variante Diesel, que lo hace en economía. La cilindrada depende del modelo de motocicleta en cuestión. Dejando a un lado consideraciones sobre la suavidad y regularidad de marcha o arranque, se puede afirmar que, salvo excepciones, siempre que se ha aumentado el número de cilindros ha sido en busca de mayor potencia. Esto es así, porque en cualquier motor sólo existen dos maneras de incrementarla con facilidad, que son aumentar la cilindrada, o elevar el régimen de funcionamiento. El motor, en muchos casos, tiene también una función estructural, ayudando así al chasis a soportar los diferentes esfuerzos. La refrigeración del motor puede ser mediante aire o agua.



Figura 2.3.6.1: Motor de una motocicleta

2.3.7. TRANSMISIÓN

Para que el movimiento generado en el motor llegue hasta la rueda trasera, se requiere la utilización de diversos mecanismos en serie que forman un conjunto cuya denominación usual es la de transmisión o, más técnicamente, “cadena cinemática”. El sistema de transmisión puede dividirse en dos etapas: la transmisión primaria y la transmisión secundaria.

2.3.7.1. Transmisión primaria

Los elementos que se encargan de comunicar el movimiento del cigüeñal al embrague, reciben el nombre de transmisión primaria. Esta primera etapa en la transmisión suele estar dotada de una primera desmultiplicación, disminuyendo la velocidad de giro del eje al que se transmite el movimiento respecto del original. Los dos métodos más comunes para realizar la transmisión primaria son la cadena y los engranajes. La tendencia más habitual en la actualidad es la transmisión por engranajes que anula el posible mantenimiento y reduce el tamaño del motor.

2.3.7.2. Embrague

La misión del embrague es conectar o desconectar la transmisión del movimiento desde el motor a la rueda, a voluntad del conductor de la motocicleta. La desconexión es necesaria al iniciar la marcha y cada vez que se utiliza el cambio. Suele ir situado entre la transmisión primaria y el eje primario del cambio, aunque puede ir directamente entre el cigüeñal y el primario, como sucede siempre que es de tipo monodisco, o después del variador (cambio automático) en otros casos.

2.3.7.3. Cambio de velocidades

Es imprescindible tener un dispositivo mecánico que llamaremos “cambio” o “caja de velocidades” que facilite el funcionamiento del motor en el intervalo de velocidad estable comprendido entre los regímenes de par y de potencia máximos. Mediante éste es posible obtener diversas velocidades angulares de giro del eje secundario para una misma del primario, o, lo que es lo mismo, distintos pares de salida para un mismo par de entrada.

En cuanto al número de relaciones, oscila entre las cuatro de algunas *custom*, y las siete de alguna deportiva, siendo las más empleadas las de cinco relaciones en motos turísticas y las de seis en motos deportivas, si bien esto no supone ninguna regla.

En cualquier caso, la desmultiplicación de una marcha viene dada por el número de dientes que poseen los engranajes que la componen. Así, se determina la llamada “relación de transmisión”, la cual es el cociente entre el número de dientes del piñón conducido (el situado en el secundario) y el número de dientes del piñón conductor (dispuesto en el primario).

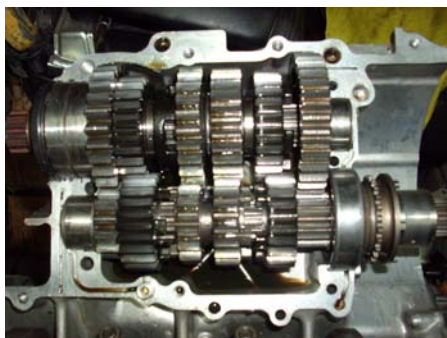


Figura 2.3.7.3.1: Caja de cambios

2.3.7.4. Transmisión secundaria

La transmisión secundaria es la encargada de transmitir el movimiento desde la salida de la caja de cambios hasta la rueda trasera. La forma más habitual de transmitir este par es mediante cadena, aunque también es usada la transmisión mediante correa o incluso la transmisión tipo cardan.



Figura 2.3.7.4.1: Transmisión secundaria por cadena



Figura 2.3.7.4.2: Transmisión secundaria por correa

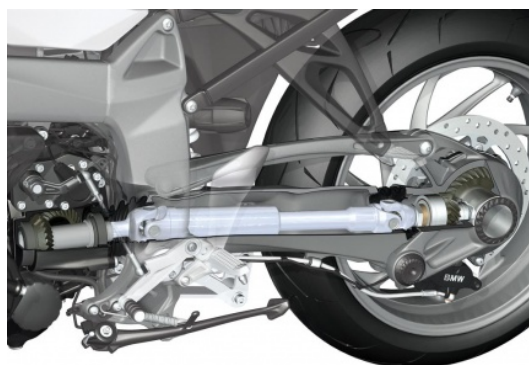


Figura 2.3.7.4.3: Transmisión secundaria por cardan

3. COMPORTAMIENTO DE UNA MOTOCICLETA

3.1. EJES DE REFERENCIA MÁS USADOS

Para analizar el comportamiento de la motocicleta hay que definir los movimientos que ésta realiza. Además de los movimientos lineales, la motocicleta realiza movimientos angulares sobre sus tres ejes. Estos movimientos son el balanceo, el viraje y el cabeceo. El balanceo es a lo que llamamos la inclinación de la moto. El viraje es el movimiento en torno al eje vertical y ocurre cuando se traza una trayectoria curva. Y el movimiento de cabeceo tiene lugar en las aceleraciones y frenadas, así como por las irregularidades del terreno.

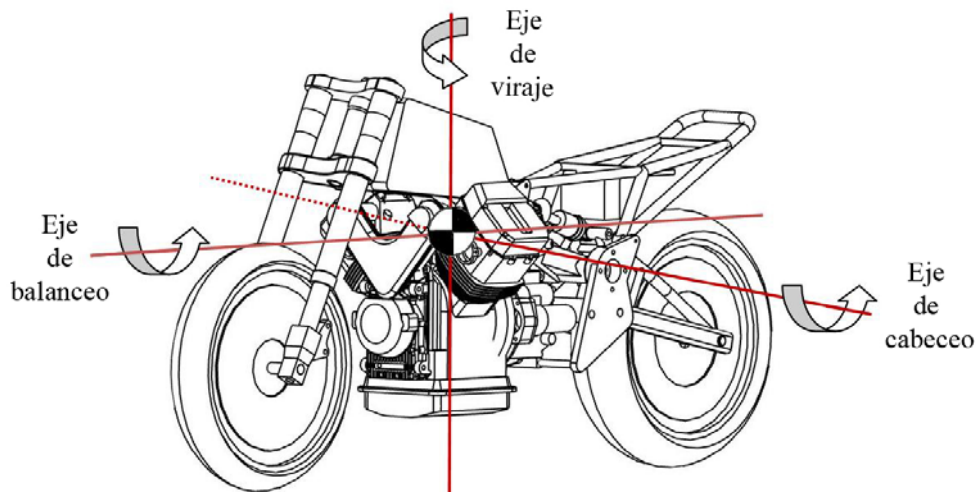


Figura 3.1.1: Ejes de rotación

3.2. MECANISMOS DE MANEJO DE UNA MOTOCICLETA

Para cambiar de dirección una motocicleta el piloto cuenta con dos mecanismos. El primero de ellos y más importante, es el par que ejerce sobre el manillar. El segundo, que tiene un menor efecto en el manejo de la motocicleta, es el momento aplicado por el tren inferior del cuerpo del piloto cuando cambia el ángulo de inclinación del torso respecto al chasis de la motocicleta. Aunque este segundo mecanismo es menos relevante, es útil porque facilita el realizar las maniobras más rápido y con mayor precisión. En este proyecto sólo estudiamos el primer mecanismo, el de aplicar un par al manillar, ya que consideramos al piloto como un sólido rígido.

3.3. FUERZAS EXTERNAS EN EL VIRAJE

Si situamos un sistema de referencia no inercial en la moto, podemos observar que las principales fuerzas a las que está sometido el sistema piloto-moto son: el peso, la fuerza normal del suelo, la fuerza centrífuga y la fuerza lateral de los neumáticos.

Una moto traza las curvas inclinándose hacia el interior. La fuerza centrífuga que intenta sacarla hacia el exterior se anula por la componente del peso que impide su vuelco y por la adherencia de los neumáticos que impiden su deslizamiento al exterior. Es evidente que cuanto más se incline la motocicleta más se fuerza el agarre de los neumáticos; por tanto, es más seguro inclinar menos la moto. De ello ha derivado una técnica actualmente muy común que consiste en descolgar el cuerpo hacia el interior de la curva. De esta manera el centro de gravedad se desplaza de manera similar, pero con la ventaja de que es necesaria una menor inclinación de la moto, por lo que se aleja del punto crítico de adherencia de los neumáticos; siendo así una conducción más segura. En la *figura 3.3.1* puede observarse esta maniobra.



Figura 3.3.1: Esquema de fuerzas en un viraje

3.4. EFECTO GIROSCÓPICO EN UNA MOTOCICLETA

El efecto giroscópico tiene lugar cuando la rueda, que sigue un movimiento rotacional alrededor de su propio eje con una velocidad angular ω , se le fuerza a girar también según otro eje, perpendicular al anterior, con velocidad angular Ω .



Figura 3.4.1: Efecto giroscópico

El efecto giroscópico se manifiesta como un momento que tiende a girar la rueda alrededor de un eje perpendicular a los otros dos. El valor de este momento giroscópico será igual al producto del momento polar de inercia de la rueda por las velocidades angulares ω y Ω .

En la dinámica de la motocicleta, existen diversas ocasiones en las que se crea un momento inducido por el efecto giroscópico. Efecto giroscópico de viraje, creado por el giro de las ruedas en una curva en un movimiento estable; efecto giroscópico de balanceo, creado por el giro de las ruedas, durante la inclinación de la motocicleta; y efecto giroscópico de dirección, generado por el giro de la rueda delantera durante una maniobra en la dirección.

3.4.1. EFECTO GIROSCÓPICO DEBIDO AL VIRAJE

Consideraremos una rueda girando alrededor de su propio eje a una velocidad angular constante ω , mientras la motocicleta toma una curva de radio R , con una velocidad angular constante Ω en torno al centro imaginario de esa curva (nótese que ω tiene un valor mucho más elevado que Ω). La rotación natural de la rueda (ω) y el giro de la motocicleta alrededor del centro de la curva (Ω), producen un momento giroscópico alrededor del eje horizontal, que tiende a levantar la motocicleta.

$$M_g = I_0 \cdot \Omega \cdot \omega \cdot \cos\varphi$$

Siendo I_0 el momento polar de inercia de la rueda respecto a su propio eje, ω la velocidad angular de rotación alrededor del mismo, Ω la velocidad angular con que toma la curva la motocicleta.

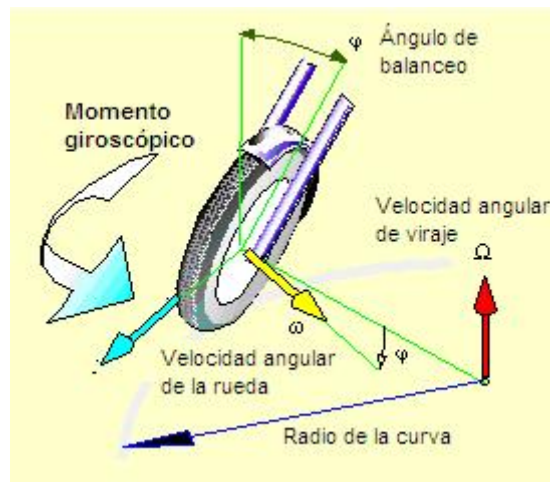


Figura 3.4.1.1: Efecto giroscópico debido al viraje

Ahora, tomaremos en cuenta el momento de inercia de ambas ruedas. Entonces, el efecto giroscópico valdría:

$$M \cong (I_d + I_t) \cdot \Omega \cdot \omega \cdot \cos\varphi$$

Siendo I_d y I_t los momentos polares de inercia de las ruedas delantera y trasera respectivamente.

Supongamos que el efecto giroscópico fuera nulo. Si también despreciamos la deformación de los neumáticos, las condiciones de equilibrio dinámico para esas condiciones de movimiento circular uniforme (velocidad lineal constante y radio de curvatura constante), imponen que la resultante del peso y de la fuerza centrífuga interseca la línea que une los puntos de contacto de ambas ruedas con el suelo.

En este caso ideal, el ángulo de inclinación de la motocicleta para tomar la curva vendría dado por la relación:

$$\varphi = \arctg\left(\frac{R\Omega^2}{g}\right)$$

Para contrarrestar el efecto giroscópico, la motocicleta debería estar más inclinada respecto al caso ideal, calculado considerando que el valor del efecto giroscópico es cero.

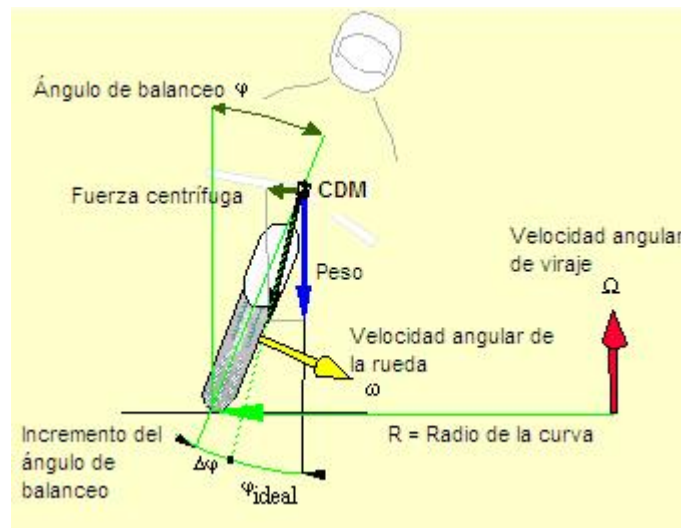


Figura 3.4.1.2: Efecto giroscópico debido al viraje

El incremento del ángulo de balanceo, debido al efecto giroscópico, no facilita la maniobrabilidad de la motocicleta, porque la moto, para lograr estabilizar el ángulo de balanceo (que es mayor), necesita más tiempo.

3.4.2. EFECTO GIROSCÓPICO DEBIDO AL BALANCEO

3.4.2.1. Efecto giroscópico en el manillar (balanceo de la rueda delantera)

Este efecto giroscópico aparece cuando la motocicleta se inclina.

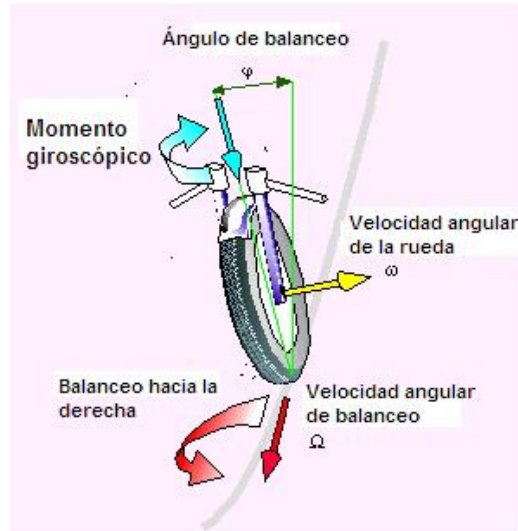


Figura 3.4.2.1.1: Efecto giroscópico del movimiento de inclinación

El movimiento rotatorio de la rueda delantera, junto con el movimiento de balanceo de la motocicleta hacia la derecha, crea un momento giroscópico sobre el tren delantero del vehículo. Su proyección sobre los ejes de dirección es:

$$M = -I \cdot \omega \cdot \Omega \cdot \cos \varepsilon$$

Donde ε es el ángulo de inclinación del manillar.

El momento giroscópico, por lo tanto, tiende a girar el manillar hacia la derecha, facilitando la entrada en la curva (el incremento del ángulo de la dirección provoca una reducción del radio de la curva).

De forma similar, cuando el movimiento de balanceo cambia de signo y la motocicleta vuelve a la posición vertical, el efecto giroscópico tiende a disminuir el ángulo de la dirección, facilitando el cambio de curva a línea recta.

Por lo tanto, se puede decir que este efecto giroscópico tiene una influencia estabilizadora, en este caso en el que se tiende a mantener la motocicleta en equilibrio ejerciendo una acción de alineación.

3.4.2.2. Efecto giroscópico global sobre la motocicleta

Analizando otra vez un movimiento de balanceo de izquierda a derecha: el momento giroscópico sobre la motocicleta es:

$$M = -(I_d + I_t) \cdot \omega \cdot \Omega$$

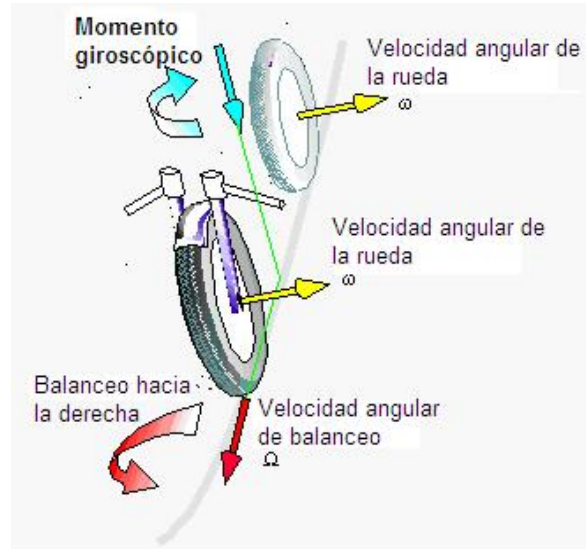


Figura 3.4.2.2.1: Efecto giroscópico global sobre la motocicleta

Durante la fase de balanceo, el efecto giroscópico del movimiento de las ruedas crea un momento que tiende a virar el vehículo, como se demuestra en la figura 3.4.2.2.1.

3.4.3. EFECTO GIROSCÓPICO DEBIDO AL GIRO DEL MANILLAR

Desde que la dirección de movimiento de la rueda es perpendicular a los ejes de la dirección, girando el manillar de derecha a izquierda se crea un momento giroscópico alrededor del eje de balanceo.

$$M = I \cdot \omega \cdot \Omega \cdot \cos \varepsilon$$

Donde ε es el ángulo de inclinación del manillar.

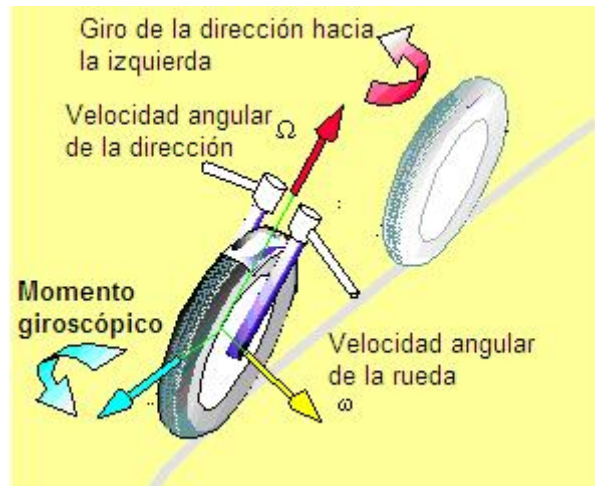


Figura 3.4.3.1: Efecto giroscópico debido al giro del manillar

Este momento tiende a inclinar la motocicleta en la dirección opuesta a la del giro de la dirección; por esta razón, para hacer una curva en una dirección durante una conducción rápida, el piloto debe hacer un rápido giro con el manillar hacia la dirección contraria.

Cuanto mayor sea la velocidad de giro del manillar Ω , mayor será el momento que tiende a inclinar la motocicleta en la dirección opuesta.

3.5. TRANSFERENCIA DE PESO

En este apartado se va a explicar el fenómeno de transferencia de peso en la fase de frenada y aceleración.

Durante la fase de frenada, la carga sobre la rueda delantera aumenta, mientras que la carga sobre la trasera disminuye, esto es debido a este fenómeno de transferencia de peso. Esto sucede porque al frenar, la fuerza de inercia se opone a la frenada.

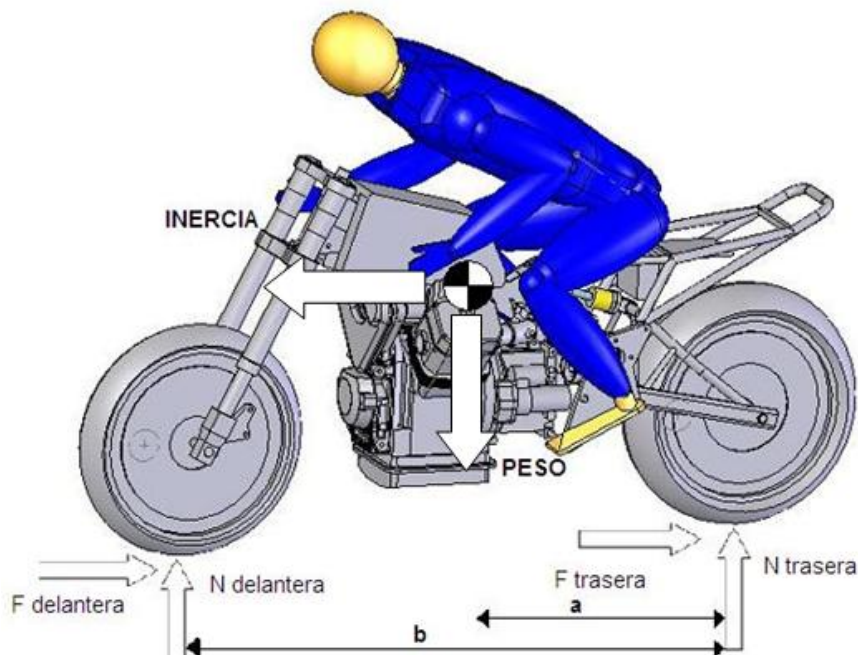


Figura 3.5.1: Motocicleta en fase de frenado.

Si se aplican las ecuaciones de equilibrio al vehículo entero, se podrá obtener una expresión para calcular la transferencia de carga sobre las ruedas.

Equilibrio de fuerzas horizontales: La fuerza de deceleración inercial (m : masa del conjunto, d : deceleración) es igual a la suma de las fuerzas de frenado en cada rueda (F_D : fuerza de frenado de la rueda delantera; F_T : fuerza de frenado de la trasera).

$$m \cdot d = F_D + F_T$$

Equilibrio de fuerzas verticales: El peso ($m \cdot g$: gravedad) es igual a la suma de las reacciones verticales producidas por la carga sobre cada rueda (N_D : reacción de la rueda delantera; N_T : reacción de la rueda trasera).

$$m \cdot g = N_D + N_T$$

Equilibrio de momentos en el centro de gravedad: ($F = F_D + F_T$; h : altura del centro de gravedad; a : distancia del centro de gravedad a la rueda trasera; b : distancia entre ejes)

$$-F \cdot h - N_T \cdot a + N_D(b - a) = 0$$

Con estas ecuaciones obtenemos que la carga dinámica sobre cada rueda es:

$$\text{Rueda delantera: } N_D = m \cdot g \cdot \frac{a}{b} + F \cdot \frac{h}{b}$$

$$\text{Rueda trasera: } N_T = m \cdot g \cdot \frac{(b - a)}{b} - F \cdot \frac{h}{b}$$

Como se puede apreciar, la transferencia de carga ($F \cdot \frac{h}{b}$) es proporcional a la fuerza total de frenado, la altura del centro de gravedad, e inversamente proporcional a la distancia entre ruedas.

Con la intención de evitar el deslizamiento de los neumáticos durante la fase de frenado, la fuerza de frenado no debe exceder el producto entre la carga dinámica sobre el neumático y el coeficiente de adherencia relativo. Este producto es la máxima fuerza aplicable para la condición de límite de adherencia de los neumáticos.

Para el caso de aceleración, el procedimiento a seguir es el mismo. Cabe destacar que la fuerza de inercia y las fuerzas de frenado tendrían sentidos opuestos en el diagrama de fuerzas.

Las ecuaciones vistas son unas ecuaciones simplificadas en las que las cotas de la moto “ b ”, “ a ” y “ h ” permanecen constantes. En la realidad estas distancias varían porque el vehículo tiene suspensiones.



3.6. ACCIÓN DE UN PILOTO EN UN VIRAJE SIMPLE

En este apartado se resumen las acciones que han de realizarse para cambiar la dirección de una motocicleta. Lo primero que debe hacerse es diferenciar las maniobras a bajas y altas velocidades, porque la importancia relativa de los momentos giroscópicos disminuye cuanto menor sea la velocidad.

Si a baja velocidad se quiere girar hacia la derecha, debe moverse el manillar e inclinar la moto ligeramente hacia ese mismo lado mediante un par con las piernas, para poder tomar la curva. Según estudios realizados por la Universidad de Padova, pueden considerarse maniobras de baja velocidad aquellas que se realizan a menos de 15 km/h, siempre a expensas de las características de la motocicleta. A mayor velocidad resulta muy costoso inclinar la motocicleta con la suficiente presteza, sin usar la acción de los momentos giroscópicos.

Sin embargo, si se quiere realizar la misma maniobra a alta velocidad, lo primero que se debe hacer es realizar un rápido giro del manillar hacia la izquierda (en el caso de que queramos girar hacia la derecha), maniobra denominada *contramanillar*, provocando así que la motocicleta se incline hacia la derecha; y de esta forma afrontar la entrada en la curva. A continuación, el piloto debe seguir aumentando el par que ejerce en el mismo sentido que anteriormente (empujar con la mano derecha y tirar con la izquierda), para que la dirección no se cierre en exceso debido al momento giroscópico producido por la velocidad de balanceo. Una vez que se quiere levantar la motocicleta hay que girar el manillar hacia el interior de la curva, esto es, cambiar progresivamente el sentido del par (tirar con la mano derecha y empujar con la mano izquierda) para levantar completamente la moto.

4. MODELADO DE LA MOTOCICLETA

Para el estudio del comportamiento de la motocicleta se realizarán las simulaciones con el programa *Cosmos Motion*, utilizando el modelo creado por José G. Pérez Alonso con el programa *Solid Works*. Estos dos programas pertenecen al mismo conjunto de aplicaciones por lo que serán compatibles.

El modelo se realizó a partir de una motocicleta real, *Guzzi Daytona RS*. Se modeló cada pieza por separado con el *Solid Works*, luego se ensamblaron los diferentes subconjuntos, partes principales del vehículo, y, por último, se ensambló el conjunto final con el que se ha trabajado en las simulaciones.

No se modelaron todos los elementos que componen la motocicleta, se prescindió de componentes como la carrocería, accesorios, tornillos, etc., no esenciales para el cálculo o cuyos cometidos serán realizados por las uniones entre elementos que se definan en el montaje. También se simplificó algunos elementos de geometría compleja, pero conservando las propiedades físicas de la pieza original. Todo ello hace que el peso de la moto disminuya ligeramente respecto a la real, cosa que ocurre cuando una motocicleta de serie es usada en competición.

También cabe destacar que las simulaciones se han simplificado debido a la ausencia de líquidos, como combustible, aceite, etc., y a la ausencia de la fuerza aerodinámica.

El modelo que se utilizará en las simulaciones es el siguiente.

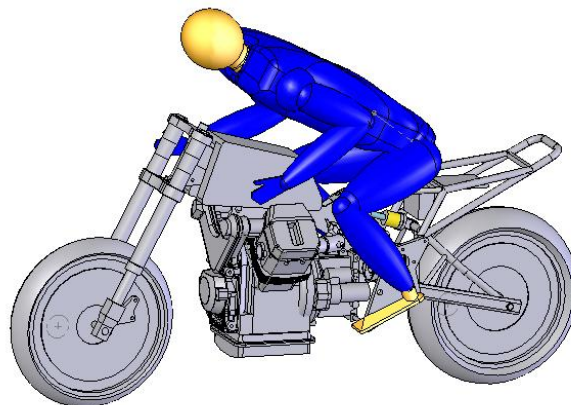


Figura 4.1: Modelo de la motocicleta

4.1. SUBCONJUNTOS

4.1.1. MOTOR, CHASIS, DEPÓSITO Y PILOTO

Este subconjunto se considerará, para las simulaciones, como un sólido rígido. Y está compuesto por el motor, el chasis, el depósito de combustible y el piloto.

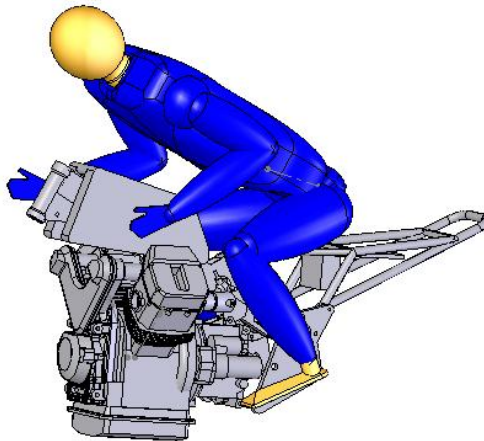


Figura 4.1.1.1: Subconjunto motor-chasis-depósito-piloto

4.1.1.1. Motor

El motor del modelo es un motor de dos cilindros dispuestos en V a 72° . Éste se puede dividir en dos subensamblajes, bloque motor y caja de cambios.

El motor se encuentra unido al chasis y a las pletinas.

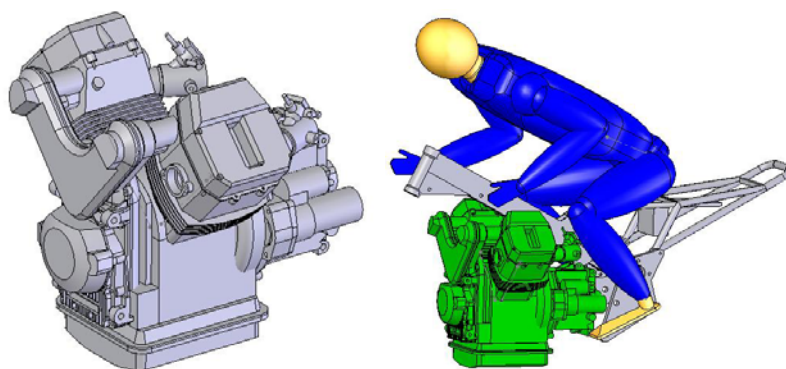


Figura 4.1.1.1.1: Motor

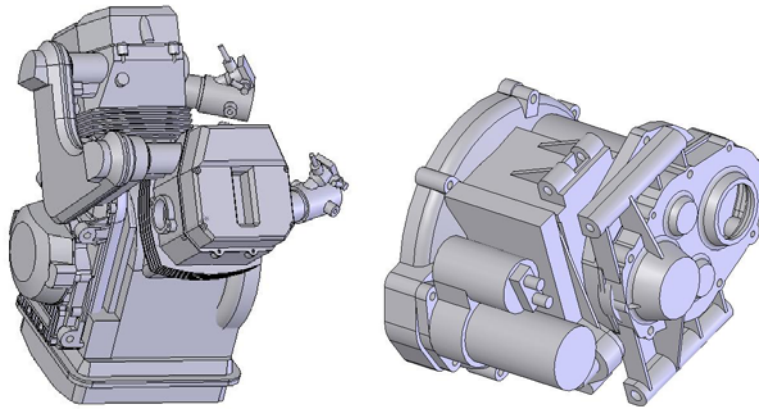


Figura 4.1.1.1.2: Bloque motor y caja de cambios

4.1.1.2. Chasis

La función del chasis es servir de apoyo y sujeción al resto de los elementos que forman la motocicleta. Por una parte, sujetar el motor, y por otra, las ruedas, suspensiones y a los propios ocupantes.

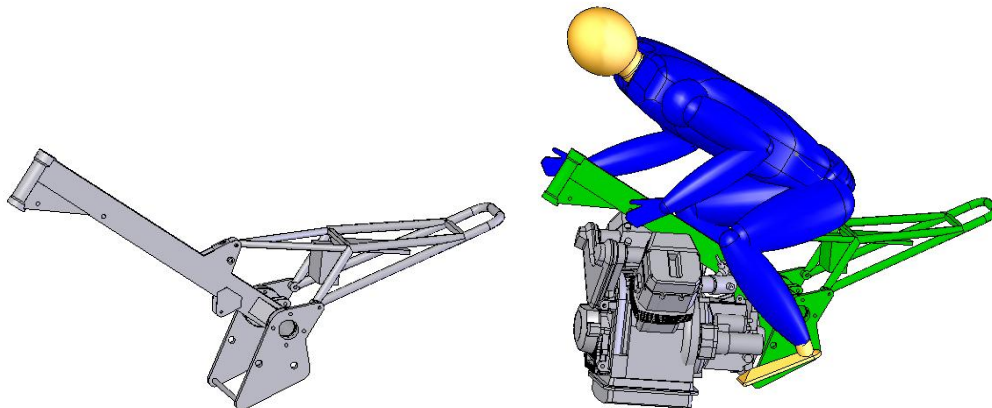


Figura 4.1.1.2.1: Chasis

4.1.1.2.1. Chasis

Es de espina central con sección rectangular, de una sola pieza de chapa de acero. En su parte delantera tiene un saliente vertical tubular, ahí irá montada la horquilla, donde se sitúa la suspensión delantera. Los salientes en forma de triángulo son el punto de unión con el subchasis. Y en la zona inferior, el chasis se une, además de al motor, a las pletinas, a través del saliente tubular horizontal.

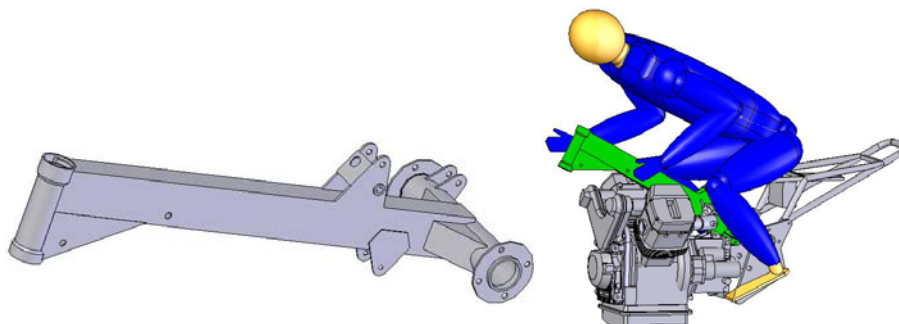


Figura 4.1.1.2.1.1: Chasis

4.1.1.2.2. Subchasis

Estructura de tubo de acero que sirve de apoyo para el piloto. Se une al chasis por su parte superior y a las pletinas por los salientes inferiores.

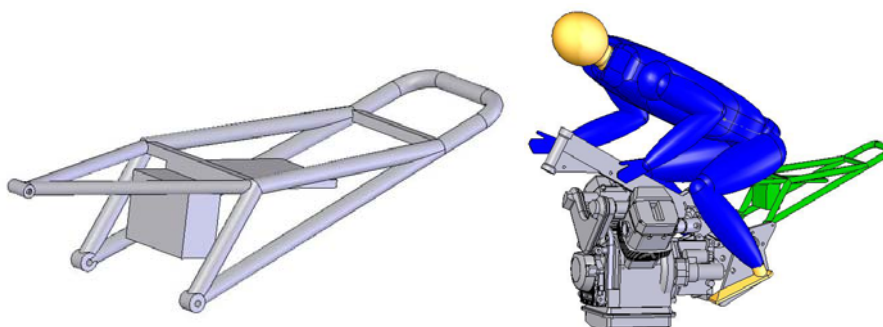


Figura 4.1.1.2.2.1: Subchasis

4.1.1.2.3. Pletinas

Pieza de aluminio que está unida al chasis, subchasis en la parte superior, y al motor en la barra inferior.

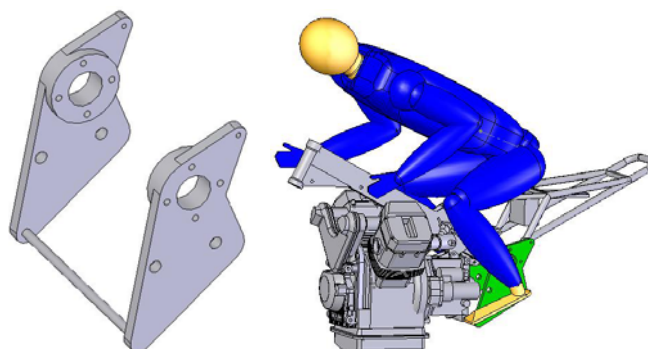


Figura 4.1.1.2.3.1: Pletinas

4.1.1.3. Depósito de combustible

Aunque no es una pieza importante en la estructura de la motocicleta, se ha tenido que modelar debido a su peso. Se encuentra fijado a la parte superior del chasis.

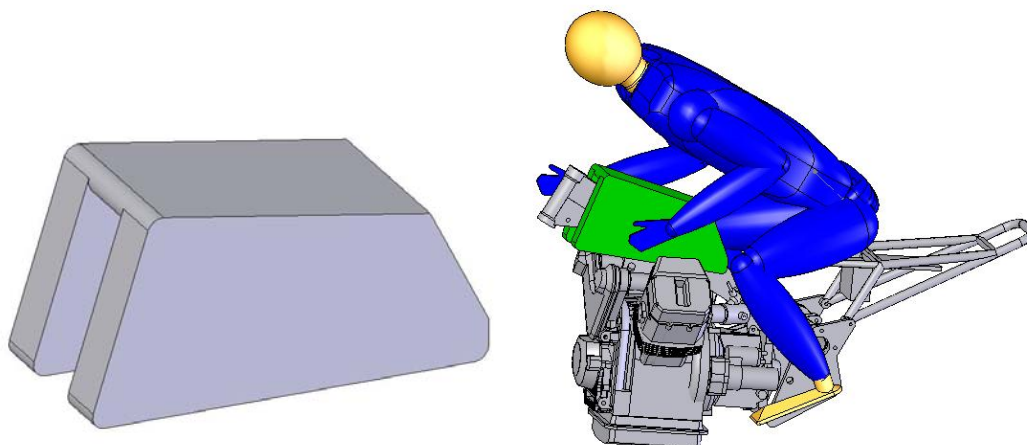


Figura 4.1.1.3.1: Depósito de combustible

4.1.1.4. Piloto

El piloto es un modelo rígido que se encuentra en las librerías de *Solid Works*.

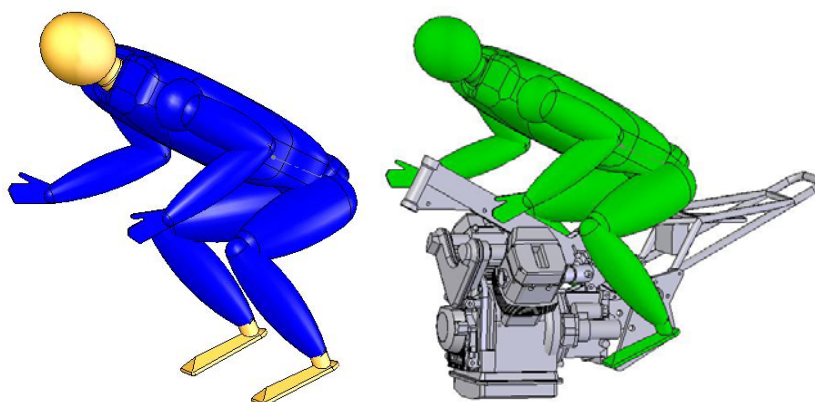


Figura 4.1.1.4.1: Piloto

4.1.2. SUSPENSIÓN DELANTERA

Esta suspensión delantera es una horquilla telescópica invertida, pues las barras están en la parte inferior, y las botellas de suspensión en la parte superior, cercana al chasis.

Este conjunto se encuentra unido al chasis mediante la pipa dirección. Esto es, el eje de dirección, el eje paralelo a las botellas de suspensión y cuyos extremos están fijados a las tijas. Este eje se encuentra dentro del saliente tubular superior del chasis comentado antes. Las tijas son las dos piezas planas paralelas entre sí que mantienen fijos el eje de dirección y las botellas.

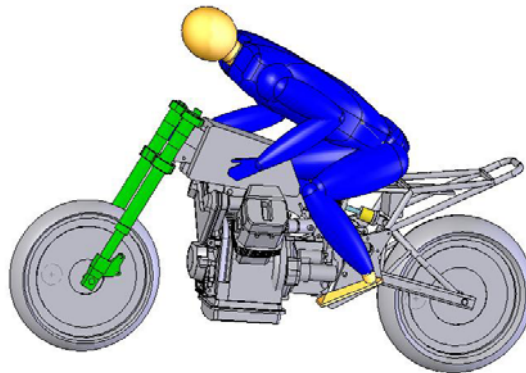


Figura 4.1.2.1: Suspensión delantera

4.1.2.1. Tijas - botellas

Es la parte superior de la suspensión delantera. Este ensamblaje está formado por el eje de dirección, las dos botellas de suspensión (paralelas entre sí y al eje de dirección) y por las dos tijas de aluminio. Las tijas mantienen fijas las botellas.

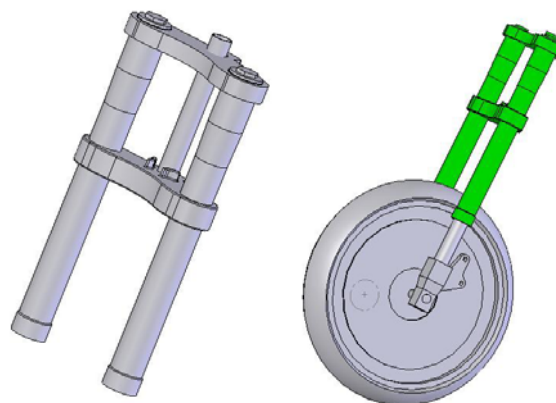


Figura 4.1.2.1.1: Tijas – botellas de la suspensión delantera

4.1.2.2. Barras

Es la parte inferior de la suspensión, en la que las barras se deslizan dentro de las botellas. Está formado por dos barras de 40mm de diámetro y por el eje de la rueda delantera.

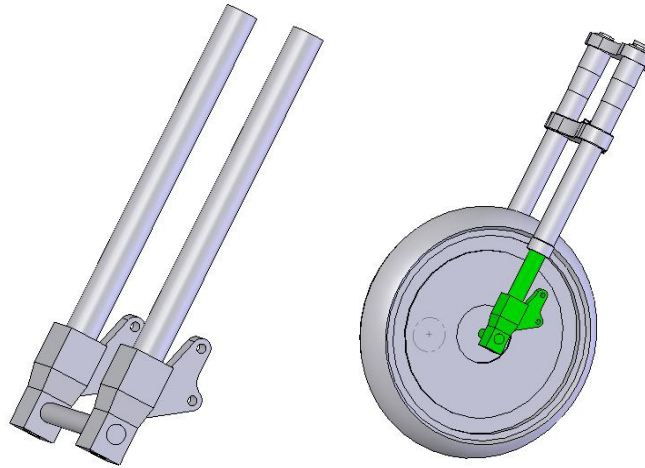


Figura 4.1.2.2.1: Barras de la suspensión delantera y eje de la rueda delantera

4.1.3. BASCULANTE

El basculante es el elemento que conecta la rueda trasera al chasis. Podemos considerar que tiene tres puntos clave de unión. Uno es la unión con la rueda. Los otros dos relacionan el basculante con el chasis. Uno de ellos se encuentra en el extremo del basculante, donde pivota sobre el chasis, permitiendo así el recorrido de la suspensión trasera (segundo punto de relación con el chasis, que se produce mediante el amortiguador trasero).

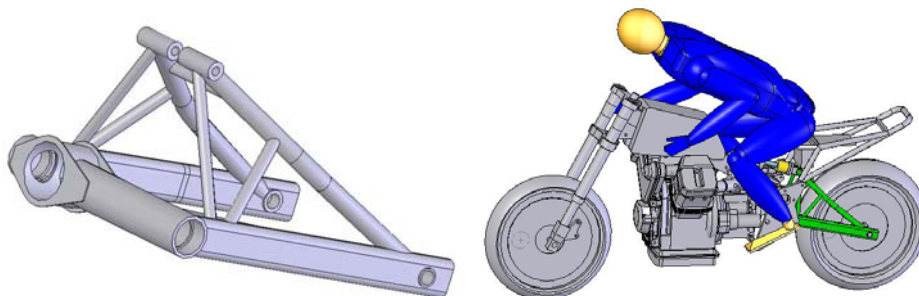


Figura 4.1.3.1: Basculante

4.1.4. RUEDAS

Representan el neumático y la llanta. Hay que recordar que aunque no aparecen detalles como los radios de las llantas o los frenos de disco, todos los modelos cuentan con pesos y momentos de inercia equivalentes a los originales. Cabe destacar que la anchura del neumático trasero es mayor (180 mm) que la anchura de la rueda delantera (120 mm).

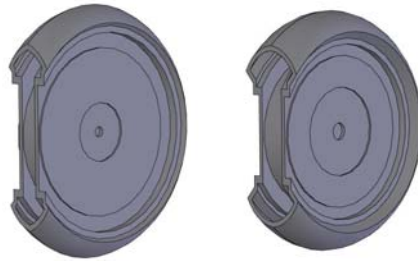


Figura 4.1.4.1: Ruedas

4.1.5. SUSPENSIÓN TRASERA

El sistema consta de un único elemento resorte-amortiguador conectado entre el chasis y el basculante. Se encuentra formado por el cuerpo y el vástago. El cuerpo realiza una función parecida a las de las botellas en la suspensión delantera, por lo que se trata de la parte con mayor anchura del amortiguador.

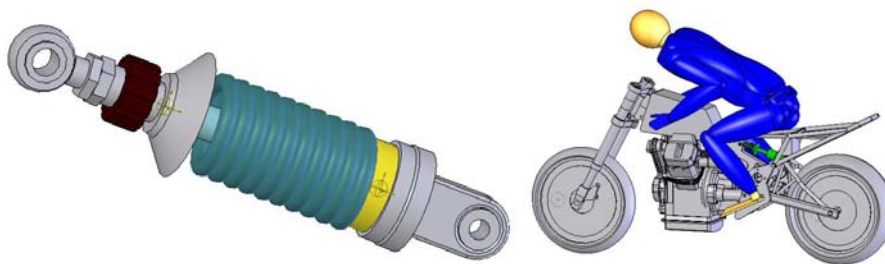


Figura 4.1.5.1: Suspensión trasera

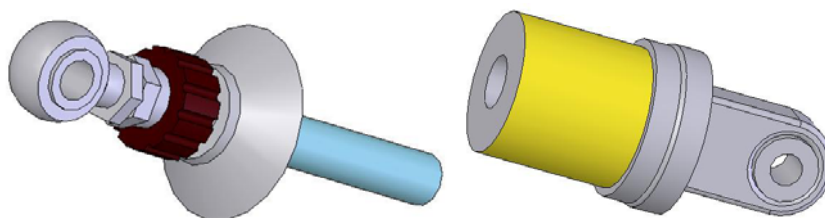


Figura 4.1.5.2: Vástago y cuerpo de la suspensión trasera

4.2. UNIÓN DE LOS ELEMENTOS

Para poder realizar las simulaciones se debe interrelacionar los distintos elementos añadiendo con el *Cosmos Motion* juntas para que existan movimientos relativos entre los componentes.

Las juntas utilizadas son traslacionales, de revolución y fijas, representadas con un prisma dentro de otro, las traslacionales; una bisagra, las de revolución; y un candado, las fijas.

	NOMBRE	TIPO DE JUNTA	ELEMENTOS QUE RELACIONA
1	Pipa de dirección	Revolución	Chasis y eje de dirección
2	Barra derecha	Traslacional	Barra y botella derechas
3	Barra izquierda	Traslacional	Barra y botellas izquierdas
4	Rueda delantera	Revolución	Rueda delantera y eje

Figura 4.2.1: Tabla de juntas de unión de la parte delantera

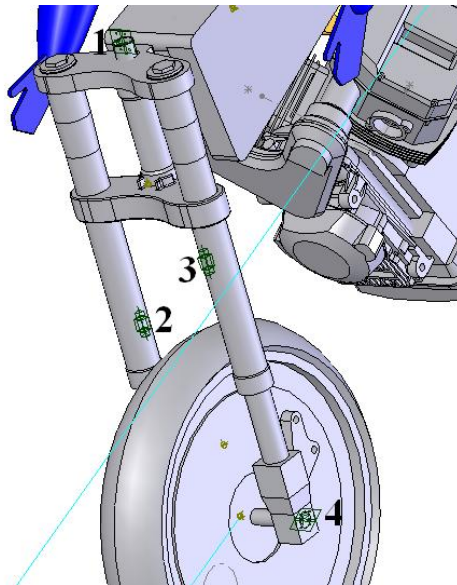


Figura 4.2.2: Juntas de unión de la parte delantera

	NOMBRE	TIPO DE JUNTA	ELEMENTOS QUE RELACIONA
5	Amortiguador-Basculante	Revolución	Cuerpo del amortiguador y bastidor
6	Amortiguador	Traslacional	Cuerpo y vástago del amortiguador
7	Amortiguador-Chasis	Revolución	Vástago del amortiguador y chasis

Figura 4.2.3: Tabla de juntas de unión de la suspensión trasera

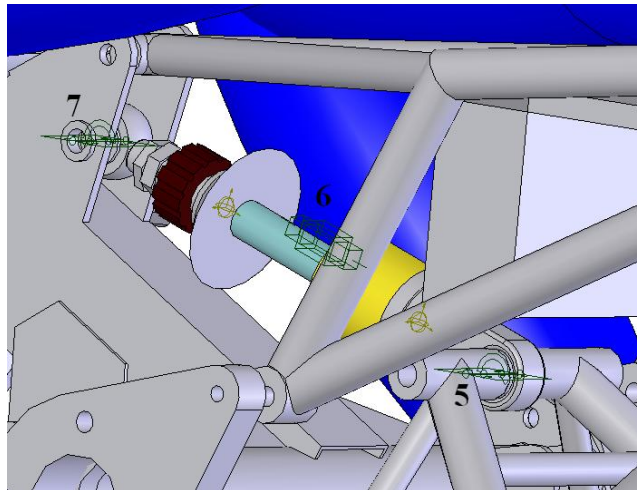


Figura 4.2.4: Juntas de unión de la suspensión trasera

	NOMBRE	TIPO DE JUNTA	ELEMENTOS QUE RELACIONA
8	Rueda trasera	Revolución	Rueda trasera y eje
9	Eje trasero-Basculante	Fijo	Eje trasero y basculante
10	Basculante-Chasis	Revolución	Basculante y chasis

Figura 4.2.5: Tabla de juntas de unión de la parte trasera

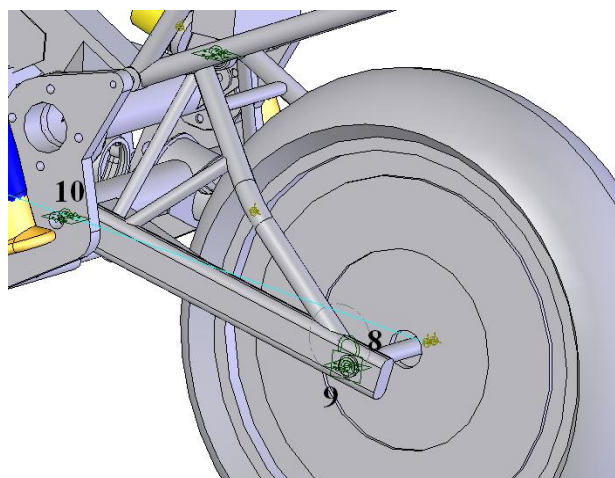


Figura 4.2.6: Juntas de unión de la parte trasera

4.3. SUSPENSIONES

La suspensión delantera consiste en dos resortes y dos amortiguadores, habiendo un resorte y un amortiguador en cada barra de la horquilla. Y la trasera, como se ha comentado anteriormente, está compuesta por un resorte y un amortiguador.

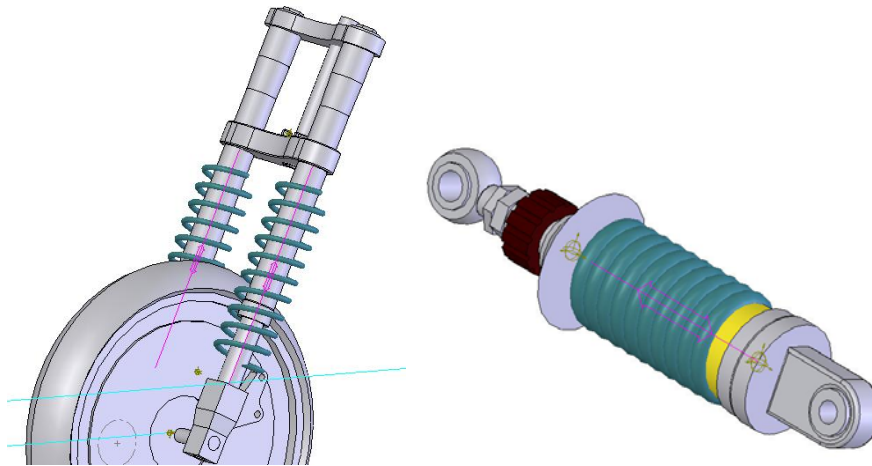


Figura 4.3.1: Suspensiones delantera y trasera

Para la simulación se ha de introducir en el programa las constantes de funcionamiento de los amortiguadores, que son las representadas en la siguiente tabla.

	Suspensión trasera	Suspensión delantera
Constante de rigidez del muelle (k) [N/mm]	85	9,5
Constante de amortiguamiento (c) [N·s/mm]	28	15
Precarga [N]	1020	320

Figura 4.3.2: Tabla de parámetros de las suspensiones

4.4. CONTACTO RUEDA-SUELO

Se ha elegido un *contacto 3D* entre cada rueda y el suelo, que controlará la fuerza de choque y la fuerza de fricción entre ambos elementos.

La fuerza de choque está caracterizada por la rigidez en la frontera de contacto entre las dos superficies, el exponente de la fuerza de deformación, el máximo coeficiente de amortiguamiento en la frontera de contacto y la distancia de penetración a la que ocurre el máximo amortiguamiento.

También existen fuerzas de rozamiento. La fuerza de fricción estática, es la fuerza que debe superarse para poder poner en movimiento un cuerpo respecto a otro con el que se encuentra en contacto. La fuerza de fricción dinámica es la fuerza que se opone al movimiento una vez que este ya comenzó.

Los valores insertados en el programa para las simulaciones son los siguientes.

IMPACTO	
Rigidez [N/m]	60
Exponente	3,5
Amortiguamiento máximo [N-s/mm]	10
Penetración [mm]	0,1016

Figura 4.4.1: Tabla de parámetros de la fuerza de impacto

	FRICCIÓN	
	Estática	Dinámica
Velocidad [mm/s]	0,1	0,5
Coeficiente	0,9	0,9

Figura 4.4.2: Tabla de coeficientes de rozamiento



5. SIMULACIONES

En este proyecto vamos a estudiar el comportamiento de una motocicleta durante el trazado de una curva. Para ello se han analizado tres simulaciones distintas, aceleración de la motocicleta durante la curva, cambio de par de dirección para conseguir una trayectoria deseada con una aceleración dada y frenada durante la curva.

En todas ellas se ha lanzado la motocicleta a una velocidad inicial para facilitar la simulación. Para poder realizar estas simulaciones se ha tenido en cuenta la aceleración de la gravedad $9,81\text{m/s}^2$ y las masas de los componentes del vehículo.

5.1. CONSIDERACIONES PREVIAS

Existen algunos aspectos por los cuales, aunque el fin es acercarse lo más posible a la realidad, nuestro modelo, y por tanto nuestra simulación, está limitado.

Estas consideraciones previas a la simulación son:

- El piloto es un sólido rígido, está fijo al chasis, no tiene movimiento propio. Por lo que no puede girar, desplazarse, ni inclinarse.
- El modelo de la motocicleta está simplificado, además de prescindir de piezas como carrocería, tornillos, etc., no se tienen en cuenta las reacciones del sistema de transmisión.
- El contacto rueda – suelo está simplificado debido a las limitaciones del programa a la hora de modelarlo.
- No hay fluidos en el modelo. En una situación real cuando hay movimiento éstos también se desplazan, cambian de forma, y en cuanto a inercia no se tiene en cuenta.
- Las constantes de amortiguamiento de las suspensiones son aproximadas en base a los datos que hay publicados y a las distintas pruebas previas que se han llevado a cabo con el modelo.



-
- Las ruedas no llevan aire por dentro, no son tan flexibles, ni absorben tantas vibraciones, la adherencia no es la misma, etc. Se están despreciando todos estos efectos en los neumáticos, los cuales en la simulación se consideran rígidos, aunque el contacto con el suelo no es rígido.
 - Aunque en una moto real actúen los dos frenos, en este caso no se tendrá en cuenta el posterior debido a la poca carga que soporta (en comparación con el freno delantero).

5.2. ACELERACIÓN DURANTE LA CURVA

Para poder determinar el par máximo de aceleración que se puede aplicar a la motocicleta hay que analizar dos fenómenos, el deslizamiento de la rueda trasera, es decir, un par superior al máximo provocaría que la rueda trasera deslizara transversalmente provocando un gran aumento del ángulo de balanceo y, por lo tanto, la caída de la motocicleta; y el contacto de la rueda delantera con el suelo, es decir, si superáramos este máximo se produciría una gran transferencia de pesos hacia la rueda trasera, hasta el punto en el que la rueda delantera se levantara y perdiera el contacto con el suelo.

Para facilitar las simulaciones, la motocicleta es lanzada con una velocidad inicial de 50km/h y debido al contacto de la motocicleta con el suelo debemos esperar 0,3 segundos, que es lo que tarda la motocicleta en estabilizarse, para aplicar cualquier fuerza.

La función del par que se ha aplicado a la rueda trasera es en rampa durante un tiempo estimado y luego constante. El tiempo de subida empleado es de 1,5 segundos, ya que si se acelerara el vehículo de una forma más rápida, éste se desestabilizaría y caería en poco tiempo. En la *figura 5.2.1* se muestra un ejemplo de la función empleada.

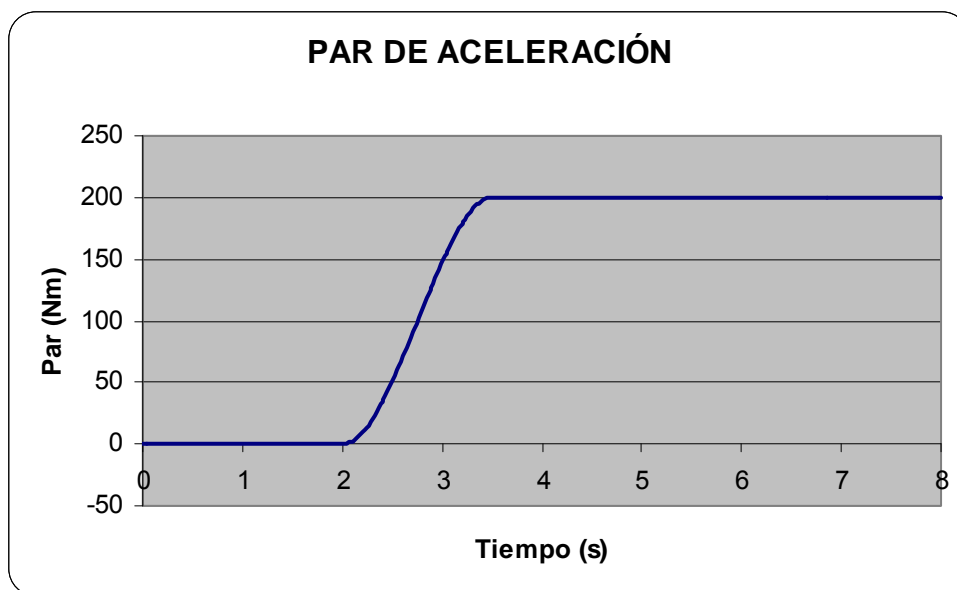


Figura 5.2.1: Par de aceleración

El sentido de este par es el mostrado en la siguiente figura.

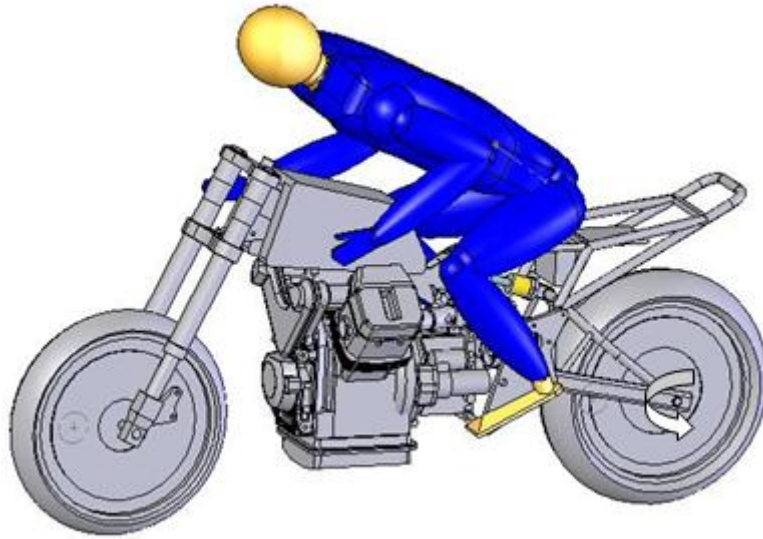


Figura 5.2.2: Sentido del par de aceleración

Para poder realizar este estudio se ha tenido que aplicar un par en la dirección, este par es aplicado directamente en la tija de la dirección, que es donde actúa el manillar. Este par nos sirve para entrar en la curva e inclinar la motocicleta, a partir de ahí mantendremos el par constante para poder analizar bien el comportamiento del vehículo debido al par de aceleración. El par aplicado en la dirección es el representado en la figura 5.2.3.

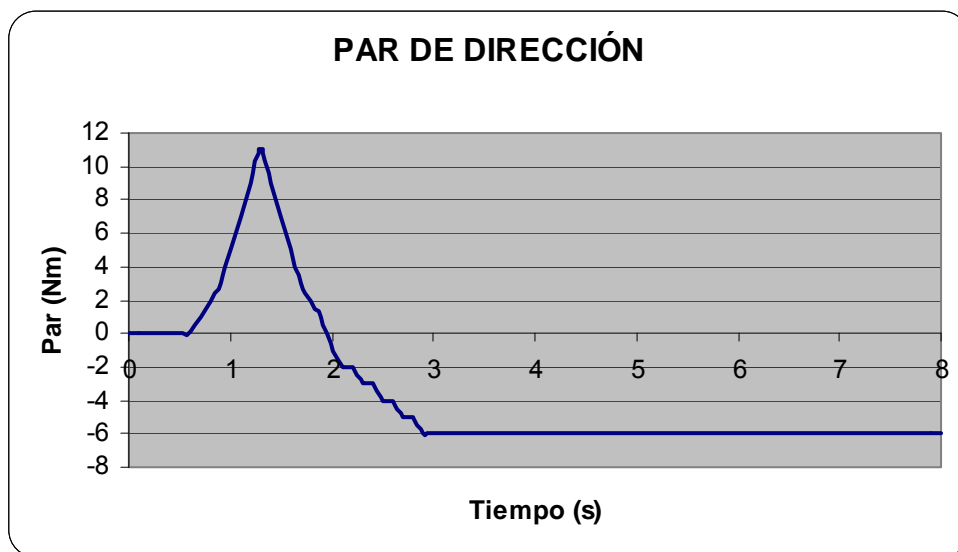


Figura 5.2.3: Par de dirección

En el caso del par aplicado en la dirección el signo positivo corresponde a un giro del manillar hacia la izquierda (empujar con la mano derecha y tirar con la izquierda) y negativo hacia la derecha. En esta función del par se observa claramente como se realiza la maniobra de *contramanillar*, realizando un rápido giro del manillar hacia la izquierda, provocando así, gracias al efecto giroscópico, que la motocicleta se incline hacia la derecha; y de esta forma afrontar la entrada en la curva.

Para estimar el par máximo hemos realizado varias simulaciones con distintos pares. Fijándonos en la *figura 5.2.4* donde se representan las trayectorias de estas simulaciones se ven tres grupos claramente diferenciados. En el primero, la distancia que recorre la motocicleta sin caerse va ligeramente aumentando. En el segundo grupo, la motocicleta no se cae. Y en el tercero, la moto vuelve a caerse y cuanto más par, menos distancia recorre.

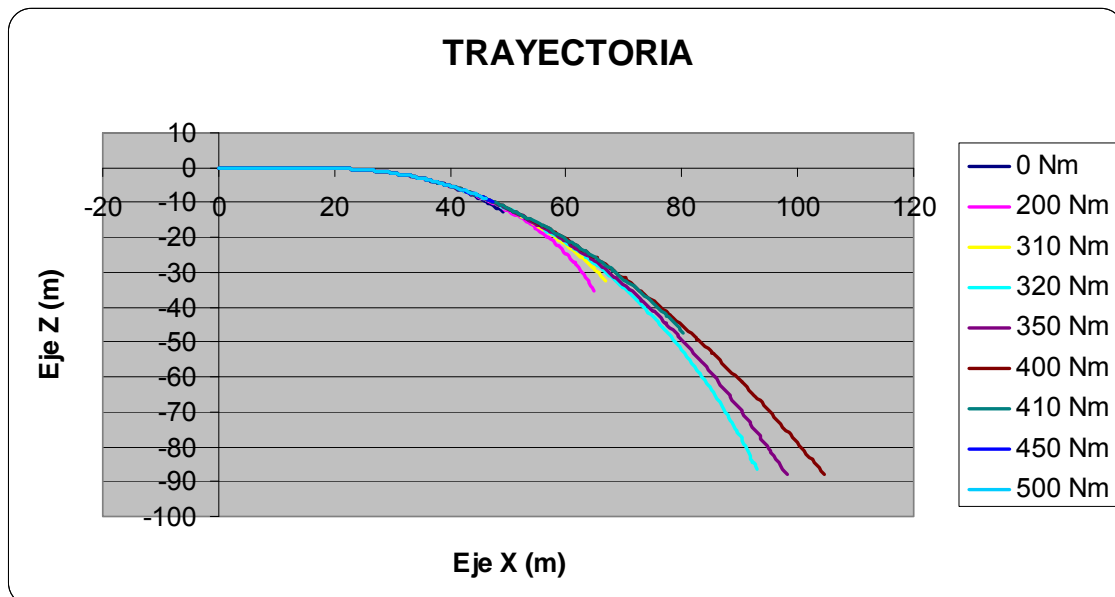


Figura 5.2.4: Trayectorias

En esta figura también podemos apreciar un fenómeno muy importante en la aceleración y es que, cuanto más aceleración, más fuerza centrífuga y mayor es la apertura de la curva.

En la gráfica de los ángulos de balanceo, *figura 5.2.5*, también se distinguen claramente estos tres grupos.

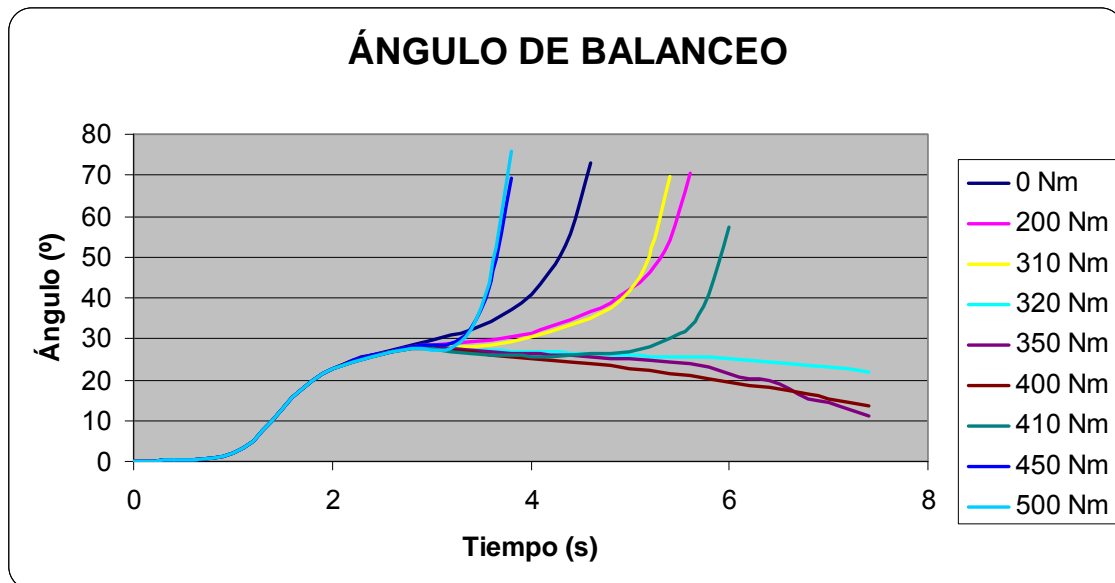


Figura 5.2.5: Ángulos de balanceo

Vamos a analizar los tres grupos por separado porque, por ejemplo, vemos que en el grupo dos de pares de aceleración, la rueda trasera de la motocicleta no desliza transversalmente, ya que si fuera así, la moto caería, pero eso no quiere decir que con un par del grupo uno, menor que los anteriores, la rueda no deslice, ya que la causa de que con un par deslice y que con otro mayor no ocurra, puede ser que con el par mayor, el ángulo de balanceo sea muy pequeño y eso ayude a que la moto no derrape.

5.2.1. GRUPO TRES: PAR DESDE 410 NM EN ADELANTE

En este caso pueden ocurrir dos cosas, que la motocicleta caiga para el otro lado, es decir, hacia fuera de la curva, o que la rueda trasera deslice transversalmente.

Como se ha visto, con un par de aceleración ligeramente menor que estos, la moto tiene un ángulo de balanceo muy pequeño, así que podría ocurrir que aumentando la velocidad, y junto con el par aplicado en el manillar, la moto volcara hacia fuera de la curva. Esto se comprueba fácilmente con la gráfica del ángulo de balanceo, *figura 5.2.1.1*.

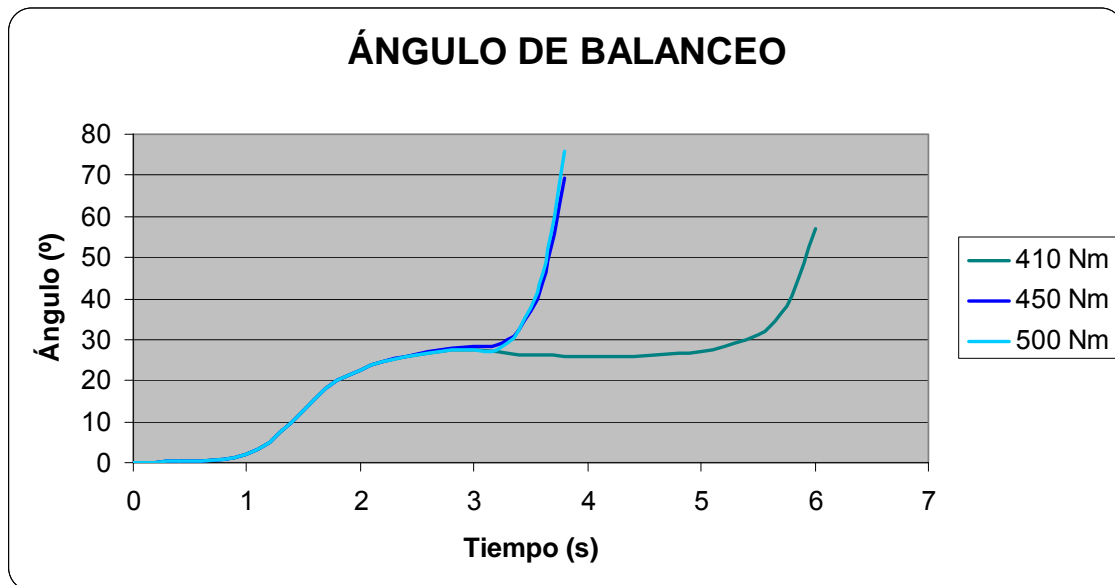


Figura 5.2.1.1: Ángulos de balanceo

En la *figura 5.2.1.1* se ve claramente como la motocicleta, en un momento dado, aumenta su ángulo de balanceo bruscamente en cuestión de décimas de segundo, desde un ángulo, más o menos 30° , que a priori no es un ángulo que sea peligroso a no ser que la moto vaya muy lenta. Por lo tanto, se puede decir que la moto, con un par superior o igual a 410 Nm, derrapa.

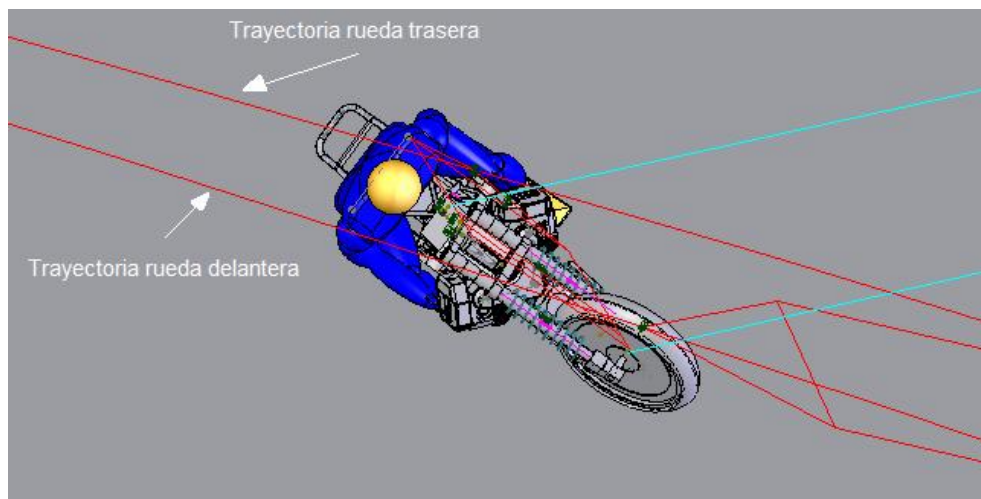


Figura 5.2.1.2: Deslizamiento de la rueda trasera

En la *figura 5.2.1.2* se aprecia como con un par superior a 400 Nm, en este caso 410 Nm, las trayectorias de las ruedas de la motocicleta se separan debido al deslizamiento de la rueda trasera, lo que provoca que la moto continúe por unos instantes el trayecto de forma lateral hasta que cae.

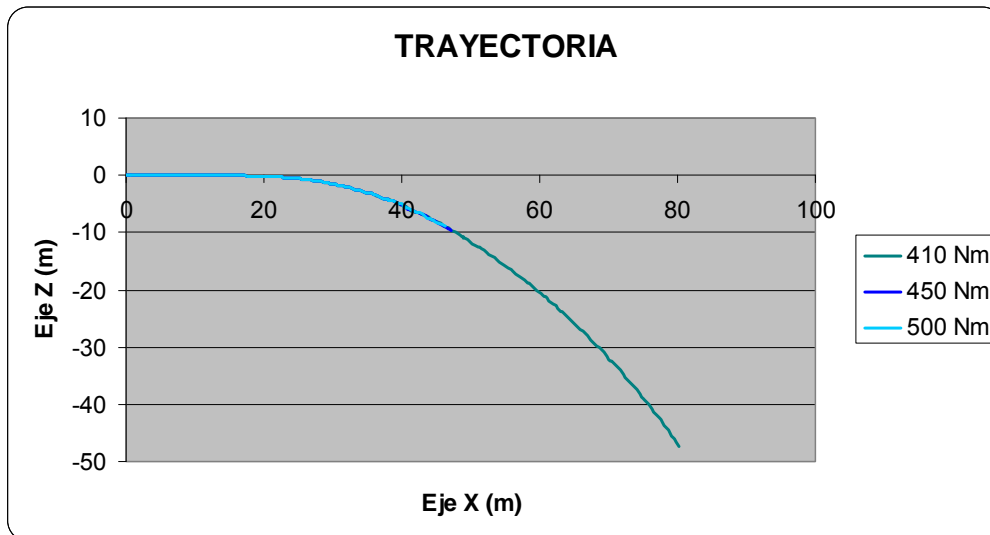


Figura 5.2.1.3: Trayectorias

En la figura 5.2.1.3 de las trayectorias, al igual que en la figura 5.2.1.1 de los ángulos de balanceo se ve que, como era de prever, cuanto mayor sea el par, antes derrapa la motocicleta.

5.2.2. GRUPO DOS: PAR DESDE 320 NM A 400 NM

En este apartado analizaremos si la rueda delantera pierde el contacto con el suelo debido a la transferencia de pesos hacia la parte posterior del vehículo provocada por la aceleración, ya que como se ha visto, la moto no cae, eso quiere decir que la rueda trasera no desliza transversalmente.

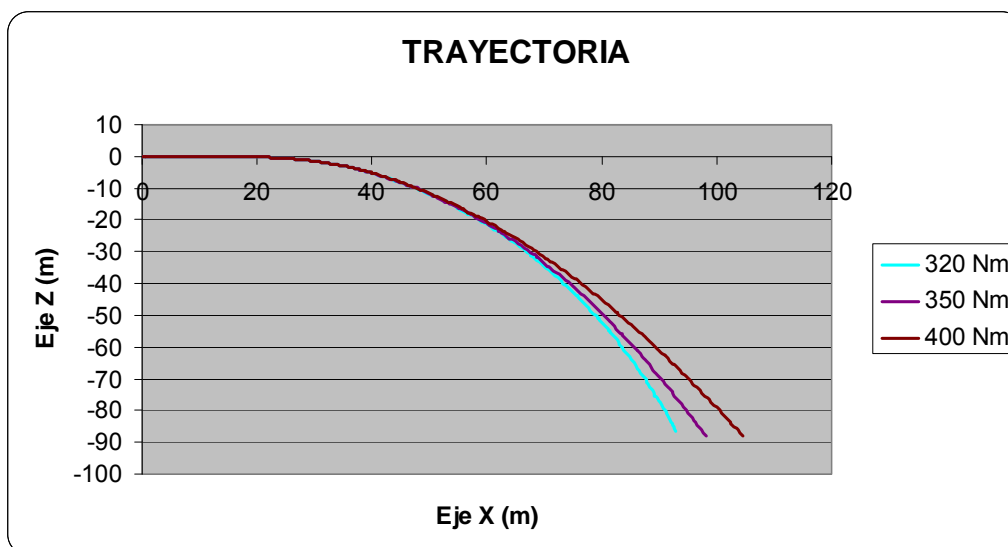


Figura 5.2.2.1: Trayectorias

Como es obvio, en lo primero que nos vamos a fijar para ver si la rueda pierde el contacto con el suelo es en las reacciones que ejerce ésta con el suelo. Debido a que la representación no es muy limpia, se le ha agregado una línea de tendencia. Los valores negativos suponen una fuerza de la rueda sobre el suelo hacia abajo.

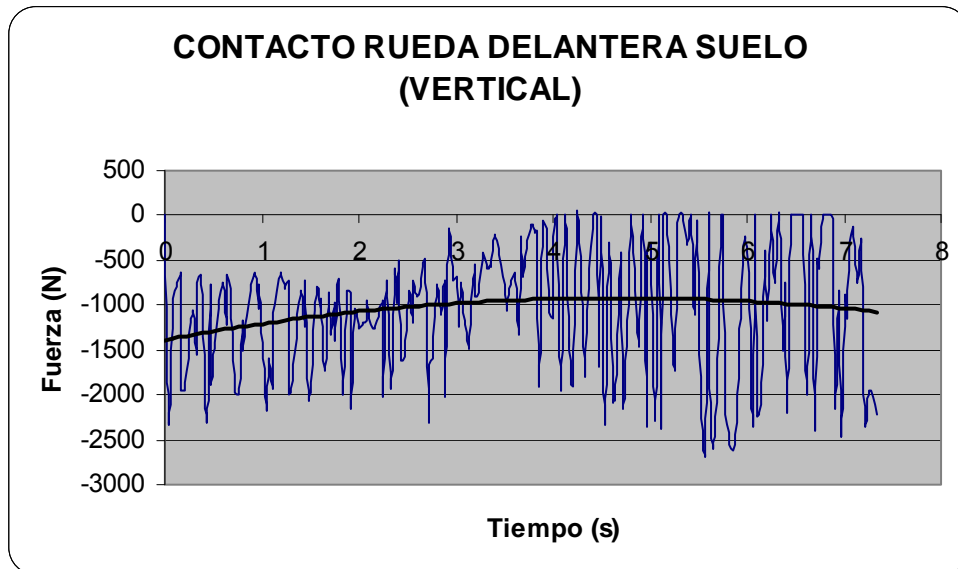


Figura 5.2.2.2: Reacción vertical de la rueda delantera con el suelo (400 Nm)

Como se puede ver, la reacción de la rueda con el suelo va disminuyendo, pero no llega a cero en ningún momento, esto demuestra que la rueda no pierde el contacto con el suelo nunca. Pero, para cerciorar esta afirmación vamos a estudiar el desplazamiento de la suspensión delantera, la cual no debería llegar nunca a ser cero.

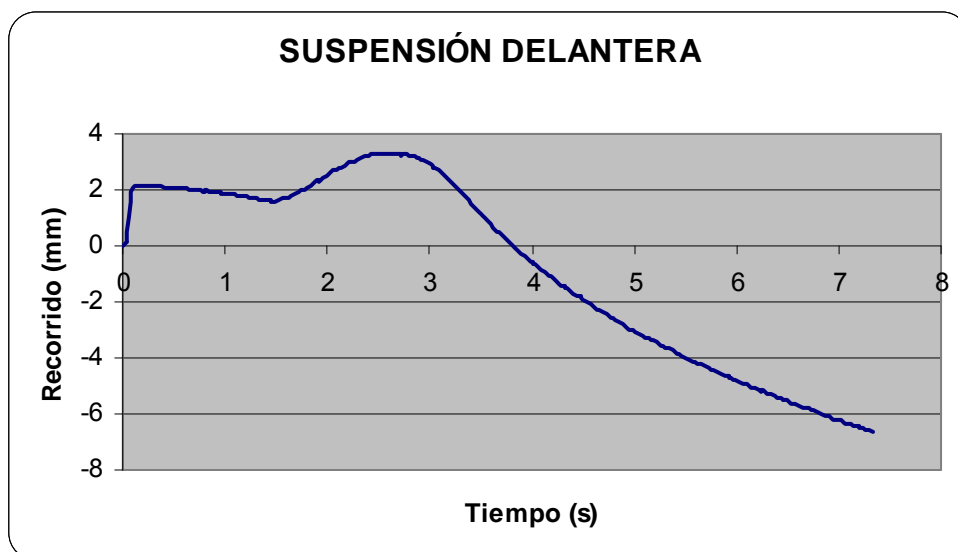


Figura 5.2.2.3: Recorrido de la suspensión delantera (400 Nm)

Se aprecia que hay un recorrido negativo de la suspensión delantera. Esto es debido a un diseño incompleto, ya que en el diseño de las horquillas no se pusieron los topes necesarios para que los muelles no se estiraran más que su longitud de precarga.

Teniendo en cuenta esto, si esos topes existieran, en vez de estirarse más los muelles, lo que ocurriría es que la rueda delantera dejaría de estar en contacto con el suelo, haciendo un “caballito”. Esto ocurre debido a que en este caso, el ángulo de balanceo es muy pequeño, porque si fuera mayor, la moto deslizaría sobre su rueda trasera y caería en vez de levantarse.

Por lo tanto, la gráfica del contacto de la rueda delantera con el suelo refleja que efectivamente la rueda no deja de tocar el suelo porque la suspensión delantera se estira por encima del valor de precarga del muelle.

Todo esto demuestra que el par de 400 Nm es demasiado elevado y para comprobar que esto mismo ocurre en todo el grupo vamos a analizar el valor más bajo, 320 Nm.

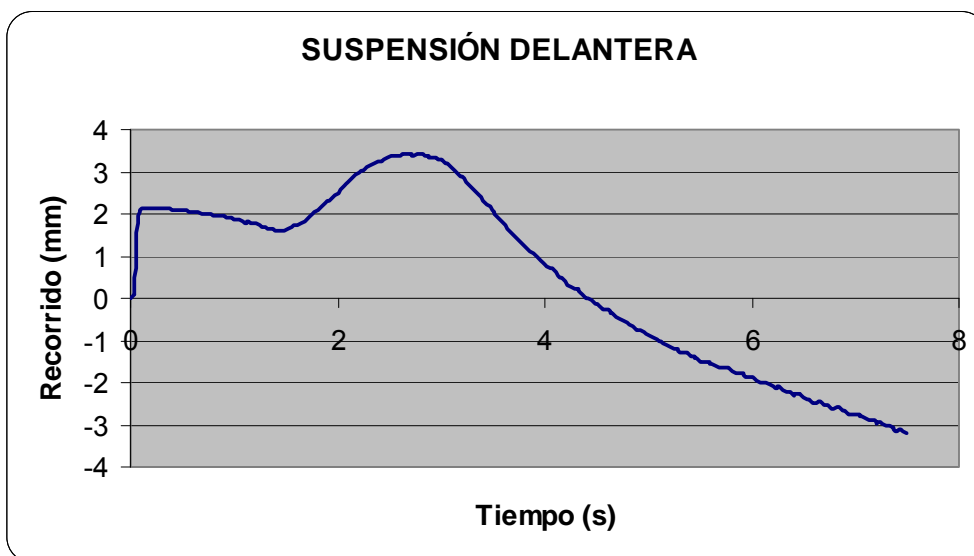


Figura 5.2.2.4: Recorrido de la suspensión delantera (320 Nm)

En la figura 5.2.2.4 vemos que ocurre lo mismo que con los 400 Nm, la rueda se levantaría y perdería el contacto con el suelo. Por lo tanto, llegamos a la conclusión que con pares desde 320 Nm a 400 Nm la rueda delantera pierde el contacto con el suelo.

5.2.3. GRUPO UNO: PAR DESDE 0 A 310 NM

Visto que en el resto de casos o la rueda trasera desliza o la rueda delantera se levanta, tendremos que buscar el par máximo aplicable a la rueda trasera en este grupo. En este caso el par máximo será el mayor en el que la moto no derrape.

Para empezar estudiaremos el par de 310 Nm, que es el mayor.

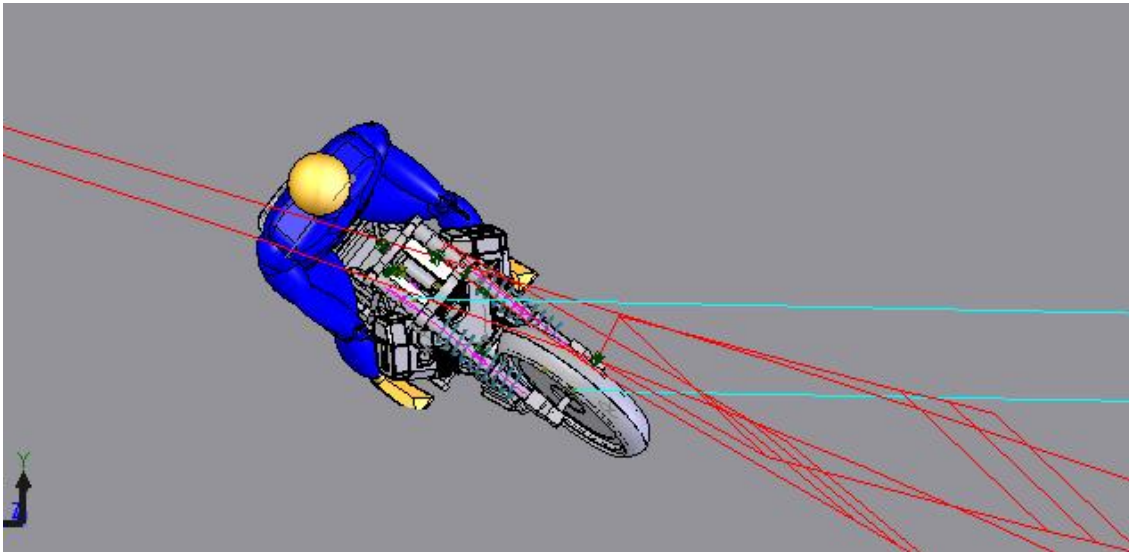


Figura 5.2.3.1: Motocicleta con ángulo de balanceo de 50° (310 Nm)

Para ver si la rueda trasera desliza primero nos fijamos en la simulación en sí. La *figura 5.2.3.1* muestra la motocicleta con un ángulo de balanceo de 50°, es decir, en plena caída, ya que en 0,2 segundos la moto estará en el suelo y por lo que se ve en la imagen las trayectorias de las dos ruedas no se han separado prácticamente, es decir, que la rueda trasera no ha deslizado transversalmente.

También podemos ver si desliza en la gráfica de los ángulos de balanceo, *figura 5.2.3.2*. Podríamos decir que la moto derrapa si cae bruscamente o antes de tiempo.

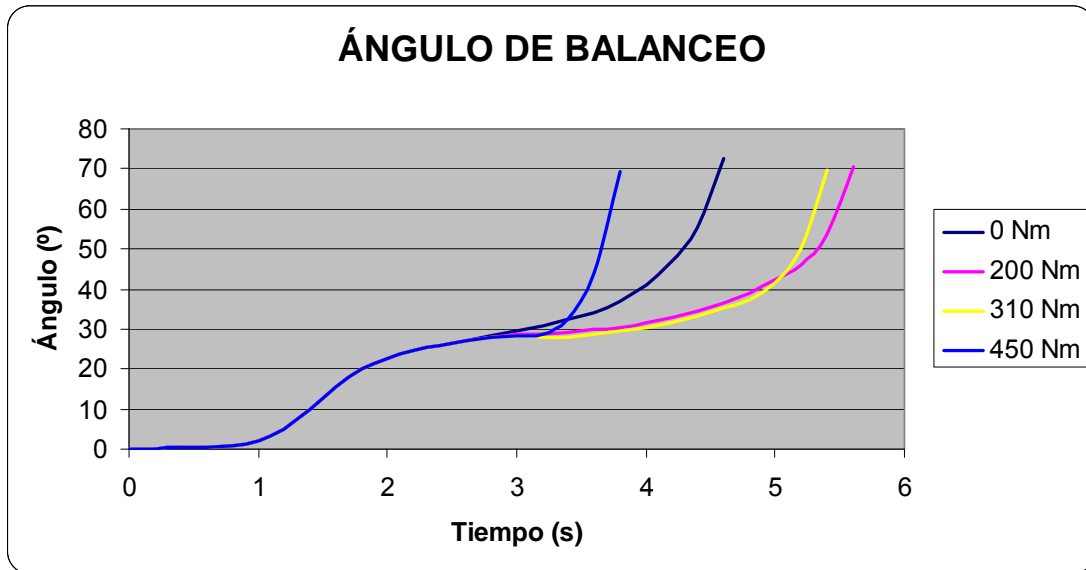


Figura 5.2.3.2: Ángulos de balanceo

Lo normal es que el ángulo de balanceo vaya aumentando paulatinamente hasta alcanzar unos 40° y a partir de ahí el ángulo aumente bruscamente. En la figura 5.2.3.2 vemos como hasta el par de 310 Nm ocurre así, no como en el ejemplo de 450 Nm, en el que la moto al llegar a los 30° cae rápidamente al deslizar su rueda trasera.

También se ve como con un par de 310 Nm la moto cae antes que con un par de 200 Nm, esto puede ser debido a un pequeño deslizamiento, pero tan pequeño que no se va tener en cuenta, ya que el comportamiento con los dos pares es prácticamente igual. Esto también se puede ver en la figura 5.2.3.3.

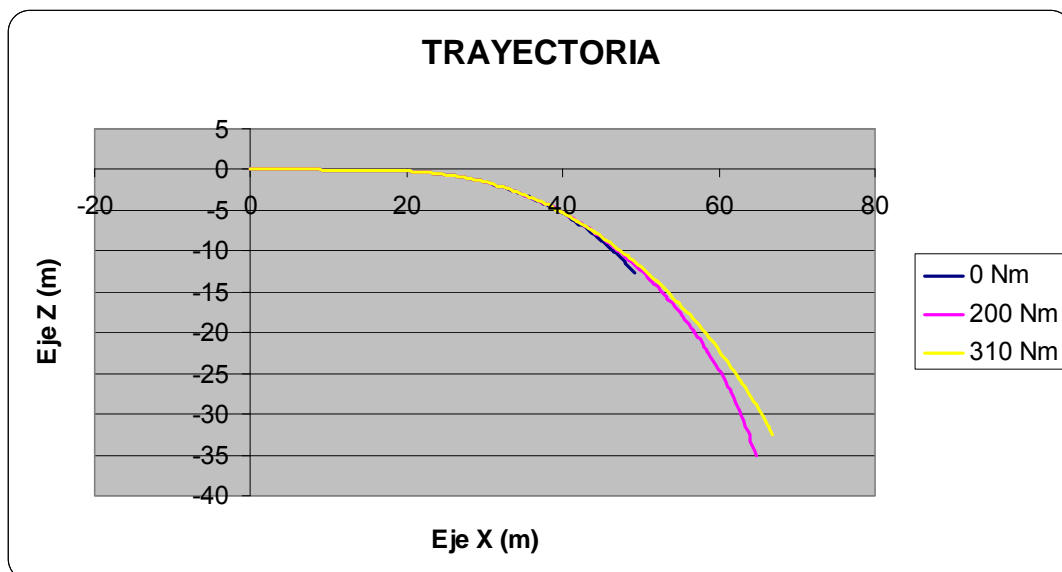


Figura 5.2.3.3: Trayectorias

Para seguir estudiando el comportamiento de la motocicleta al acelerar en una curva vamos a analizar los distintos aspectos comparando los casos de par máximo, 310 Nm, y sin par de aceleración.

Para estudiar el comportamiento de las ruedas se observará la reacción que ejerce cada rueda con el suelo. Debido a que las representaciones no son muy limpias, se les ha agregado una línea de tendencia a cada grupo de datos. En las gráficas de las reacciones verticales los valores negativos suponen una fuerza de la rueda sobre el suelo hacia abajo y en las reacciones horizontales los esfuerzos positivos tendrán dirección hacia la izquierda del piloto.

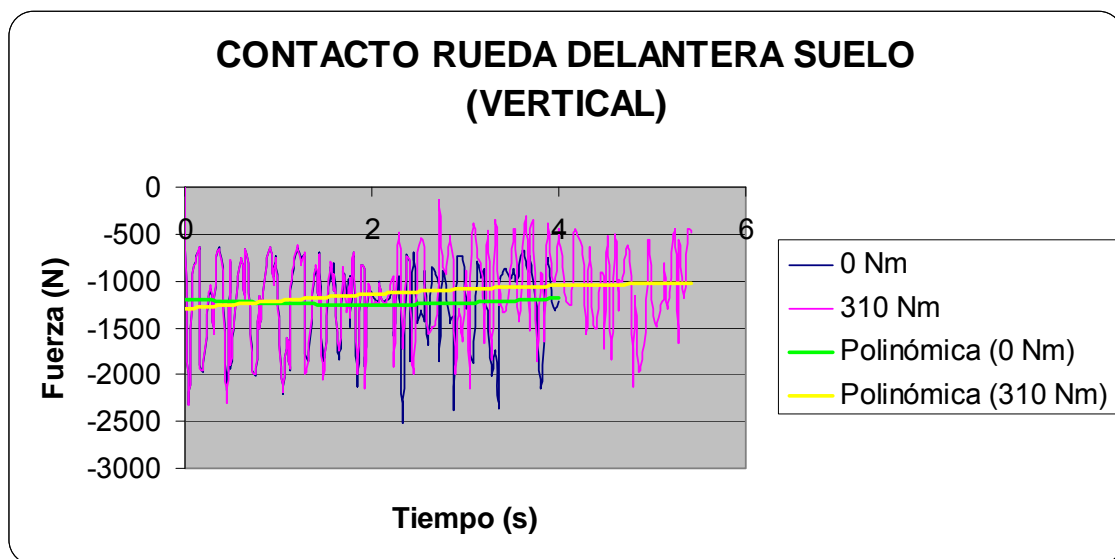


Figura 5.2.3.4: Reacción vertical de la rueda delantera con el suelo

En la figura 5.2.3.4 se puede observar como al aplicarle un par de aceleración las reacciones disminuyen, esto es debido a la transferencia de pesos hacia atrás en la moto a causa de la aceleración. También se puede ver que en ningún caso la aceleración es tan alta como para hacer que la rueda delantera pierda el contacto con el suelo.

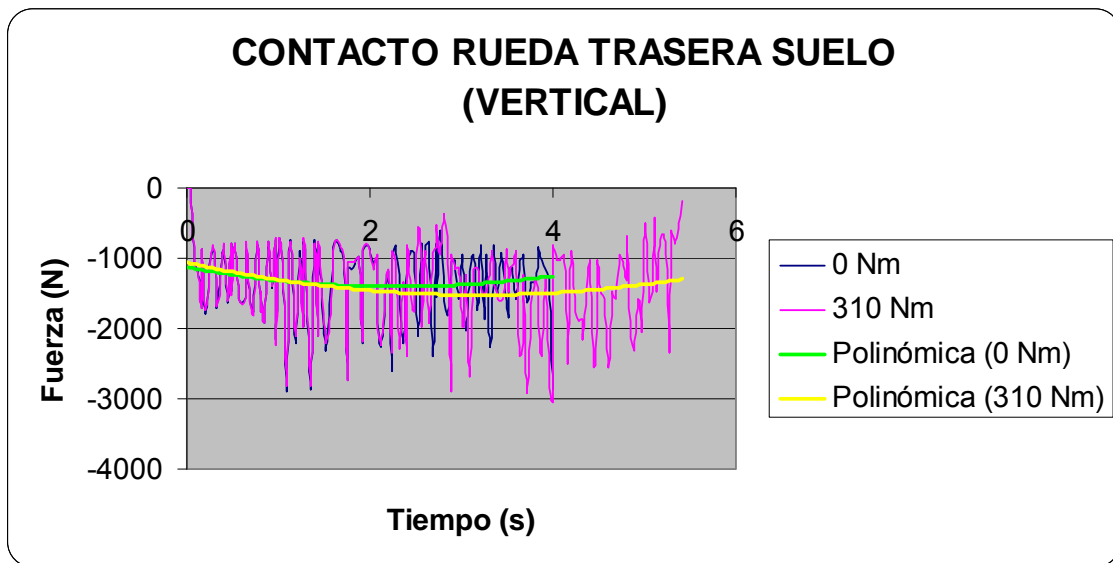


Figura 5.2.3.5: Reacción vertical de la rueda trasera con el suelo

Por la misma razón por la que las reacciones de la rueda delantera con el suelo disminuían, ahora aumentan. Es decir, la transferencia de pesos hacia atrás hace que las reacciones verticales de la rueda trasera con el suelo aumenten.

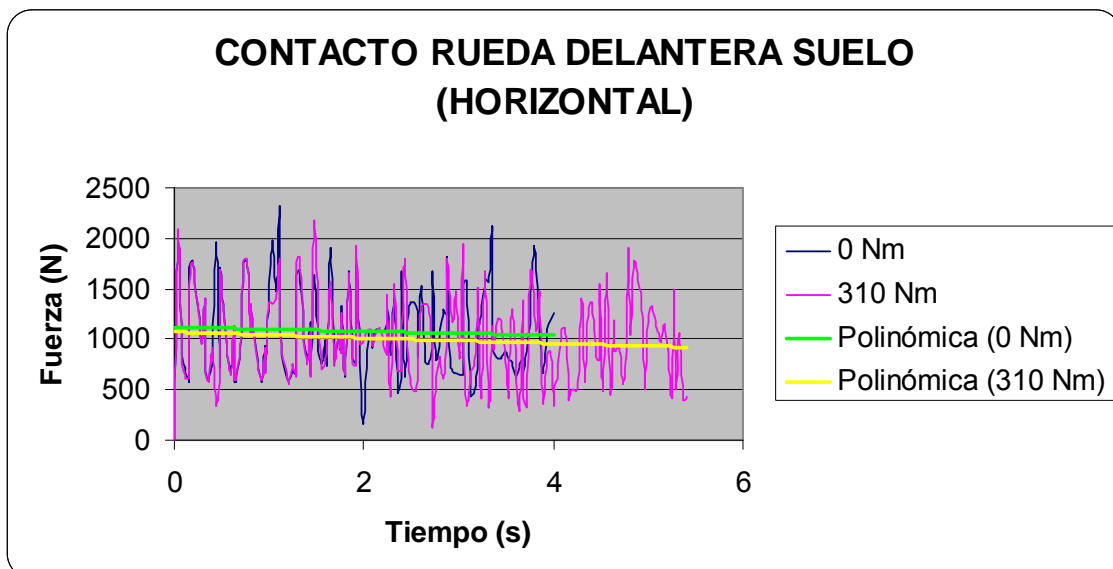


Figura 5.2.3.6: Reacción horizontal de la rueda delantera con el suelo

En este caso las reacciones se mantienen constantes, con o sin par, ya que las reacciones horizontales se dan en la rueda trasera, que es la que tiende a deslizar.

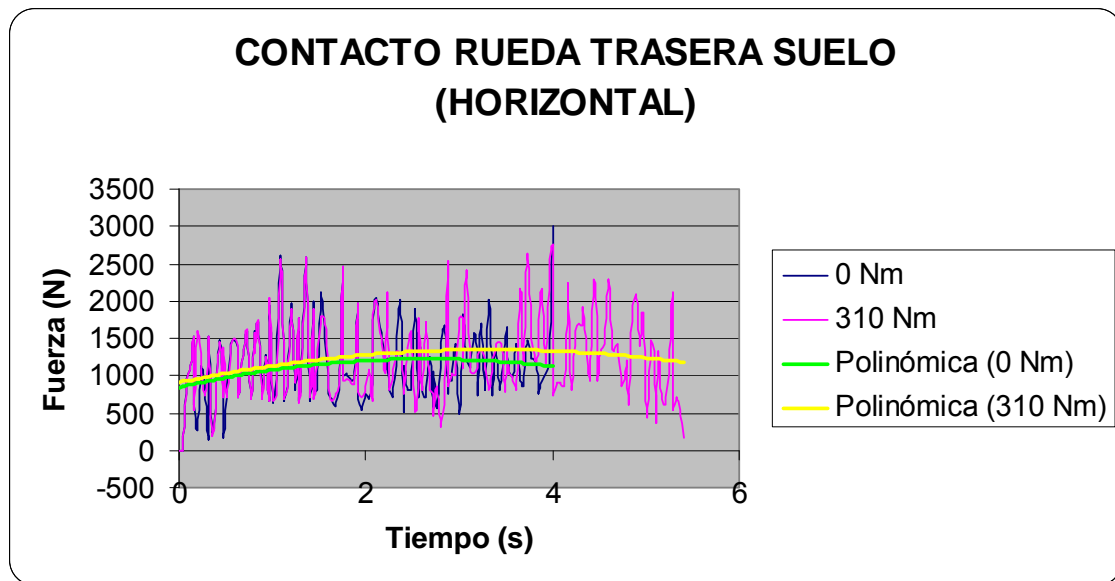


Figura 5.2.3.7: Reacción horizontal de la rueda trasera con el suelo

Como se ha dicho antes, la rueda que tiende a deslizar es la trasera, por lo tanto, es la que aumenta su reacción horizontal con respecto al suelo. Conforme aumentamos el par de aceleración, aumenta la fuerza centrífuga y por lo tanto las reacciones horizontales de la rueda con el suelo.

A la hora de analizar los resultados obtenidos de las suspensiones, lo primordial será comprobar que la máxima distancia recorrida por cada una de ellas no supera el tope físico. Este tope es la distancia de recorrido libre que hay entre botella y barra de suspensión delantera, y entre vástago y cuerpo del amortiguador posterior. Los valores máximos que no se han de sobrepasar son: para la horquilla 118 mm y para la suspensión trasera 70 mm. En ambos casos los valores positivos representan la compresión.

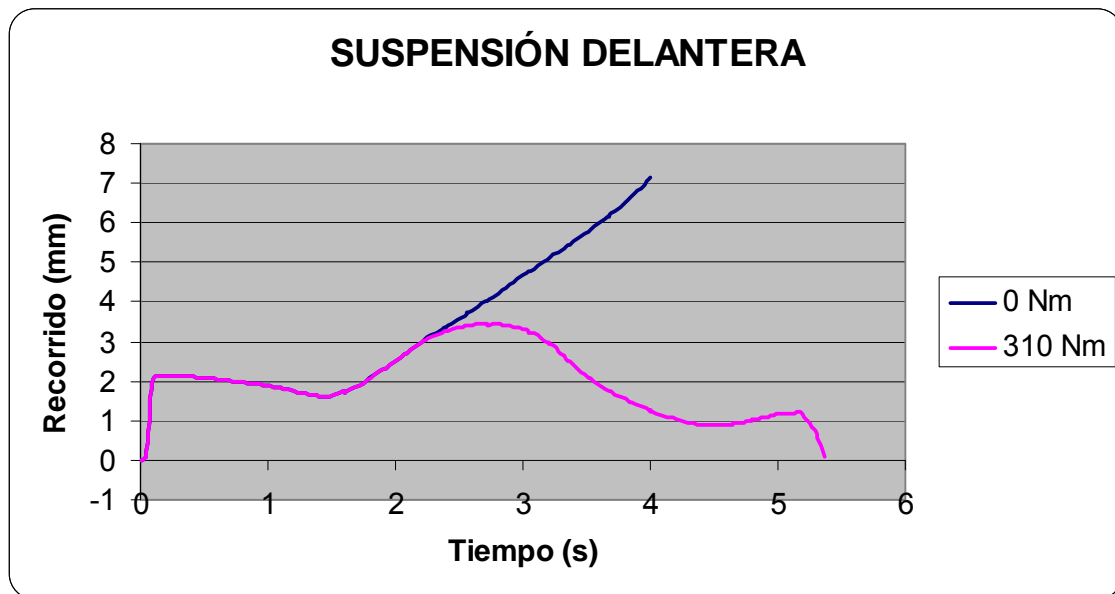


Figura 5.2.3.8: Recorrido de la suspensión delantera

En ninguno de los dos casos nos acercamos ni remotamente al valor máximo de compresión, 118 mm, por lo tanto no hay que preocuparse por este aspecto. Se aprecia como al comienzo de la simulación la suspensión se comprime 2 milímetros en un instante, esto es debido a que lo primero que hace la moto es apoyarse en el suelo y de ahí la compresión. Luego, debido a la curva, es decir, a la inclinación de la moto y a la fuerza centrífuga, la suspensión se va comprimiendo cada vez más. Pero, fijándonos en el caso de 310 Nm, vemos cómo al aumentar la aceleración, la transferencia de pesos hacia la parte trasera de la motocicleta, hace que se libere un poco esta suspensión y deje de comprimirse, llegando a un punto en el que la reacción causada por la transferencia de pesos supera a la de la fuerza centrífuga, haciendo que la suspensión se vaya estirando. El último escalón de la función corresponde al momento de la caída, en el que las ruedas van perdiendo el contacto con el suelo.

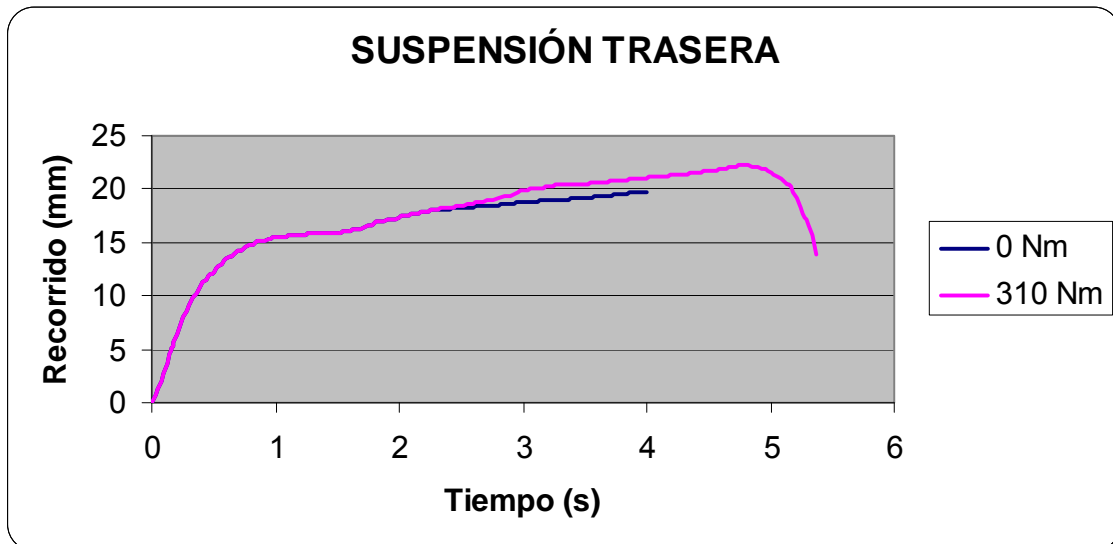


Figura 5.2.3.9: Recorrido de la suspensión trasera

Con la suspensión trasera pasa prácticamente lo mismo que con la delantera. Tampoco nos acercamos al valor máximo de compresión, 70 mm. Al comienzo de la simulación la suspensión también se comprime debido al apoyo en el suelo. Luego, debido a la fuerza centrífuga se va comprimiendo. Pero, en este caso, como es obvio, ocurre lo contrario a lo de la suspensión delantera, debido a la transferencia de pesos hacia la parte trasera de la motocicleta, la suspensión se comprime más. Y como ocurría con la otra suspensión, el último escalón corresponde al momento de la caída.

5.3. PAR EN LA DIRECCIÓN PARA TRAYECTORIA DADA

En este apartado, en vez de dejar fijo el par de la dirección e ir cambiando el par de aceleración con el fin de hallar el par máximo aplicable a la rueda, se va a dejar fijo el par de aceleración y se irá probando con distintos pares aplicados en la tija de dirección hasta conseguir que la motocicleta realice la trayectoria deseada.

Para ello vamos a utilizar un par de aceleración cualquiera, por ejemplo, 200 Nm. Se ha escogido este valor en vez del par máximo porque este último, al estar al límite de la estabilidad, podría dar problemas.

La trayectoria que queremos que realice la motocicleta es la que realiza ésta sin par de aceleración y con el par de dirección utilizado en el apartado anterior. Se quiere pasar de la trayectoria rosa a la azul de la *figura 5.3.1*. En esta gráfica se representa únicamente la zona donde las trayectorias se separan, que es la zona que nos interesa.

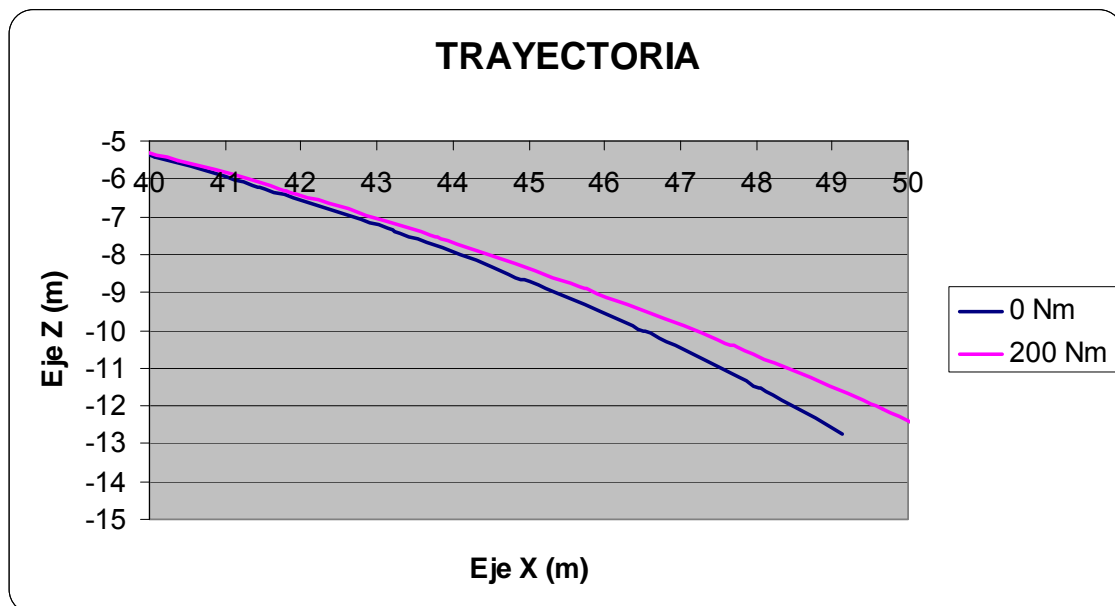


Figura 5.3.1: Trayectorias

Tras muchas simulaciones, se llegó a alcanzar la trayectoria deseada, representada en la *figura 5.3.2*.

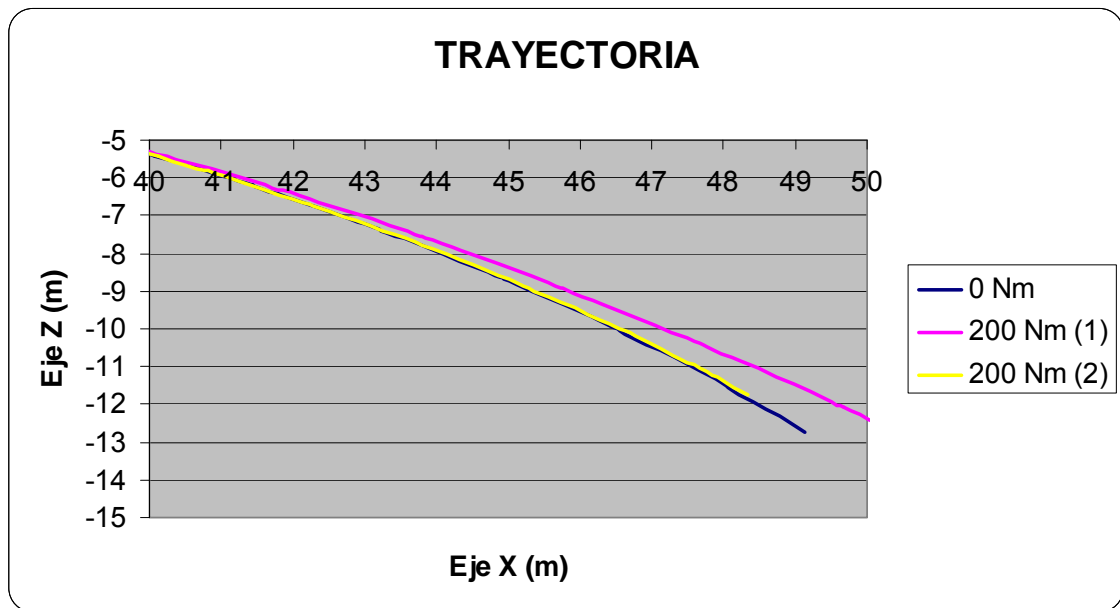


Figura 5.3.2: Trayectorias

Como se puede apreciar, la trayectoria alcanzada es prácticamente igual a la deseada. La diferencia máxima que existe entre ellas es de 8 cm, lo cual, es totalmente despreciable.

Para lograr dicha trayectoria, el par que se ha aplicado en la tija de dirección es el representado en la figura 5.3.3, siendo el signo positivo el giro del manillar hacia la izquierda (empujar con la mano derecha y tirar con la izquierda) y el negativo hacia la derecha.

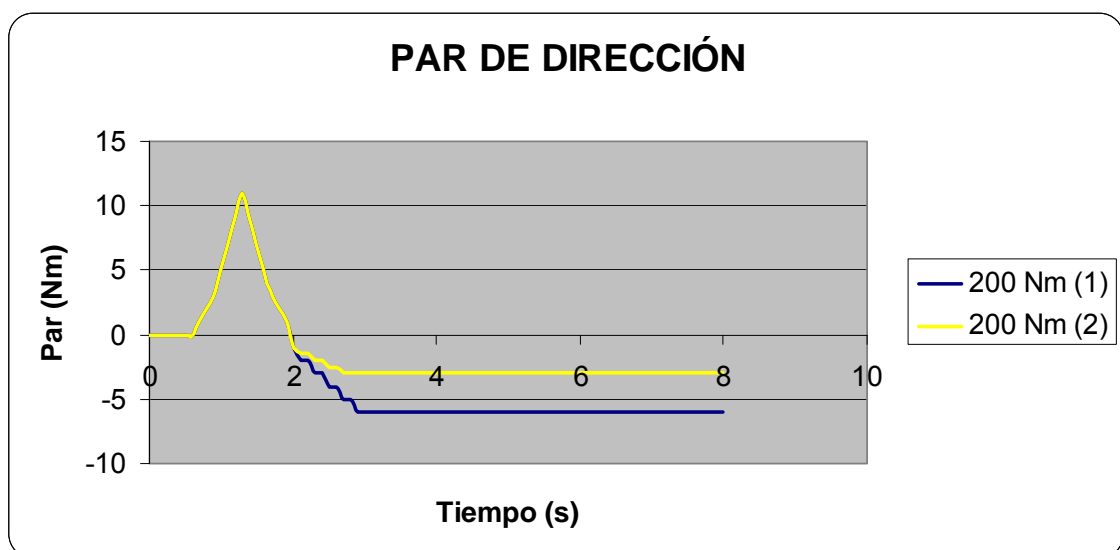


Figura 5.3.3: Par de dirección

El par aplicado en los dos primeros segundos es exactamente igual, ya que hasta el segundo dos a la moto no se le aplica ningún par de aceleración y, por lo tanto, las trayectorias van a ser iguales. A partir de este instante se le aplica prácticamente la misma función, pero de menor valor. Si antes se le aplicaba al manillar un valor máximo hacia la derecha de 6000 Nm, ahora sólo se le aplica un valor máximo 3000 Nm.

La razón por la que se disminuye el par es que al aumentar la velocidad de la motocicleta se aumenta su fuerza centrífuga y, por lo tanto, disminuye el ángulo de balanceo. Y como lo que se pretende es que la moto se incline más para hacer una curva más cerrada se le ha de disminuir el par en la dirección, el cual, lo que hace durante la curva es disminuir el ángulo de balanceo.

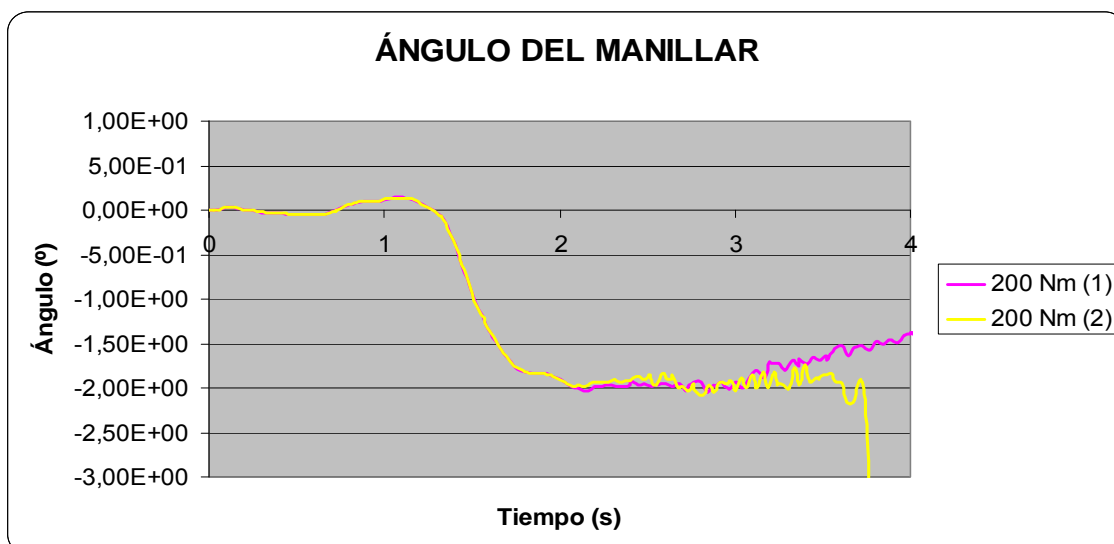


Figura 5.3.4: Ángulo de giro de manillar

Se aprecia como a partir del segundo 2 en que se disminuye el par sobre la dirección, se produce una disminución del ángulo de giro de manillar lo que provoca que la moto tumbese más según lo explicado en el apartado sobre el efecto giroscópico del giro de manillar. Las diferencias posteriores a los 2.8 s aproximadamente, son explicables debido a las distintas velocidades y radios de curva de los dos casos descritos y al efecto giroscópico en el manillar debido al balanceo, ya que, en el caso de la curva cerrada (2), la velocidad angular de balanceo es mayor y, por lo tanto, el momento giroscópico que aparece sobre el manillar también es mayor y como este momento giroscópico tiende a girar la rueda hacia el interior de la curva, el ángulo del manillar hacia la derecha en el caso de la curva cerrada (2) es mayor que en el caso de la curva abierta (1).

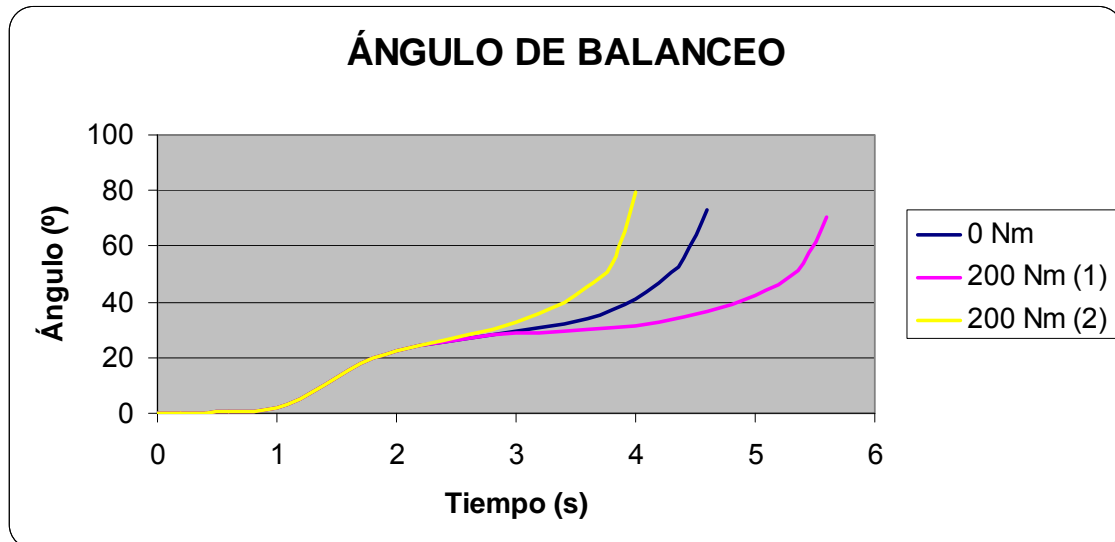


Figura 5.3.5: Ángulos de balanceo

En la *figura 5.3.5* se aprecia cómo el ángulo de balanceo aumenta considerablemente. Aunque a priori se pudiera pensar que el ángulo de la nueva simulación y el de la moto sin par de aceleración deberían ser iguales, no los son, como se puede ver, debido a que tienen distintas velocidades y la nueva simulación, al ir más rápido, debe ir inclinándose antes.

Para analizar cómo se comporta la motocicleta con este nuevo par de dirección vamos a estudiar los recorridos de las suspensiones y las reacciones de las ruedas con el suelo.

Aquí, se va demostrar un aspecto muy importante en este cambio de trayectoria, y es que, con un mismo par de aceleración al trazar la motocicleta una curva más cerrada, el reparto de las reacciones de las ruedas del vehículo se va a desplazar más hacia delante, con respecto al caso de la curva abierta.

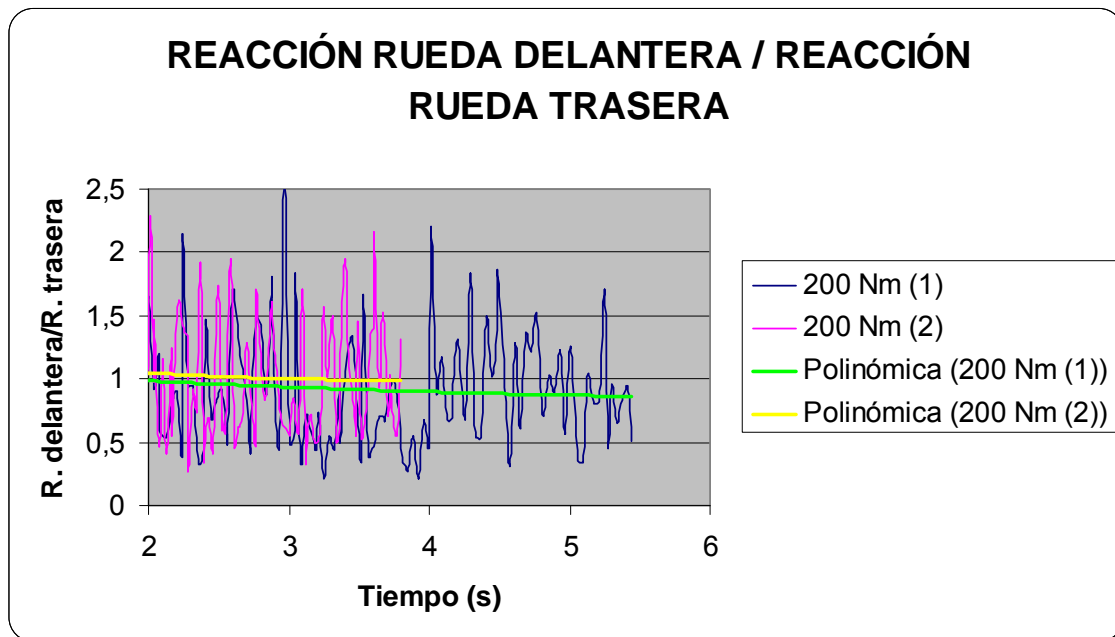


Figura 5.3.6: Relación entre contacto vertical de la rueda delantera y de la trasera

En esta gráfica, en la que se representa las relaciones entre las reacciones verticales de la rueda delantera y la rueda trasera de los dos casos, curva abierta (1) y curva cerrada (2), se aprecia cómo en el segundo caso, curva cerrada, esta relación es mayor. Esto demuestra que, ya que en los dos casos se tiene el mismo par de aceleración, la transferencia de pesos hacia atrás es menor en el caso de la curva cerrada.

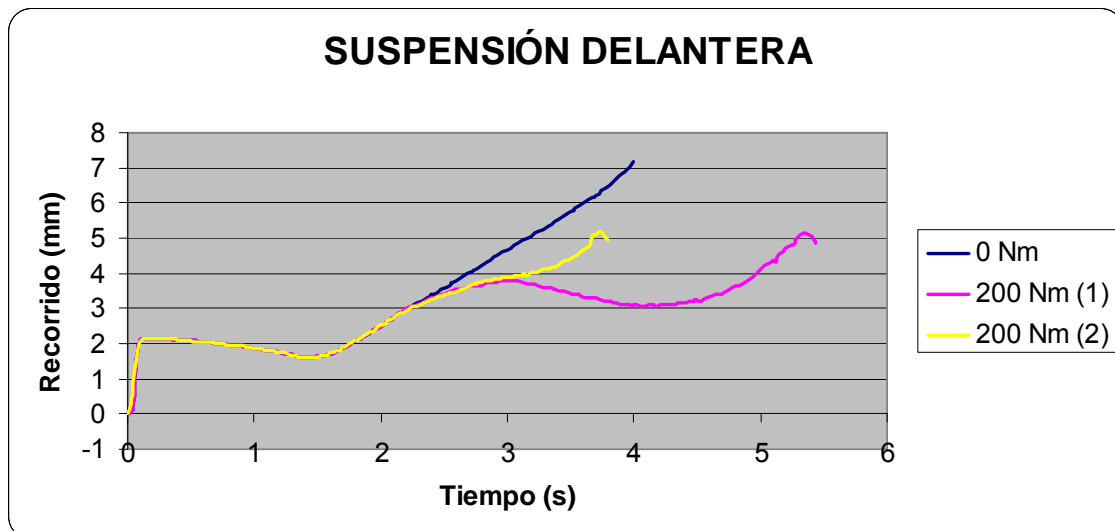


Figura 5.3.7: Recorridos de la suspensión delantera

Hasta el segundo tres el nuevo recorrido de la suspensión delantera (2) es igual al del caso de la curva abierta (1) con el mismo par de aceleración. A partir de este punto, en el caso de la curva cerrada (2), al aumentar la fuerza centrífuga por la disminución del radio de la curva y al aumentar el ángulo de balanceo, aumentando la componente de la reacción provocada por la fuerza centrífuga en la dirección de la suspensión, la compresión de la suspensión es mayor.

El mayor acortamiento de la suspensión en el caso de la curva cerrada (2) justifica el aumento de las relaciones entre las reacciones verticales de la rueda delantera y la rueda trasera representadas en la *figura 5.3.6*, ya que, debido a este acortamiento, la distancia entre los ejes de las ruedas es menor, soportando la rueda delantera una mayor carga al disminuir la distancia entre ésta y el centro de masas del conjunto.

Para demostrar este comportamiento se ha repetido la simulación de la curva cerrada (2), pero esta vez aumentando la constante de rigidez de los muelles de la suspensión delantera un 50%, es decir, 14,25 en vez de 9,5.

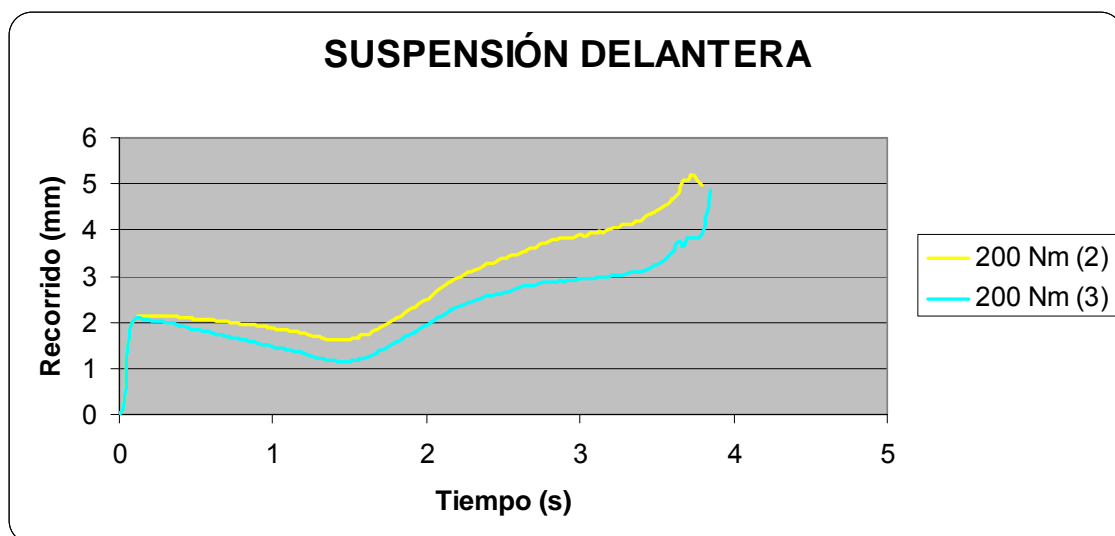


Figura 5.3.8: Recorridos de la suspensión delantera

Como era de esperar, al aumentar la constante de rigidez de los muelles (3), la suspensión se comprime menos.

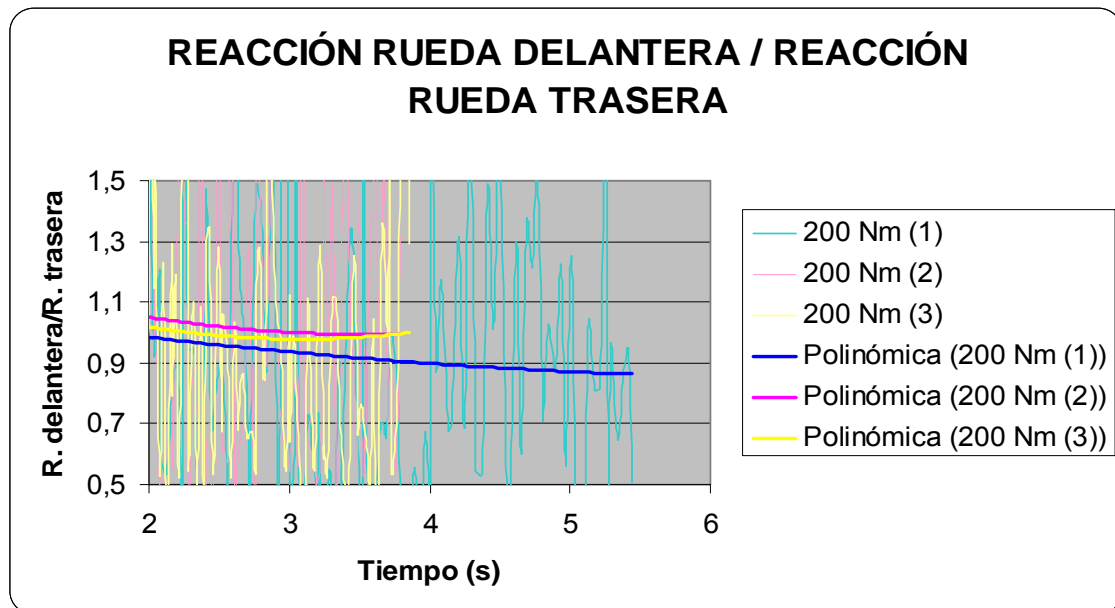


Figura 5.3.9: Relación entre contacto vertical de la rueda delantera y de la trasera

Y en esta gráfica se aprecia cómo al aumentar la constante de rigidez (3), disminuyendo así la compresión de la suspensión delantera, la relación entre las reacciones verticales de la rueda delantera y la rueda trasera disminuyen.

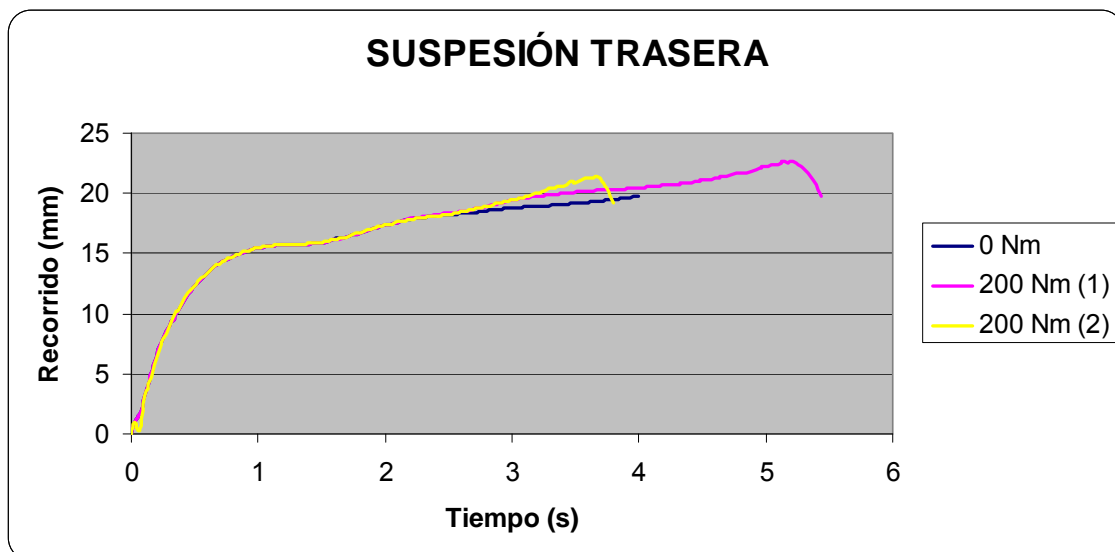


Figura 5.3.10: Recorridos de la suspensión trasera

En el caso de la suspensión trasera ocurre exactamente lo mismo que en la delantera. En el caso de la curva cerrada, al aumentar la fuerza centrífuga por la disminución del radio de la curva y al aumentar el ángulo de balanceo, aumentando la componente de la reacción provocada por la fuerza centrífuga en la dirección de la suspensión, la compresión de la suspensión es mayor.

En este caso, el acortamiento de la suspensión no acorta la distancia entre ejes, es más, lo aumenta, alejando la rueda trasera del centro de masas.

A las gráficas de las reacciones de las ruedas con el suelo se les ha agregado una línea de tendencia a cada grupo de datos. En las gráficas de las reacciones verticales los valores negativos suponen una fuerza de la rueda sobre el suelo hacia abajo y en las reacciones horizontales los esfuerzos positivos tendrán dirección hacia la izquierda del piloto.

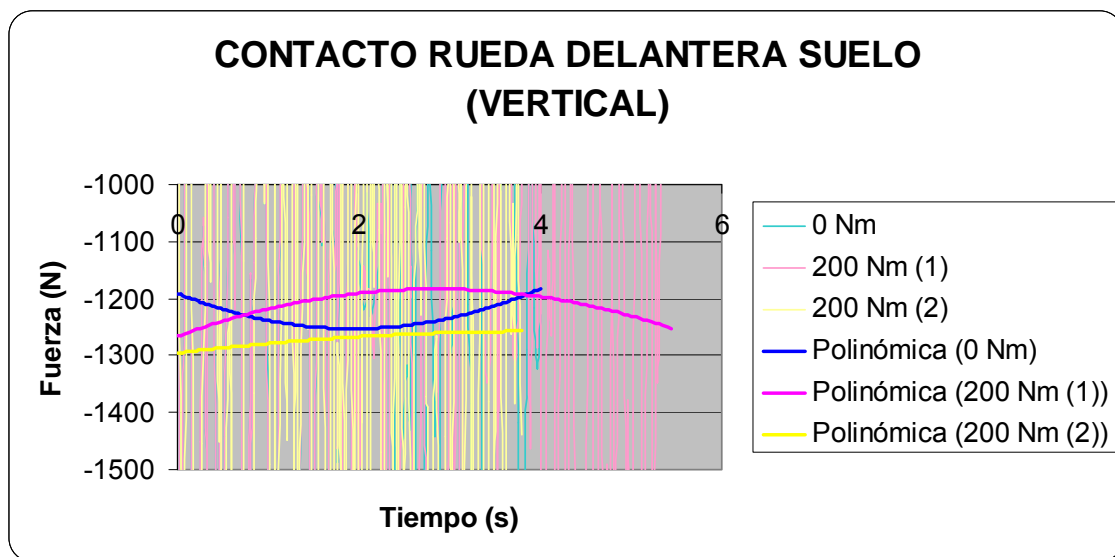


Figura 5.3.11: Reacciones verticales entre la rueda delantera y el suelo

En esta gráfica se ve que la reacción vertical de la rueda delantera con el suelo es mayor en el caso de la curva cerrada con par de aceleración que en el caso de la curva abierta, esto es debido a la disminución de la transferencia de pesos hacia atrás comentada antes, teniendo que soportar la rueda delantera, en este nuevo caso, una carga mayor.

Comparando los dos casos que trazan la misma curva, uno con aceleración (amarillo) y otro sin aceleración (azul) se podría pensar que debido a la transferencia de pesos, la reacción de la rueda delantera con el suelo del caso sin aceleración debería ser mayor. Pero, como aquí también interfiere la fuerza centrífuga, al aumentar la velocidad en el caso con par de aceleración también aumenta esta fuerza centrífuga, aumentando las reacciones de las ruedas con el suelo.

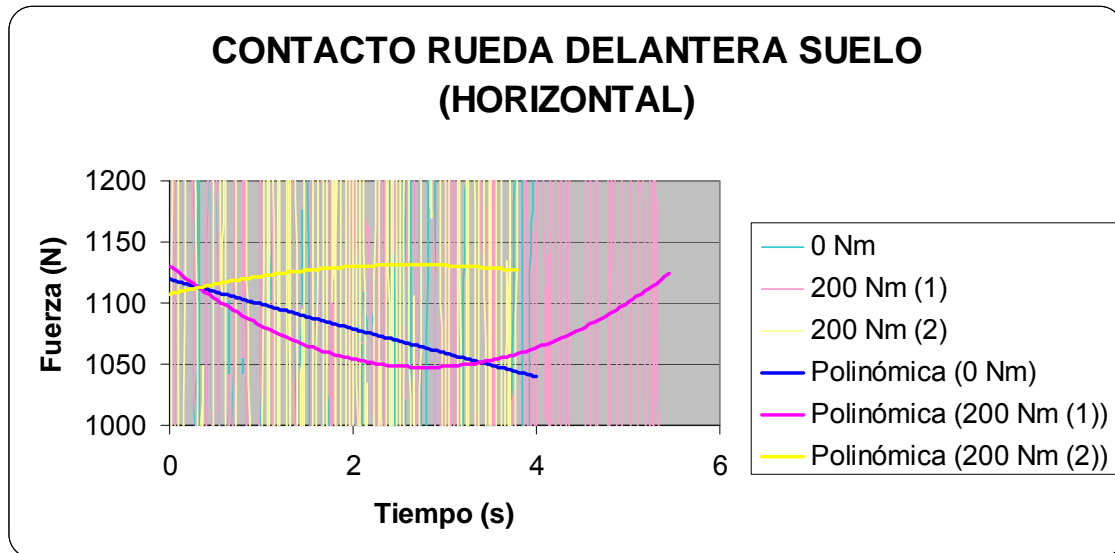


Figura 5.3.12: Reacciones horizontales entre la rueda delantera y el suelo

En las reacciones horizontales ocurre exactamente lo mismo que en las verticales, siendo mayor la reacción entre la rueda y suelo en el caso de la curva cerrada con aceleración.

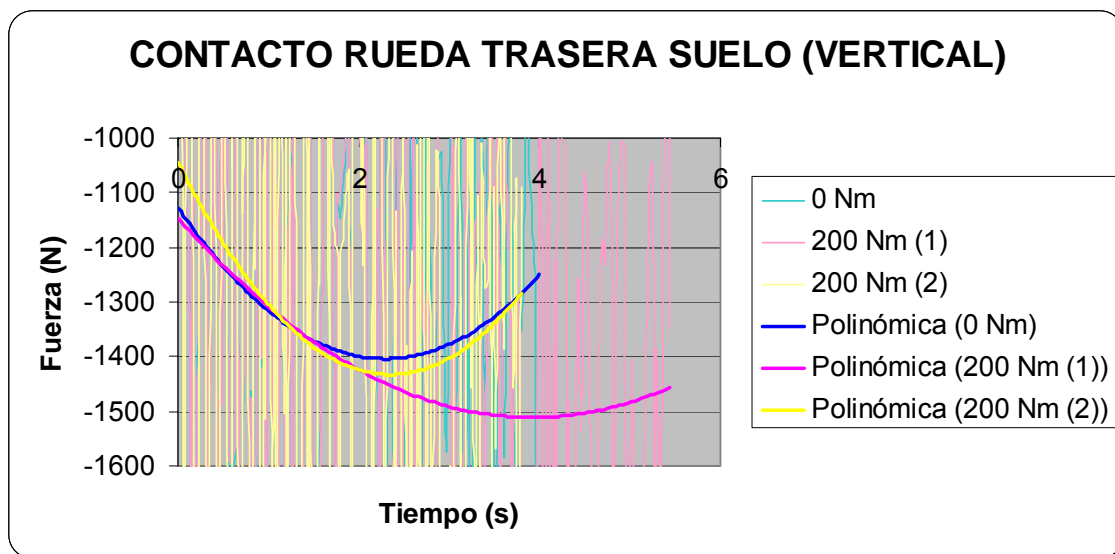


Figura 5.3.13: Reacciones verticales entre la rueda trasera y el suelo

En la figura 5.3.13 también se muestra cómo la carga sobre la rueda trasera es menor en el caso de la curva cerrada (2).

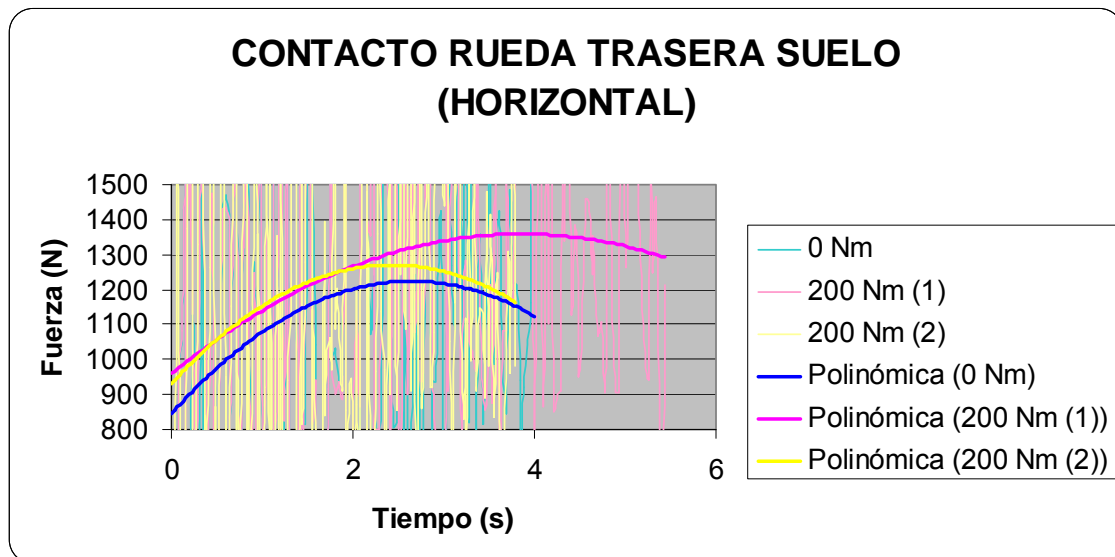


Figura 5.3.14: Reacciones horizontales entre la rueda trasera y el suelo

En las reacciones horizontales se observa lo mismo. El nuevo caso, trayectoria cerrada y par de aceleración (amarillo), tiene una reacción horizontal entre la rueda trasera y el suelo mayor que en el caso de la trayectoria cerrada sin aceleración (azul) debido a la transferencia de pesos, pero menor que en el caso de la trayectoria abierta (rosa), debido a que el mayor acortamiento de la suspensión delantera en el caso de la curva cerrada (2), disminuye la distancia entre la rueda delantera y el centro de masas y el mayor acortamiento de la suspensión trasera, aumenta la distancia entre la rueda trasera y el centro de masas, haciendo que la rueda trasera soporte menos carga.

5.4. FRENADA DURANTE LA CURVA

El hallar el par máximo de frenada resulta algo más complicado que el de la aceleración, ya que en este caso interfiere el efecto giroscópico sobre la rueda, debido a que el par de frenada se aplica en la rueda delantera y no en la trasera, como en el caso de la aceleración.

Para esta simulación se ha despreciado el freno de la rueda trasera, ya que, debido a la transferencia de pesos en la frenada, la mayoría del peso de la motocicleta se apoya sobre la rueda delantera, aumentando su carga dinámica.

Lo primero que se ha de explicar para poder entender bien este caso es el efecto giroscópico que se crea sobre la dirección debido a la aplicación de este par de frenada.

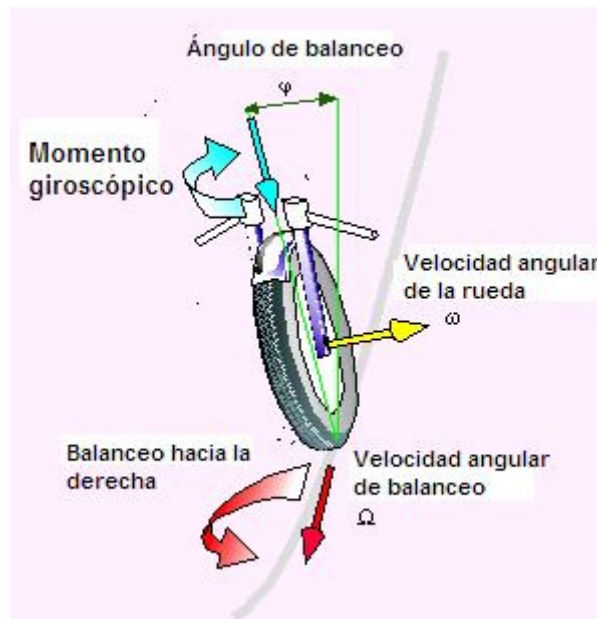


Figura 5.4.1: Efecto giroscópico del movimiento de inclinación

La variación de la velocidad angular de la rueda delantera, junto con el movimiento de balanceo de la motocicleta, crea un momento giroscópico sobre el tren delantero del vehículo hacia el interior de la curva, siendo el momento:

$$M = -I \cdot \omega \cdot \Omega \cdot \cos \varepsilon$$

Y siendo ε el ángulo entre el eje de la dirección y la vertical.

El momento giroscópico gira la dirección hacia el interior de la curva, provocando que la motocicleta realice una curva más abierta, incluso tiende a levantar la moto. Por lo tanto, se puede decir que tiene un efecto estabilizador.

Como en el caso de la aceleración, la motocicleta se lanza con una velocidad inicial, pero esta vez será de 75 km/h, ya que 50 km/h es una velocidad muy baja si se tiene en cuenta que luego hay que frenar la moto. También hay que esperar 0,3 segundos antes de aplicar ninguna fuerza para que la motocicleta se estabilice después del contacto con el suelo.

Al cambiar la velocidad inicial del vehículo, para que realice una curva algo más cerrada, se ha tenido que cambiar también el par aplicado en la dirección. En este caso, después de que la moto entre en la curva y se incline, también se dejará el par constante para poder analizar bien los efectos que provoca el par de frenada. Al ir la moto a una velocidad alta en la curva, en todo momento el par en la dirección será positivo, es decir, hacia la izquierda, para que la motocicleta se incline más. Este dato, como veremos más adelante, será muy importante. El par aplicado en la dirección es el representado en la *figura 5.4.2*.



Figura 5.4.2: Par aplicado en la dirección

Para no realizar una frenada muy brusca, en este caso también se ha optado por aplicar una función del par en la rueda delantera en forma de rampa con un tiempo de subida de 1,5 segundos como el que se muestra, como ejemplo, en la *figura 5.4.3*.

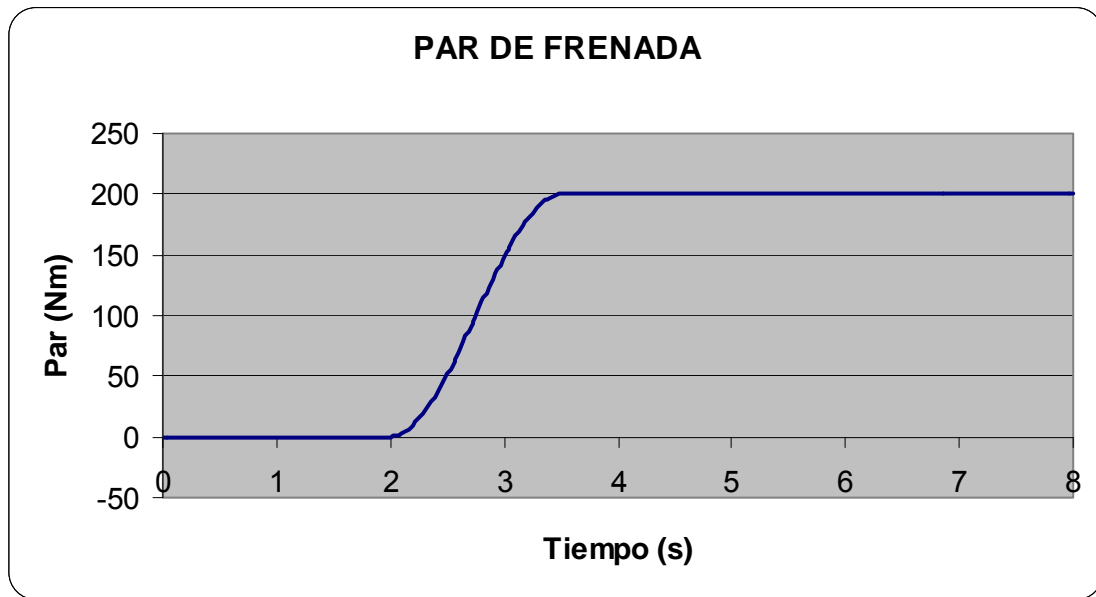


Figura 5.4.3: Par de frenada aplicado en la rueda delantera

El par es positivo ya que el sentido del par es el mostrado en la figura 5.4.4.

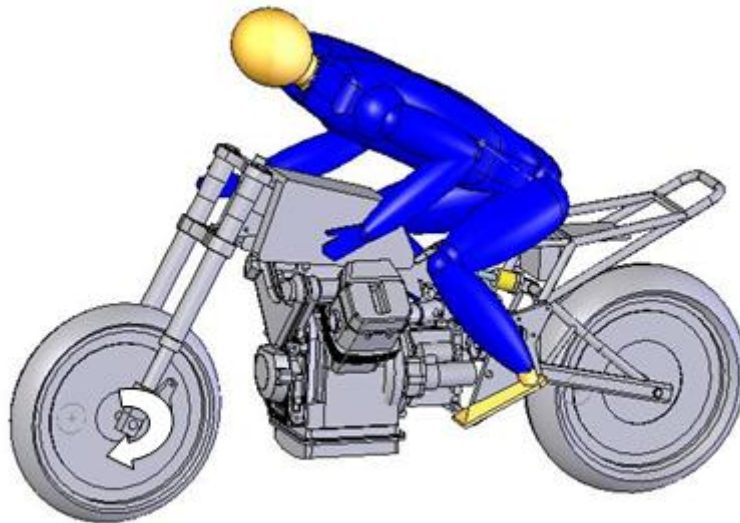


Figura 5.4.4: Sentido del par de frenada

Como par máximo de frenada se ha considerado el mayor par con el que la motocicleta llega a detenerse casi por completo antes de caerse. La moto nunca llega a detenerse por completo ya que a velocidades muy bajas cae porque el vehículo no es totalmente simétrico y el centro de gravedad está un poco desviado hacia un lado y, por lo tanto, al perder la fuerza centrífuga, ésta se cae. Por lo que consideraremos que la moto se detiene a 10 km/h aproximadamente.

Como se puede ver en la siguiente gráfica, con par de 430 Nm el vehículo se detiene, pero en cambio, aplicándole sólo 10 Nm más la moto se cae cuando va a 45 km/h. Por lo tanto, consideraremos como par máximo de frenada el de 430 Nm.

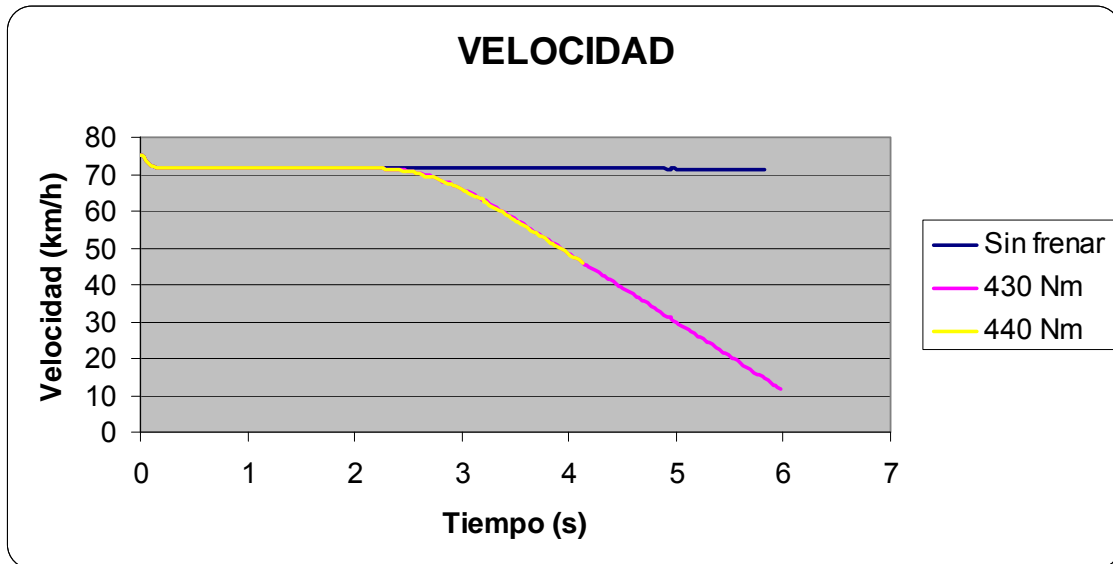


Figura 5.4.5: Velocidad lineal de la motocicleta

Después de haber visto cómo cuanto más se acelera la motocicleta mayor es la apertura de la curva es de suponer que cuanto mayor sea el par de frenada menor será la apertura de la curva, es decir, será una curva más cerrada, pero como se puede ver en la figura 5.4.6, esto no es así.

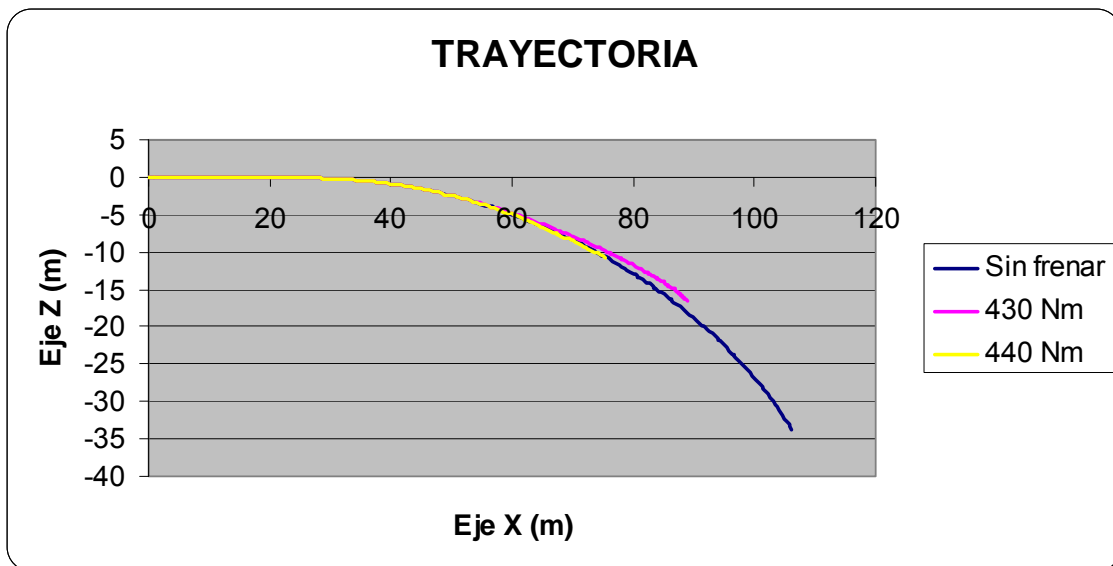


Figura 5.4.6: Trayectorias

Esta apertura de la curva es debida al efecto giroscópico explicado anteriormente. El momento giroscópico gira la dirección hacia el interior de la curva, provocando que la motocicleta se levante y trace una curva más abierta. En la *figura 5.4.7* se observa como el tren delantero de la motocicleta gira hacia la derecha al aplicarle un par de frenada. Este fenómeno está provocado claramente por el momento giroscópico, ya que en ningún momento se aplica un par en la dirección hacia la derecha, es más, en todo momento se le está aplicando un par hacia el lado contrario.

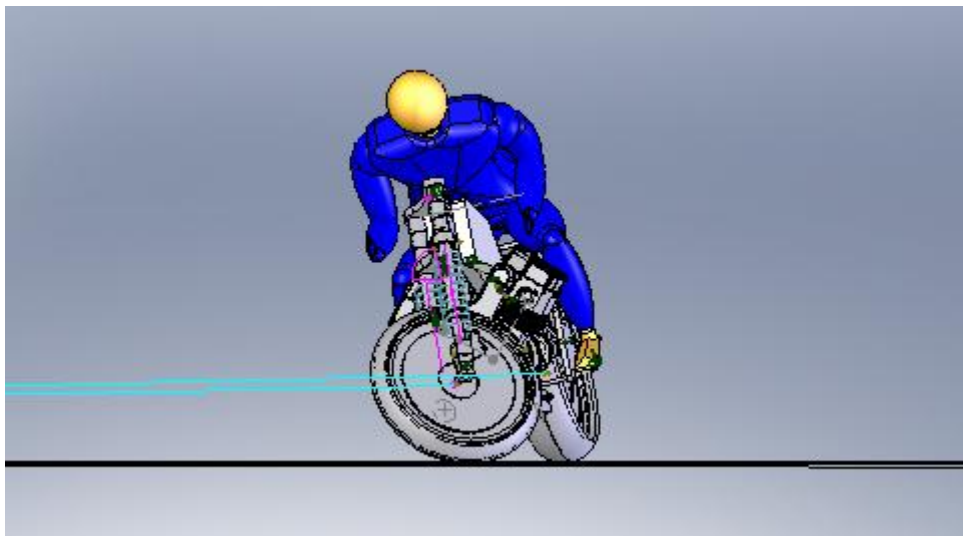


Figura 5.4.7: Giro del tren delantero de la motocicleta

Este giro de la dirección hacia la derecha también se puede ver en la *figura 5.4.8*, en la que los ángulos positivos representan el giro hacia la derecha.



Figura 5.4.8: Ángulo del tren delantero de la motocicleta

Este giro hacia la derecha de la rueda delantera, en el caso del par de 430 Nm, ocurre cuando la moto está prácticamente parada, pero en el caso de 440 Nm ocurre cuando aún va a más de 50 km/h, por lo que la aplicación de este par no sería válida ya que la motocicleta se desestabiliza y cae antes de tiempo.

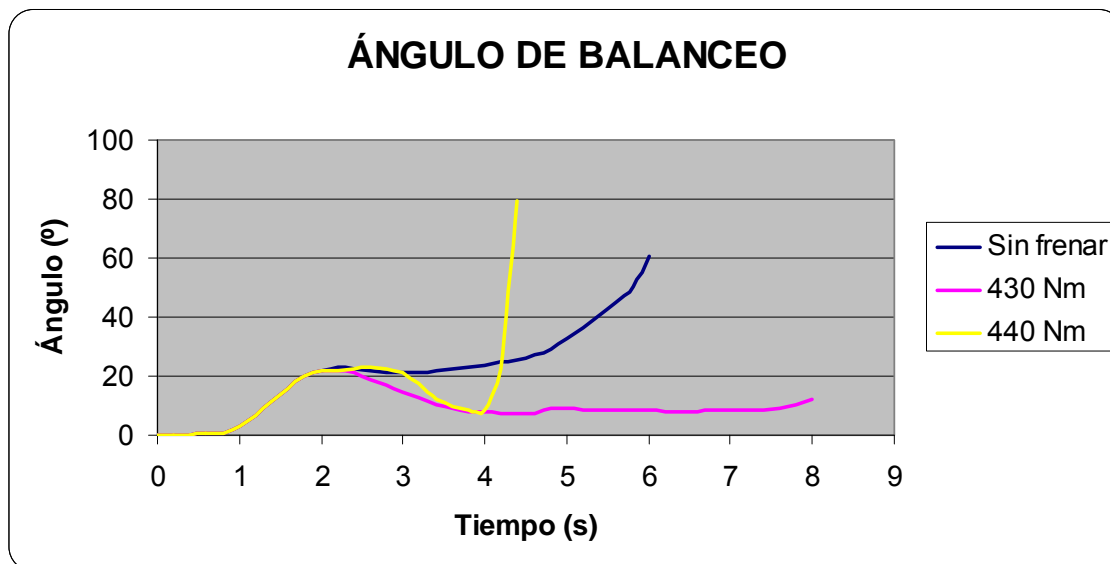


Figura 5.4.9: Ángulos de balanceo

En la *figura 5.4.9* se ve cómo al aplicar un par superior al máximo la moto se desestabiliza, por ese giro de la rueda delantera, y cae bruscamente. En esta gráfica también se puede ver, comparando el ángulo de balanceo de la moto sin frenar y la moto con una par de frenada, cómo al aplicarle un par de frenada en la rueda delantera, este ángulo de balanceo disminuye. Es decir, al frenar durante la curva, la moto se levanta hasta casi la perpendicularidad con el suelo, en vez de inclinarse más. Esto es debido, como decíamos antes, al efecto giroscópico que actúa sobre la dirección, creando un par sobre ella hacia el interior de la curva haciendo que la motocicleta se levante.

Al estudiar el comportamiento de las suspensiones, lo primero es comprobar que no se superen los límites de compresión, fijándonos sobre todo en la suspensión delantera, que en este caso es la que soporta más esfuerzos. Estos límites de compresión son la distancia entre la botella y la barra de la suspensión delantera y entre el vástago y el cuerpo del amortiguador trasero, que son 118 mm para la suspensión delantera y 70 mm para la trasera.

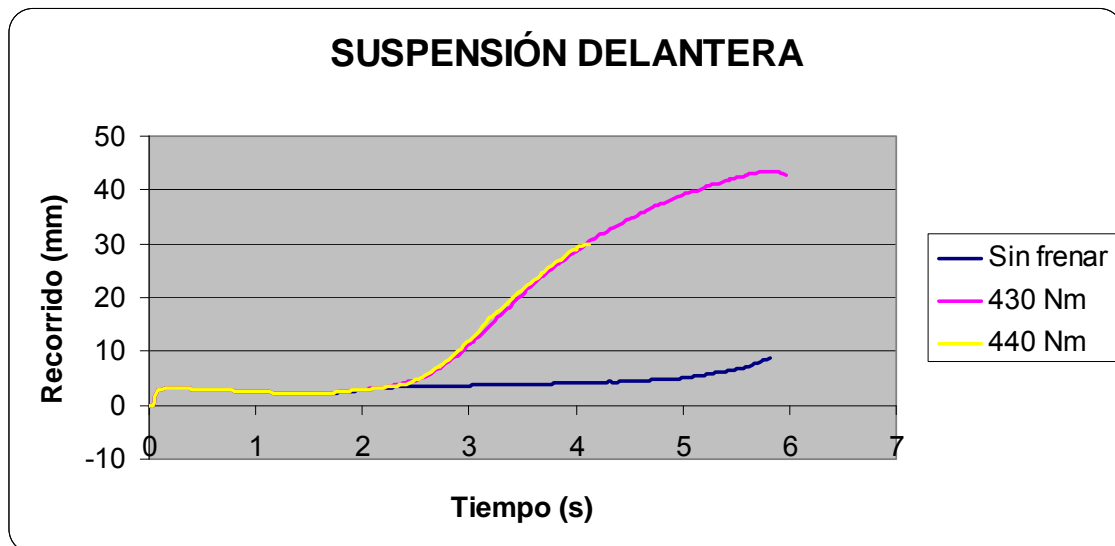


Figura 5.4.10: Recorrido de la suspensión delantera

Como ocurría en el caso de la aceleración el recorrido de la suspensión delantera no se acerca al máximo, 118 mm. Se aprecia como al comienzo de la simulación la suspensión se comprime unos 2 milímetros en un instante debido a que lo primero que hace la moto es apoyarse en el suelo. En el caso en el que no se aplica ningún par de frenada la suspensión se va comprimiendo un poco, hasta llegar a unos 9 mm, a causa de la inclinación de la moto y la fuerza centrífuga. Pero en el caso de los 430 Nm de par de frenada esta compresión es mucho mayor debido a la transferencia de pesos hacia la parte delantera de la motocicleta provocada por la frenada.

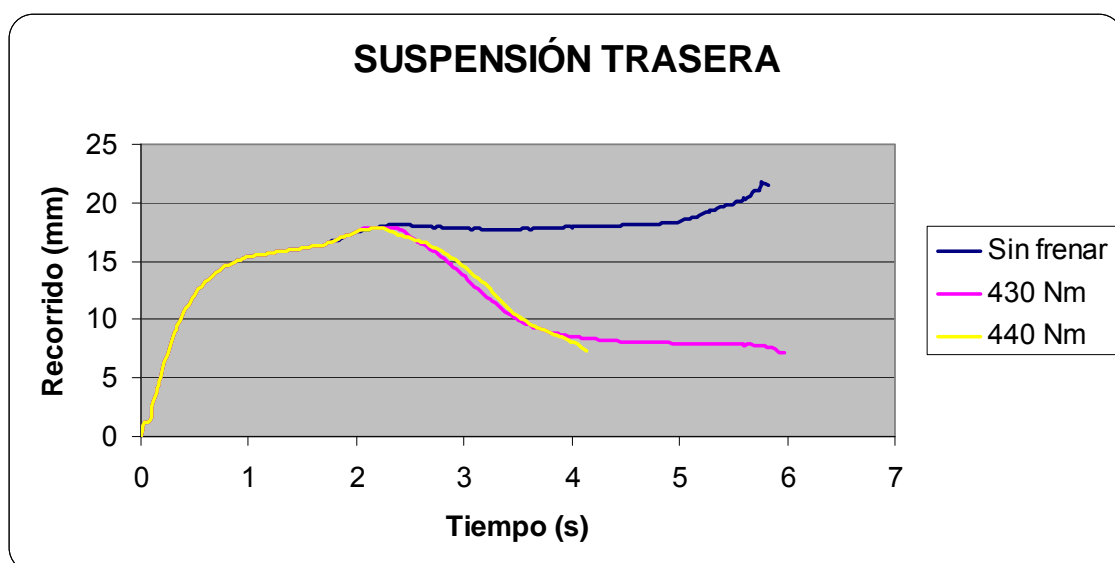


Figura 5.4.11: Recorrido de la suspensión trasera

En la suspensión trasera tampoco nos acercamos al límite de desplazamiento, 70 mm, y también existe una compresión inicial causada por el contacto con el suelo. A partir de ahí, debido a la inclinación de la moto para realizar la curva y a la fuerza centrífuga, el amortiguador se sigue comprimiendo, pero, al contrario que en la suspensión delantera, también debido a la transferencia de pesos, al aplicarle a la moto un par de frenada, esta suspensión se va descomprimiendo.

Para poder analizar las reacciones de las ruedas con el suelo, como las representaciones no son muy limpias, se les ha añadido líneas de tendencia. En las gráficas de las reacciones verticales los valores negativos suponen una fuerza de la rueda sobre el suelo hacia abajo y en las reacciones horizontales los esfuerzos positivos tendrán dirección hacia la izquierda del piloto.

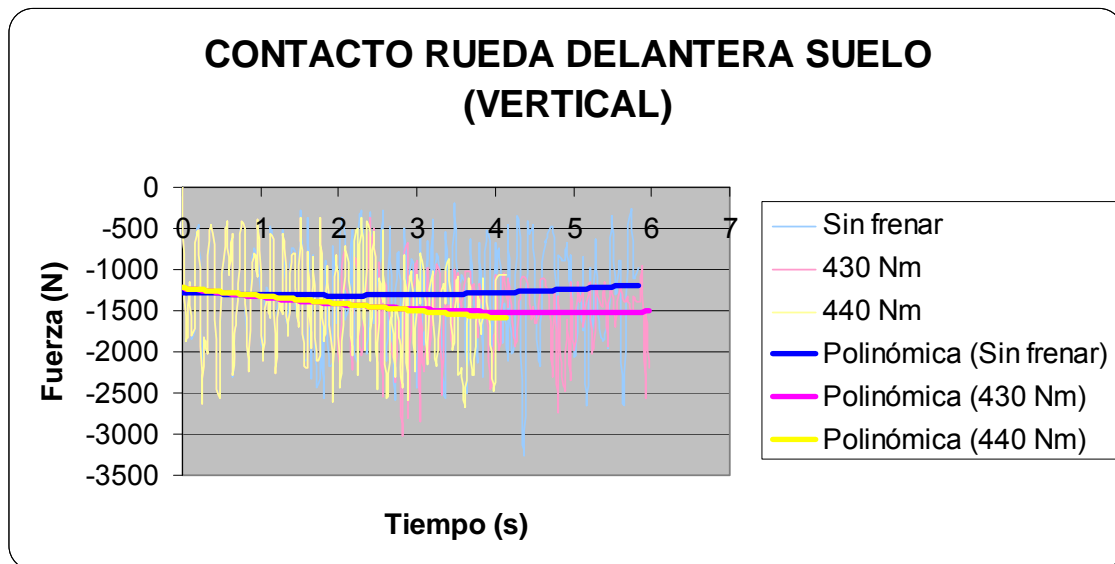


Figura 5.4.12: Reacciones verticales de la rueda delantera con el suelo

Se observa claramente cómo al aplicar un par de frenada las reacciones verticales de la rueda delantera aumentan. Esto es debido a la transferencia de pesos hacia delante a causa de la frenada.

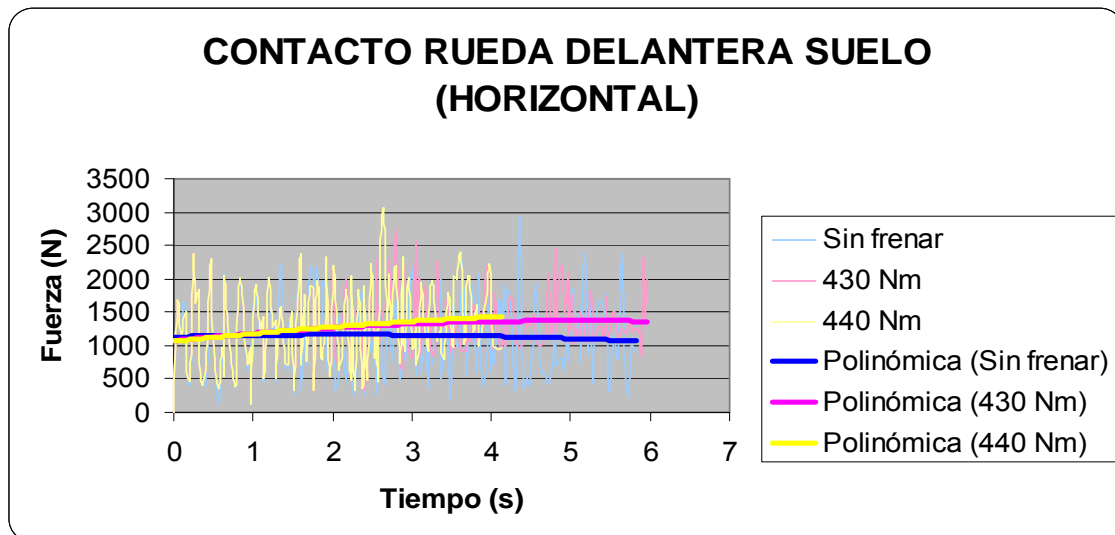


Figura 5.4.13: Reacciones horizontales de la rueda delantera con el suelo

En este caso, aunque la inclinación de la motocicleta con par de frenada sea menor que sin este par y, por lo tanto, las reacciones horizontales deberían ser menores, son mayores ya que, debido a la transferencia de pesos, la rueda soporta más peso y también influye el momento giroscópico que actúa sobre la dirección que tiende a girar la rueda.

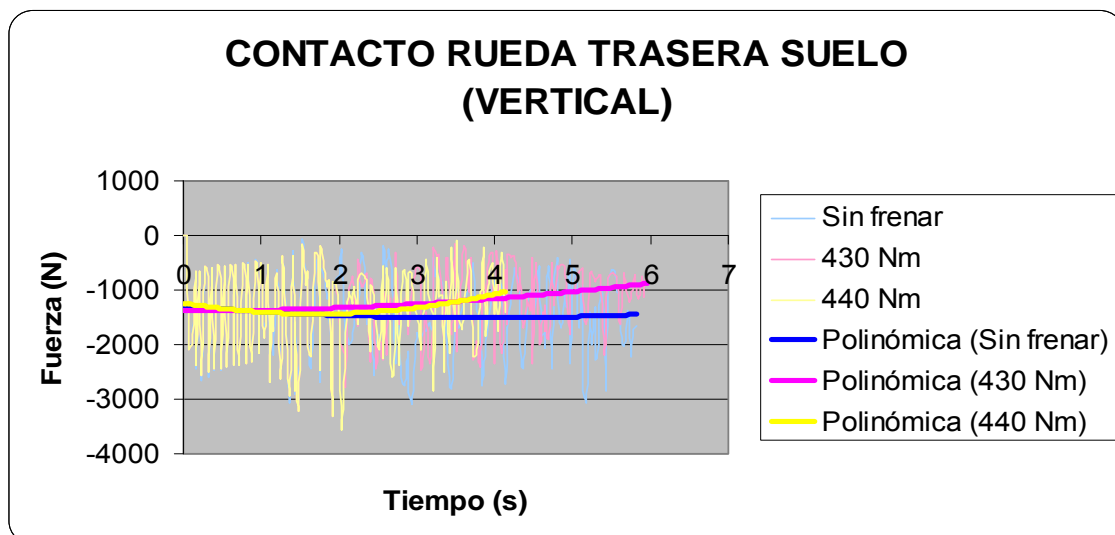


Figura 5.4.14: Reacciones verticales de la rueda trasera con el suelo

Por la misma razón por la que las reacciones verticales de la rueda delantera con el suelo aumentaban, ahora disminuyen. Es decir, la transferencia de pesos hacia la parte delantera de la moto hace que las reacciones verticales de la rueda trasera con el suelo disminuyan. También se puede ver que en ningún caso la aceleración es tan alta como para hacer que la rueda pierda el contacto con el suelo.

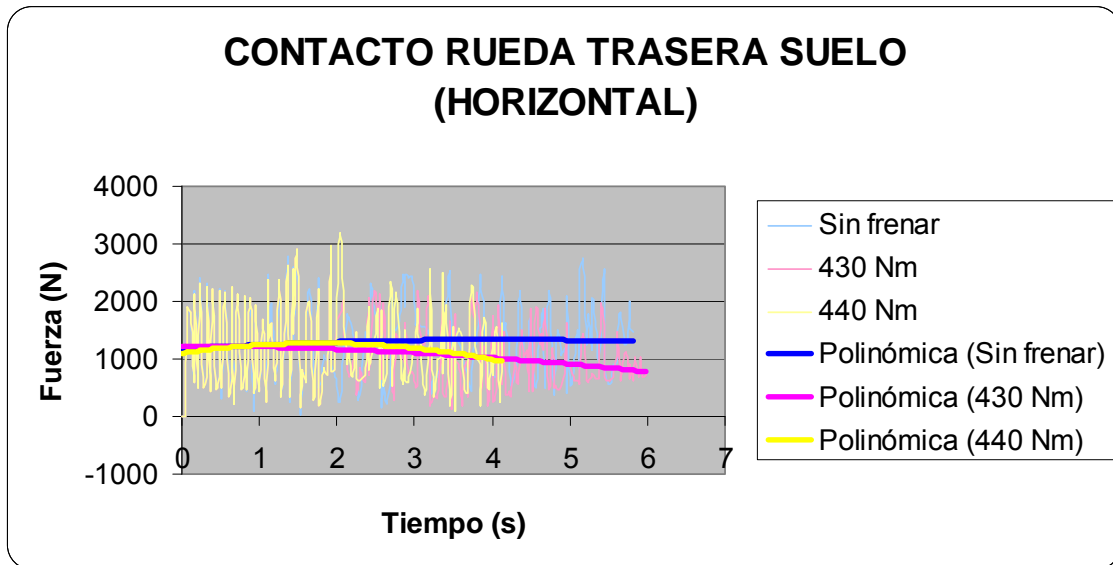


Figura 5.4.15: Reacciones horizontales de la rueda trasera con el suelo

En el caso de la aceleración la rueda trasera tendía a deslizar, con lo que aumentaban estas reacciones horizontales, pero en el caso de la frenada esta rueda no tiende a deslizar, por lo que no se ve ese aumento en las reacciones. Es más, se ve una disminución causada por la transferencia de pesos hacia adelante y por la disminución del ángulo de balanceo de la motocicleta.



6. CONCLUSIONES

Lo primero que hay que destacar sobre las simulaciones realizadas es el par que se aplica sobre la dirección para que la motocicleta realice la curva. En él se demuestra el comportamiento giroscópico producido por el giro del manillar, destacando la maniobra del *contramanillar*, en la que girando el manillar hacia la izquierda la motocicleta se inclina hacia la derecha y comienza una curva hacia este mismo lado.

En el caso de la aceleración de la moto, un fenómeno muy importante es que cuanto más velocidad, más fuerza centrífuga y mayor es la apertura de la curva. Esta fuerza centrífuga también hace que la inclinación de la moto sea menor cuanto mayor es el par de aceleración.

Al superar el par máximo de aceleración, pueden ocurrir dos cosas, que la rueda trasera deslice transversalmente haciendo caer la moto o que la rueda delantera deje de tener contacto con el suelo haciendo un “caballito”. Estas dos reacciones, además de depender del par aplicado en la rueda, dependen mucho de la inclinación de la moto, ya que aplicándole un mismo par a la moto en momentos distintos en el que tienen distinto ángulo de balanceo, en el caso más inclinado puede derrapar y en el menos inclinado puede perder el contacto la rueda delantera con el suelo.

Estas eran las reacciones cuando se supera el par máximo, ahora vamos a ver el comportamiento de la motocicleta cuando éste no se supera. Al aplicar un par de aceleración las reacciones entre la rueda delantera y el suelo disminuyen debido a la transferencia de pesos hacia atrás en la moto a causa de la aceleración. Por la misma razón, las reacciones entre la rueda trasera y el suelo aumentan, ya que carga con más peso. En el caso de las suspensiones, debido a la curva, es decir, a la inclinación de la moto y a la fuerza centrífuga, las suspensiones se van comprimiendo cada vez más, pero a causa de la transferencia de pesos, la suspensión delantera se va librando de carga, por lo que se descomprime, y la trasera se comprime aún más.

Para cambiar la trayectoria de la motocicleta actuando solamente sobre la dirección, como por ejemplo en nuestro caso, en el que queríamos que realizara una trayectoria más cerrada, se tiene que soltar un poco la dirección, es decir, en el momento en el que se le está aplicando un par hacia la derecha, para que la motocicleta se incline más y realice una curva más cerrada, se ha de disminuir ese par. Para el caso de querer una curva más abierta se ha de hacer lo contrario.



Al cambiar la trayectoria de la moto a una curva más cerrada también cambia el comportamiento de ésta. Debido a la disminución del radio de curvatura y al aumento del ángulo de balanceo aumenta la compresión de las suspensiones. El acortamiento de la suspensión delantera, disminuye la distancia entre la rueda delantera y el centro de masas y el acortamiento de la suspensión trasera, aumenta la distancia entre la rueda trasera y el centro de masas, haciendo que la rueda trasera se vea menos solicitada con respecto al caso de la curva abierta.

En el caso de la frenada, el fenómeno más importante es el efecto giroscópico. La variación de la velocidad angular de la rueda delantera, junto con el movimiento de balanceo de la motocicleta, crea un momento giroscópico sobre el tren delantero del vehículo hacia el interior de la curva, provocando que la motocicleta realice una curva más abierta, incluso tiende a levantar la moto. Al aplicar un par superior al máximo la moto se desestabiliza, por ese giro de la rueda delantera, y cae bruscamente.

En el caso de las suspensiones, debido a la curva, es decir, a la inclinación de la moto y a la fuerza centrífuga, las suspensiones se van comprimiendo ligeramente, pero en el momento de la frenada, a causa de la transferencia de pesos, la suspensión delantera se comprime mucho más y la trasera se libera. También, debido a esta transferencia de pesos, las reacciones entre la rueda delantera y el suelo aumentan y entre la rueda trasera y el suelo disminuyen.

7. FUTUROS DESARROLLOS

Los desarrollos futuros que se pueden realizar a partir de este proyecto, con el modelo en 3D de la motocicleta, son:

- Desarrollar un modelo de piloto que disponga de movilidad que permita la transmisión de pesos. De este modo, además, podría realizarse un estudio en el que se analicen y cataloguen los distintos estilos de conducción, examinando su efectividad en distintas maniobras.
- Mejorar el contacto entre las ruedas y el suelo, hacerlo más complejo y real. Incluso usar otros programas que nos permitan hacerlo sin tantas limitaciones como presenta el *Cosmos Motion*.
- Considerar líquidos en el modelo, estudiar su comportamiento cuando la motocicleta está en movimiento.
- Crear un modelo de rueda más real, estudiar su flexibilidad, cómo absorbe las vibraciones, si aumenta o disminuye el límite de adherencia de los neumáticos, etc.
- Estudiar el caso de frenada considerando que actúan los dos frenos, el delantero y el posterior, o estudiar sólo el posterior para ver la relevancia que tiene en la fase de frenado de la motocicleta.
- Modificar piezas de la motocicleta, como la longitud del basculante, el ángulo de la dirección, las tijas, etc., para ver cómo afectan en las distintas maniobras.



8. BIBLIOGRAFÍA

[1] Vittore Cossalter, “The gyroscopic effects on a motorcycle”, Artículo Universidad de Padova

[2] Vittore Cossalter, “La manovra ottima per l’analisi delle prestazioni del motocicli”, Artículo Universidad de Padova

[3] Vittore Cossalter, “Studio della maneggevolezza delle moto mediante prove di slalom”, Artículo Universidad de Padova

[4] Vittore Cossalter, “Motorcycle Dynamics”

[5] Vittore Cossalter, “About the motorcycle braking”, Artículo Universidad de Padova

[6] Tony Foale, “Motorcycle handling and chassis design”

[7] Revista Motociclismo, “Técnicas secretas”

[8] Arias Paz, “Motocicletas”

[9] Rubén Colomer, “Simulación del comportamiento dinámico de una motocicleta mediante Cosmos Motion”, Proyecto final de carrera Universidad Carlos III

[10] Natalia Vence, “Simulación del comportamiento dinámico en 3D de una motocicleta en fase de frenada y entrada en curva”, Proyecto final de carrera Universidad Carlos III

[11] Página web, “www.dimoto.it”