



UNIVERSIDAD
POLITECNICA
DE VALENCIA



Ingeniería de Sistemas
y Automática

Tesina de Máster

MODELADO Y SIMULACIÓN DINÁMICA DE VEHÍCULOS DE COMPETICIÓN

Autor: *JAMES MAURICIO CORREA SÁNCHEZ*

Director: *Josep Tornero Montserrat*

Valencia 2010

Contenido

| | |
|---|-------------------------------|
| INTRODUCCION..... | ¡Error! Marcador no definido. |
| OBJETIVOS..... | 5 |
| 1. CONSIDERACIONES..... | 6 |
| 1.1. SHELL ECO-MARATHON..... | 6 |
| 1.2. CIRCUITO DE VELOCIDAD | 8 |
| 2. MODELADO DINÁMICO..... | 9 |
| 2.1. MODELADO DINAMICO DE VEHICULOS | 10 |
| 2.1.1. MODELO DINÁMICO DE UN VEHÍCULO ACKERMAN | 14 |
| 2.2. AERODINÁMICA | 16 |
| 2.2.1. DINÁMICA DE FLUIDOS COMPUTACIONAL (CFD)..... | 16 |
| 2.2.2. FUERZAS QUE INTERACTÚAN CON EL VEHÍCULO | 19 |
| 2.2.2.1. FUERZA AERODINÁMICA | 20 |
| 2.2.2.2. RESISTENCIA DE RODADURA..... | 22 |
| 2.2.2.3. FUERZA DE TRACCIÓN | 23 |
| 2.3. ANALISIS MECÁNICO | 24 |
| 2.4. IMPLEMENTACION DEL MODELO DEL VEHÍCULO EN SIMULINK..... | 29 |
| 2.4.1. BLOQUE PHYSICAL..... | 31 |
| 2.4.2. BLOQUE POWERTRAIN | 32 |
| 2.4.3. BLOQUE STRATEGY | 32 |
| 3. PROGRAMACION Y SIMULACION | 33 |
| 3.1. CONTROLADORES Y ESTRATEGIAS DE CONTROL | 36 |
| 4. DISEÑO ÓPTIMO DE REGULADORES..... | 47 |
| 4.1. METODO SIMPLEX (NELDER - MEAD)..... | 48 |
| 5. CONCLUSIONES | 50 |

| | |
|---------------------------------------|----|
| 6. TRABAJOS FUTUROS..... | 51 |
| 7. REFERENCIAS..... | 51 |
| ANEXO 1. BLOQUES MODELO SIMULINK..... | 53 |
| ANEXO 2. FICHERO METODO SIMPLEX..... | 60 |

Tabla de Figuras

| | |
|--|----|
| FIGURA 1 SHELL ECO-MARATHON..... | 7 |
| FIGURA 2 VEHICULO UPV | 8 |
| FIGURA 3 CIRCUITO DE NOGARO "PAUL ARMAGNAC" | 8 |
| FIGURA 4 MODELO DE ACKERMAN..... | 15 |
| FIGURA 5 EJEMPLO CFD | 17 |
| FIGURA 6 SISTEMAS DE COORDENADAS ASUMIDO..... | 20 |
| FIGURA 7 FUERZAS ACTUANDO SOBRE EL VEHÍCULO..... | 22 |
| FIGURA 8 EJE DE COORDENADAS | 24 |
| FIGURA 9 COMPONENTES DE VIENTO | 25 |
| FIGURA 10 COMPONENTES FUERZA AERODINÁMICA..... | 26 |
| FIGURA 11 DIAGRAMA DE BLOQUES DEL SISTEMA | 30 |
| FIGURA 12 MODELO SIMULINK DEL VEHÍCULO | 30 |
| FIGURA 13 BLOQUE SIMULINK PHYSICAL | 31 |
| FIGURA 14 BLOQUE SIMULINK POWERTRAIN | 32 |
| FIGURA 15 BLOQUE SIMULINK STRATEGY | 33 |
| FIGURA 16 CIRCUITO DE VELOCIDAD DE NOGARO | 34 |
| FIGURA 17 EVOLUCIÓN DE VELOCIDAD FRENTE UN IMPULSO | 36 |
| FIGURA 19 CONTROL PROPORCIONAL $K_P=100$ | 40 |
| FIGURA 20 CONTROL PROPORCIONAL $K_P=10$ | 41 |
| FIGURA 21 CONTROLADOR PID..... | 42 |
| FIGURA 22 ZOOM ZONA DE VARIACIÓN DE VELOCIDAD | 43 |
| FIGURA 23 EVOLUCIÓN FUERZA AERODINÁMICA | 44 |
| FIGURA 24 COMPORTAMIENTO DEL SISTEMA SIN V_C | 45 |
| FIGURA 25 FUERZA AERODINÁMICA SIN V_C | 45 |
| FIGURA 26 RESISTENCIA A LA PENDIENTE..... | 46 |
| FIGURA 27 RESISTENCIA DE ROZAMIENTO | 47 |
| FIGURA 28 EVOLUCIÓN PARÁMETROS MÉTODO SIMPLEX..... | 49 |
| FIGURA 29 GRAFICA CONSUMO..... | 50 |

Indice de Tablas

| | |
|--|----|
| TABLA 1 VARIACIÓN FUERZA AERODINÁMICA | 27 |
| TABLA 2 EVOLUCIÓN ANGULO (θ) EN EL CIRCUITO | 34 |
| TABLA 3 CONSUMO..... | 49 |

A mi madre y hermano,
por su apoyo incondicional

INTRODUCCIÓN

En esta tesis de máster se realiza el modelado, análisis y diseño de controladores para vehículos de competición; estas tres fases se concretan sobre el vehículo diseñado por la Universidad Politécnica de Valencia para participar en la competición Shell Eco_marathon.

El modelado abarca tanto aspectos cinemáticos como dinámicos, incorporando conceptos de robótica móvil. En el modelado se tienen en cuenta las fuerzas presentes que interactúan con él, afectando el comportamiento del vehículo en su desplazamiento por un circuito; haciendo énfasis en la parte aerodinámica, se modelará dinámicamente el estudio realizado con herramientas CFD donde se incluía condiciones de la incidencia de diferentes corrientes de viento, aspectos que no se habían tenido en cuenta en ningún modelado anterior.

El análisis se realiza basado en la simulación del comportamiento utilizando la plataforma Matlab-Simulink, la cual nos permite la ejecución de simulaciones y el posterior estudio del vehículo, a su vez ejecutar diferentes estrategias de conducción con el uso de reguladores y determinar cuál es la más adecuada.

Finalmente se realiza el diseño e implementación de sistemas de control utilizando métodos de optimización, realizando los ajustes necesarios en los reguladores utilizados, con el fin de reducir el consumo, objetivo principal en la competición Shell Eco-marathon.

OBJETIVOS

- Realizar el modelado matemático del vehículo de la UPV usado para la competencia Shell Eco-Marathon
- Obtener el modelo más aproximado de las fuerzas aerodinámicas que interactúan con el vehículo
- Implementar un modelo matemático para analizar el efecto de la fuerza aerodinámica que interactúa con el vehículo haciendo uso de Matlab – Simulink.

- Analizar el comportamiento del vehículo simulando su recorrido en el circuito de velocidad “Paul Armagnac” en Nogaro (Francia)
- Realizar la optimización de los parámetros del controlador usado.

1. CONSIDERACIONES

Para el desarrollo de este trabajo se establecieron las siguientes consideraciones:

- El estudio se ha enfocado al vehículo usado por la UPV en la competencia Shell eco-marathon
- No se tiene en cuenta la maniobrabilidad del vehículo, asumiendo que este seguirá la trayectoria del circuito por el cual se desplaza.
- Existen diferentes factores que influyen en el desplazamiento de un vehículo, además de los generados de manera controlada (haciendo referencia a las fuerzas recibidas por el sistema de propulsión), el ambiente en el que se planea seguir una trayectoria influye especialmente con el comportamiento final de la trayectoria real que el vehículo seguirá. Así pues el vehículo se traslada en el eje Y, que coincide con su eje longitudinal, lo afectan las fuerzas aerodinámicas generadas por el viento real (con un ángulo γ), que está compuesto por el viento aparente (en el eje longitudinal) y por una corriente de viento con un ángulo ϕ , con respecto al eje Y.

A continuación se hará mención brevemente de la competición y el circuito de velocidad del cual se realizara las simulaciones.

1.1. SHELL ECO-MARATHON

La Shell Eco-marathon es una competición anual (que se celebra en diversos circuitos de carrera de Francia –Ladoux y Nogaro y el Reino Unido - Rockingham) cuyo objetivo es recorrer la mayor distancia posible con el mínimo combustible posible. Esta competición tiene una fuerte componente educativa dado que los participantes son esencialmente escuelas técnicas, universidades

y otros centros educativos. Hay dos grandes categorías, una es para prototipos en los que el diseño, la aerodinámica y el peso constituyen sus principales bazas para ahorrar combustible. La otra, es para vehículos de concepto urbano que deben asemejarse a los microcoches, con 4 ruedas, asiento para el conductor, etc.

Figura 1 Shell Eco-marathon



La compañía petrolera Shell, al patrocinar este evento pedagógico-deportivo pretende visualizar su interés por el ahorro de combustible en los vehículos. La historia de la *Shell Eco-Marathon* se remonta a hace unos 50 años. Por aquel entonces, en un laboratorio de investigación de la Shell en Illinois (EUA), un grupo de investigadores se retaron para ver quién podía conseguir más millas por galón con sus vehículos. En los primeros intentos apenas alcanzaron las 50 MPG (apenas unos 20 km con 1 litro de gasolina). Poco a poco, primero con competiciones modestas se fue configurando la idea de que era posible diseñar vehículos que consumieran mucho menos. Aunque la primera competición oficial se organizó en 1977 es en 1985, que toma el nombre de *Shell Eco-marathon* y se celebra en Francia. Sobre los años, el expediente de la economía de combustible se ha mejorado rápidamente.

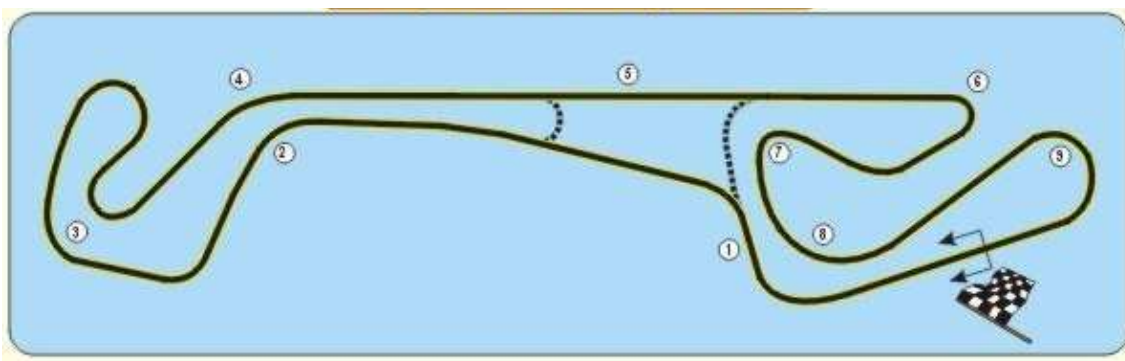
Figura 2 Vehículo UPV



1.2. CIRCUITO DE VELOCIDAD

En Francia se encuentra Nogaro, es un pequeño pueblo situado cerca de la capital de las Landas Monts de Marsans al suroeste de Francia. Nogaro tiene un circuito de velocidad el Paul Armagnac, es un circuito de 3.634 metros con 12 metros de ancho, con pequeños desniveles y con varios números de curvas donde se disputan diferentes carreras durante todo el año, desde copas de promoción, hasta carreras del nacional de supersport, superbikes, también hay carreras de coches y el Campeonato Europeo de camiones y la Shell Eco-Marathon.

Figura 3 Circuito de Nogaro "Paul Armagnac"



2. MODELADO DINÁMICO

Describe los aspectos de un sistema que cambian con el tiempo. El modelo dinámico se utiliza para especificar e implementar los aspectos de control del sistema. Debido a la dificultad en la realización de los modelos dinámicos de sistemas multicuerpo, que requieren de expresiones matemáticas de tamaño y complejidad considerables, aparece a partir de los años ochentas, programas computacionales de álgebra simbólica de utilidad general, que permiten no sólo facilitar las tareas de manipulación y simplificación de las ecuaciones resultantes, que se traducen en mejoras de la eficiencia computacional de los modelos, sino que también proporcionan una mayor amigabilidad y legibilidad para el usuario. Esta generación simbólica, fusiona las ventajas de las técnicas numéricas (utilización de rutinas y formalismos recursivos) con las ventajas de la generación manual en la que los modelos dinámicos obtenidos de forma analítica son generados simbólicamente una sola vez. Una vez obtenidos dichos modelos simbólicos, es necesario llevarlos a programas numéricos para su análisis (simulación en el tiempo, análisis modal, tareas de control, etc.).

El uso de la modelización para evaluar los requerimientos de seguridad y estabilidad de cualquier sistema mecánico ante un estímulo externo del tipo que fuere, ha crecido extraordinariamente como resultado del gran incremento en capacidad y reducción de coste de los computadores, como del software de cálculo y diseño. El potencial de tales avances se fundamenta en la habilidad para simular con gran exactitud sistemas mecánicos, mediante el uso de ecuaciones y módulos de análisis. Debido a que el modelado de cualquier sistema elimina un gran número de iteraciones en la fabricación y revisión de prototipos, así como en ensayos en laboratorio, su implementación en el proceso de diseño representa un gran ahorro económico así como de tiempo. Este razonamiento es totalmente aplicable al análisis del comportamiento dinámico del vehículo, con objeto de obtener un mejor diseño de sus sistemas y componentes.

2.1. MODELADO DINÁMICO DE VEHÍCULOS

El problema de la dinámica vehicular trata fundamentalmente del movimiento de vehículos sobre una superficie. Los movimientos de interés son la aceleración, el frenado, los cambios de dirección y el vuelco.

Con frecuencia son utilizados cuando se habla de vehículos, los términos control, estabilidad y maniobrabilidad. El control se puede definir como la acción del conductor realiza para “controlar” el movimiento del vehículo mediante la actuación directa sobre el vector velocidad y por tanto sobre su trayectoria. La estabilidad se refiere a la involuntariedad de un vehículo para salirse de su trayectoria. La maniobrabilidad es la habilidad que presenta cada vehículo para girar en las curvas satisfactoriamente y el estudio de cómo el conductor percibe el comportamiento del vehículo en las mismas.

El comportamiento dinámico vendrá determinado por las fuerzas aplicadas. Si consideramos al vehículo como un sólido rígido, las fuerzas que tendrá que soportar provendrán fundamentalmente de la carretera, la gravedad y la atmosfera (la aerodinámica).

El estudio del comportamiento de los vehículos automóviles debe contemplarse en el marco del sistema hombre-vehículo-medio y tener en cuenta las interacciones entre estos tres elementos básicos, que constituyen un sistema controlado en circuito cerrado.

El conductor percibe estímulos procedentes de la carretera, medio ambiente, condiciones de tráfico y del propio vehículo: vibraciones, aceleraciones, ruidos, información a través de indicadores, etc. Estos estímulos deben ser interpretados antes de adoptar una decisión que puede implicar alguna acción sobre cualquiera de los elementos de control del vehículo (volante, acelerador y freno). El vehículo, por su parte, recibe del conductor las acciones de control y produce una respuesta en función del comportamiento de sus propios sistemas y de la interacción con el medio: calzada y acciones aerodinámicas.

La respuesta del vehículo se traducirá en un incremento, decremento o mantenimiento de su velocidad; ascensión por una rampa o descenso por una

pendiente; modificando su trayectoria; gestión de curvas; vibraciones o ruidos; etc. Estas respuestas son percibidas por el conductor, quien podrá decidir nuevas actuaciones sobre el vehículo.

La interacción del vehículo con su medio tiene una influencia muy importante en su respuesta. En cuanto a la interacción rueda neumática- calzada, en ella se producen las fuerzas principales que permiten al vehículo ejecutar las funciones fundamentales relacionadas con su desplazamiento: fuerzas sustentadoras, de tracción, de frenado y laterales, estas últimas imprescindibles para el guiado del vehículo. Por su parte, la calzada es la principal fuente de excitación de las vibraciones verticales; estas producen una modificación de la carga dinámica sobre cada rueda, de gran importancia en el comportamiento del vehículo y, a su vez, influyen directamente en la comodidad de marcha que percibe el conductor (confort).

Las acciones del aire sobre el vehículo ejercen, igualmente, una influencia muy destacada sobre su comportamiento. En primer lugar, el aire produce una resistencia opuesta al movimiento, que a velocidades medias y altas es la principal componente de la potencia consumida. Por otra parte, afectan al comportamiento lateral del vehículo, teniendo influencia, aunque reducida, en la estabilidad direccional. Por último, se ejerce una fuerza sustentadora que reduce el peso adherente, en uno o ambos ejes, con la incidencia negativa en el comportamiento del vehículo que ello comporta, salvo que se instalen dispositivos especiales que hagan cambiar el sentido de dicha fuerza sustentadora. Las acciones laterales y verticales, adquieren importancia a altas velocidades. Esta última es considerable en vehículos de competición.

La respuesta dinámica del vehículo puede analizarse a través de diferentes variables que permitan su caracterización y comparación. Las más importantes son:

Prestaciones: Velocidad máxima, aceleración máxima, rampa máxima.

Frenado: Rendimiento de frenado, distancia de frenado y comportamiento en condiciones de rozamiento asimétrico.

Comportamiento direccional: Maniobrabilidad a baja velocidad, estabilidad direccional.

Comodidad: Amplitud y frecuencia de vibraciones.

El estudio de la respuesta dinámica de los vehículos y su posibilidad de mejorarla tiene incidencia en los requisitos exigibles a los vehículos automóviles, dicha respuesta está relacionada con las prestaciones: comodidad, seguridad, consumo, adaptabilidad a las exigencias del tráfico y en forma indirecta su influencia se extiende a los ruidos, emisiones, coste, etc.

Interacción entre el vehículo y la superficie de rodadura.

La totalidad de los vehículos de carretera utilizan ruedas neumáticas, cuyos cuatro elementos fundamentales son: llanta, cubierta, cámara (puede estar incluida en la cubierta y aire a una cierta presión, para proporcionar la rigidez necesaria al conjunto. Sus funciones básicas son:

- Soportar y transmitir al terreno la carga vertical.
- Desarrollar los esfuerzos longitudinales necesarios para la tracción y frenado.
- Proporcionar los esfuerzos laterales precisos para lograr el control y estabilidad de la trayectoria.
- Actuar como 'colchón' amortiguador de las acciones dinámicas originadas por las irregularidades de la pista.

El neumático puede considerarse como un sistema no lineal de gran complejidad. Los modelos desarrollados cumplen con el objetivo de proporcionar un medio de comprensión de los fenómenos asociados a la respuesta de los neumáticos en diferentes situaciones, mientras que los ensayos en laboratorio, y en pista, permiten determinar los parámetros suficientes para caracterizar cada neumático en particular.

Acciones aerodinámicas sobre los vehículos automóviles

La aerodinámica vehicular tiene como objeto el estudio del conjunto de acciones y efectos que ejerce el aire sobre el vehículo en movimiento, así como la forma de lograr que estos sean los más favorables posibles. Pueden distinguirse dos grupos de efectos asociados a dos flujos diferentes de aire:

-Flujo de aire externo al vehículo.

-Flujo de aire que pasa a través de compartimiento del vehículo.

El flujo de aire que transita alrededor del vehículo ocasiona una serie de fuerzas y momento que afectan de forma directa al movimiento, en forma de resistencia al avance o de inestabilidad de marcha. El flujo de aire que incide sobre el vehículo es viscoso, turbulento, tridimensional y presenta importantes vorticidades localizadas que se mueven sobre un contorno fuertemente irregular y con el único atenuante de ser incompresible, características que realzan la complejidad del problema a tratar. Así como en el diseño de las aeronaves, desempeña un papel fundamental, en los vehículos automóviles el problema no puede ser tratado de la misma forma. El flujo alrededor de un automóvil está fuertemente influenciado en una zona relativamente pequeña de la superficie, sino que el flujo alrededor del vehículo debe ser tratado como un todo, como un conjunto de una sola pieza.

En el flujo de aire alrededor del vehículo se producen separaciones, tanto de tipo local como global. Las separaciones locales tendrán lugar en accesorios que no forman parte propiamente de la carrocería del vehículo, mientras que las separaciones de tipo global tendrán lugar predominante en la parte trasera del vehículo y en lugares donde el flujo de aire es perturbado por elementos mecánicos y estructurales con dimensiones a tener en cuenta. El estudio y análisis del flujo de aire requiere la consideración de una serie de conceptos de la mecánica de fluidos afectados todos por la viscosidad del fluido.

En lo que se refiere a la circulación interna del aire, existen dos necesidades fundamentales: la refrigeración del motor y la aireación del habitáculo de pasajeros.

Las acciones aerodinámicas que actúan sobre un vehículo automóvil, en el caso más general pueden representarse por una resultante general de las fuerzas y un momento resultante, aplicados ambos al centro de gravedad del vehículo. Estos dos vectores pueden estudiarse a través de sus componentes en las direcciones longitudinal, transversal y vertical.

Dinámica longitudinal.

El estudio de la dinámica longitudinal abarca el análisis del comportamiento del vehículo cuando circula en línea recta o curva de gran radio, de modo que la aceleración lateral a la que está sometido es muy pequeña. Se ignora dicha acción y todas aquellas que generen asimetría con respecto al plano longitudinal del vehículo. La dinámica longitudinal incluye el estudio de los procesos de aceleración, circulación sobre rampas o pendiente y frenado.

Para vencer los esfuerzos resistentes se precisan esfuerzos tractores, generados en la interface neumático calzada, los cuales actúan, a su vez, como reacción a los esfuerzos transmitidos a las ruedas, desde el motor, por intermedio del sistema de transmisión. Las fuerzas de tracción estarán limitadas, por tanto, por las características de los órganos propulsores citados y por el valor máximo que impone, en cada caso, el rozamiento entre el neumático y calzada.

2.1.1. MODELO DINÁMICO DE UN VEHÍCULO ACKERMAN

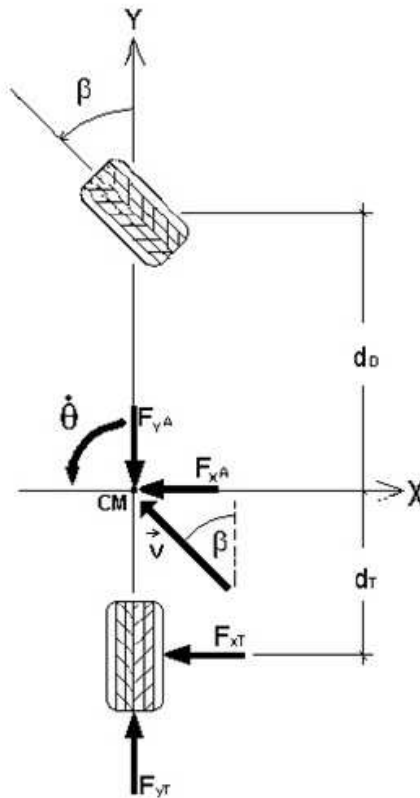
El modelo dinámico se obtiene analizando las fuerzas que ocasionan desplazamiento lateral y longitudinal en el plano X-Y del sistema de coordenadas fijo en el vehículo y los movimientos de rotación en torno del eje Z.

Se deben considerar algunas simplificaciones para hacer el seguimiento de trayectoria, a continuación se mencionan estas:

El CM (centro de masa) esta a nivel del suelo para evitar pérdidas de estabilidad, por tanto los movimientos de rotación alrededor del eje X y Y son

despreciables. Las ruedas de un mismo eje se representan por una rueda posicionada en el centro de este. Los movimientos de suspensión son despreciables. Estas simplificaciones dejan un modelo de Ackerman presentado a continuación.

Figura 4 Modelo de Ackerman



El análisis del diagrama de fuerzas de la figura anterior conduce a las siguientes ecuaciones, las cuales relacionan las componentes de fuerza en X_L y Y_L y los pares alrededor del eje Z_L

- Equilibrio de fuerzas en el eje X_L :

$$F_{xT} - F_{xA} \cdot \cos\beta = m \cdot \dot{v} \cdot \cos\beta \quad 1$$

- Equilibrio de fuerzas en el eje Y_L :

$$F_{yT} - F_{yA} \cdot \sin\beta = m \cdot \dot{v} \cdot \sin\beta \quad 2$$

- Equilibrio de pares alrededor del eje Z_L :

$$(F_{yT} \cdot dT) - (F_{yA} \cdot \text{Sen}\beta)dD = J_z \cdot \ddot{\theta} \quad 3$$

Donde dD y dT son la distancia de los ejes al C.M., $\dot{\theta}$ es la velocidad de rotación en C.M., v es la velocidad lineal en el C.M., J_z Momento de inercia alrededor del eje Z , F_{yT} y F_{xT} son las fuerzas de Tracción del vehículo, F_{xA} y F_{yA} son las fuerzas aerodinámicas.

2.2. AERODINÁMICA

La aerodinámica es la parte de la mecánica que se encarga de estudiar el movimiento relativo entre un sólido y el fluido gaseoso (generalmente aire) que lo rodea, determinando las presiones y fuerzas que se van a generar. En este campo son aplicables los mismos principios aerodinámicos que permiten a un avión volar, con la única diferencia de que el *perfil aerodinámico* del automóvil ha de producir una fuerza resultante hacia el suelo, fuerza de adherencia, en lugar de una fuerza de sustentación hacia arriba.

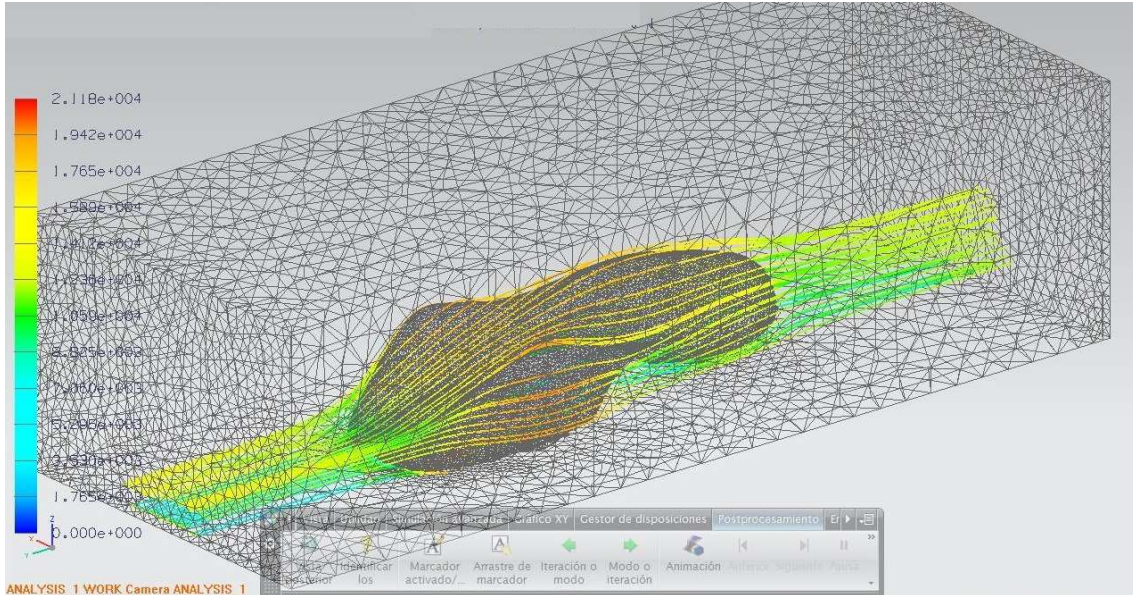
El análisis aerodinámico de un vehículo se ha venido haciendo a través de la historia y hasta la actualidad utilizando el tradicional túnel de viento y las técnicas de ensayo en ruta. Este procedimiento tiene la ventaja que estamos frente a la observación experimental, tiene como inconvenientes el hecho de invertir un gran tiempo de desarrollo, un esfuerzo humano importante y un costo considerable para encontrar efectivamente lo que en definitiva es el objetivo del diseño de un automóvil, satisfacer la demanda del consumidor.

2.2.1. DINÁMICA DE FLUIDOS COMPUTACIONAL (CFD)

La dinámica de fluidos es una rama de la física relativamente reciente (comienzos del siglo XX), aunque los conceptos en los que se basa se remontan a la antigua Grecia, a los trabajos teóricos de Leonardo Da Vinci, y

posteriormente al trabajo de un gran número de físicos como Torricelli, Euler, Bernoulli, etc.

Figura 5 EJEMPLO CFD



La dinámica de fluidos estudia los movimientos de los fluidos (gases y líquidos), debido a la acción de fuerzas, o a su interacción con otros medios y con el contorno que los delimita.

En realidad la dinámica de fluidos forma parte de un campo más amplio denominado *mecánica de fluidos*, del cual derivan tanto la estática de fluidos (estudia los fluidos en reposo), como la dinámica de fluidos (estudia los fluidos en movimiento). En la actualidad, la mecánica de fluidos es una parte esencial de muchas áreas de la tecnología y la ciencia actual, destacando su papel en el diseño de toda clase de vehículos (aviones, barcos, coches, etc.), estudios del flujo de aire atmosférico, medicina y biología (flujo de sangre y otros fluidos), ingeniería industrial, etc.

En la actualidad en muchos campos es imposible recurrir a soluciones analíticas debido a la tremenda complejidad de los sistemas que estudia la dinámica de fluidos, por lo que se recurre a soluciones numéricas que pueden ser calculadas por ordenadores. Surge así una rama de la dinámica de fluidos

denominada dinámica de fluidos computacional, que se basa en aproximaciones numéricas de las ecuaciones físicas empleadas en la dinámica de fluidos.

La Dinámica de Fluidos Computacional, o CFD por sus siglas en inglés, es la utilización de las computadoras como herramientas para resolver las ecuaciones de la dinámica de fluidos con el fin de poder aplicarlas a problemas reales y de utilidad práctica.

Así pues, hay tres niveles de estudio en la dinámica de fluidos computacional.

- Por un lado están los aspectos fundamentales que resultan en un conjunto de ecuaciones generalmente bastante complicadas que nos describen lo que físicamente ocurre en determinada situación. Puede decirse que este aspecto pertenece enteramente a la dinámica de fluidos como rama de la ciencia.
- Después está el problema de resolver esas ecuaciones usando la computadora. Aquí intervienen conceptos de otras disciplinas como el análisis numérico, desarrollo de software, visualización de imágenes, etc.
- Finalmente, está el aspecto práctico, en el que el usuario generalmente usa el software creado como resultado de los dos puntos anteriores y lo aplica a problemas reales. En este caso, siempre existe la necesidad de verificar los resultados numéricos con resultados medidos cuidadosamente en un sistema de prueba.

El análisis aerodinámico de vehículos mediante CFD pretende encontrar por un lado, como una medida macroscópica global, los valores de fuerzas y momentos que es usualmente la información que se obtiene en un túnel de viento y de esta forma tener una idea de las fuerzas de resistencia al avance (Drag) y de sustentación (Lift) sobre el vehículo. También es posible determinar la posición del centro de presión que ejerce una vital importancia en la definición de la estabilidad direccional del vehículo en su dinámica lateral. Por

otro lado el análisis computacional ofrece la ventaja de poder ver muchas variables del problema que son muy difíciles de acceder en la realidad, por ejemplo ver líneas de corriente, desprendimiento de vórtices, campos de presiones alrededor del vehículo.

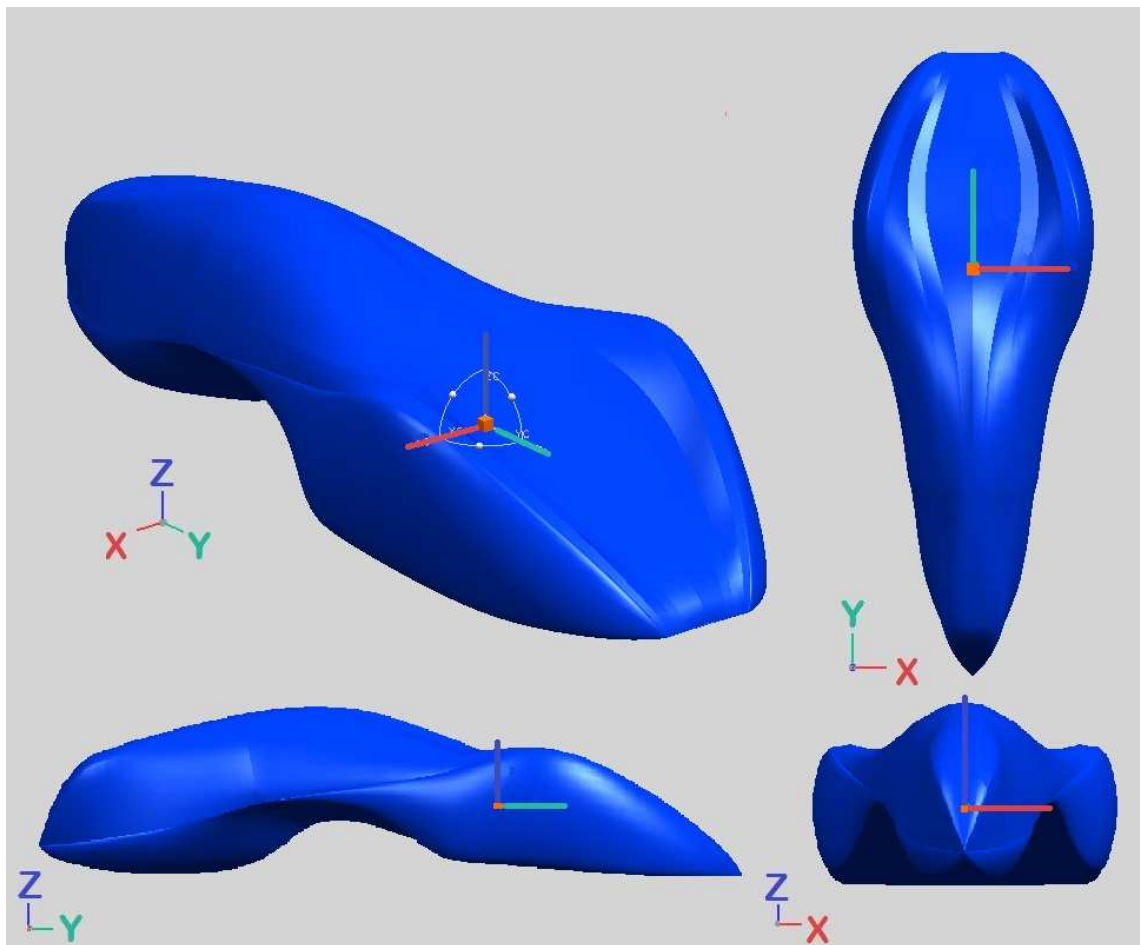
2.2.2. FUERZAS QUE INTERACTÚAN CON EL VEHÍCULO

Cuando en un proceso mecánico interactúan dos sólidos, las fuerzas se aplican y transmiten en el punto de contacto. Pero cuando un sólido interactúa con el aire, en las moléculas del aire próximas al mismo se produce una distorsión, comenzando a moverse alrededor del sólido. El aire cambia de forma, fluyendo alrededor del sólido y manteniendo un contacto físico en todos sus puntos. Por ello, el “punto de contacto” de las fuerzas aerodinámicas generadas son todos y cada uno de los puntos de la superficie del cuerpo.

La magnitud de dichas fuerzas va a depender tanto del aire como del sólido, en este caso el automóvil. Dos son las propiedades fundamentales del aire a tener presentes: su viscosidad y su densidad o, lo que es lo mismo, su compresibilidad. En el caso del automóvil ha de considerarse su forma, su rugosidad superficial, el área de contacto con el aire y, sobre todo, la velocidad relativa entre éste y el aire. Todo esto se traduce en fuerzas que interactúan con el vehículo las cuales son: fuerza aerodinámica, resistencia de rozamiento, resistencia a la pendiente y fuerza de tracción.

Para realizar el análisis de las fuerzas que interactúan con el vehículo se determino que el eje de coordenadas estaría vinculado al vehículo situado en el centro de masa como se muestra en la siguiente imagen.

Figura 6 Sistemas de Coordenadas Asumido



2.2.2.1. FUERZA AERODINÁMICA

Aplicada a un vehículo, se expresa como la fuerza que necesita para desplazarse dentro de la atmósfera, sin tener en cuenta el rozamiento con el suelo, es posible hacer la comparación entre un barco que se mueve por el agua y un vehículo que se mueve por el aire, pues ambos se encuentran penetrando y moviéndose a través de un fluido. En un coche normal, la mayor cantidad de resistencia aerodinámica se debe a la necesidad de desplazar el aire y a las diferencias de presión que se forman debido a ello. La depresión que se forma en la parte posterior del coche es la principal causa de resistencia aerodinámica.

La fuerza necesaria para desplazarse en la atmósfera es proporcional a la superficie frontal (S), al coeficiente de penetración (Cx), a un medio de la densidad del aire (ρ) y al cuadrado de la velocidad del viento (v).

$$F_a = -\frac{1}{2} \cdot S \cdot C_x \cdot \rho \cdot V^2 \quad 4$$

Es posible medir la efectividad aerodinámica de los vehículos y en general de cualquier cuerpo. Se llama Resistencia Aerodinámica y mide la resistencia que opone el aire al avance de un determinado cuerpo.

El coeficiente aerodinámico ó coeficiente de penetración "**Cx**", donde la x indica una dirección en un eje de tres coordenadas, al coeficiente vertical o de elevación se le denomina Cz por la misma causa. Otra forma de referirse al coeficiente de penetración es el Cd, donde la d es la inicial de la palabra inglesa "drag".

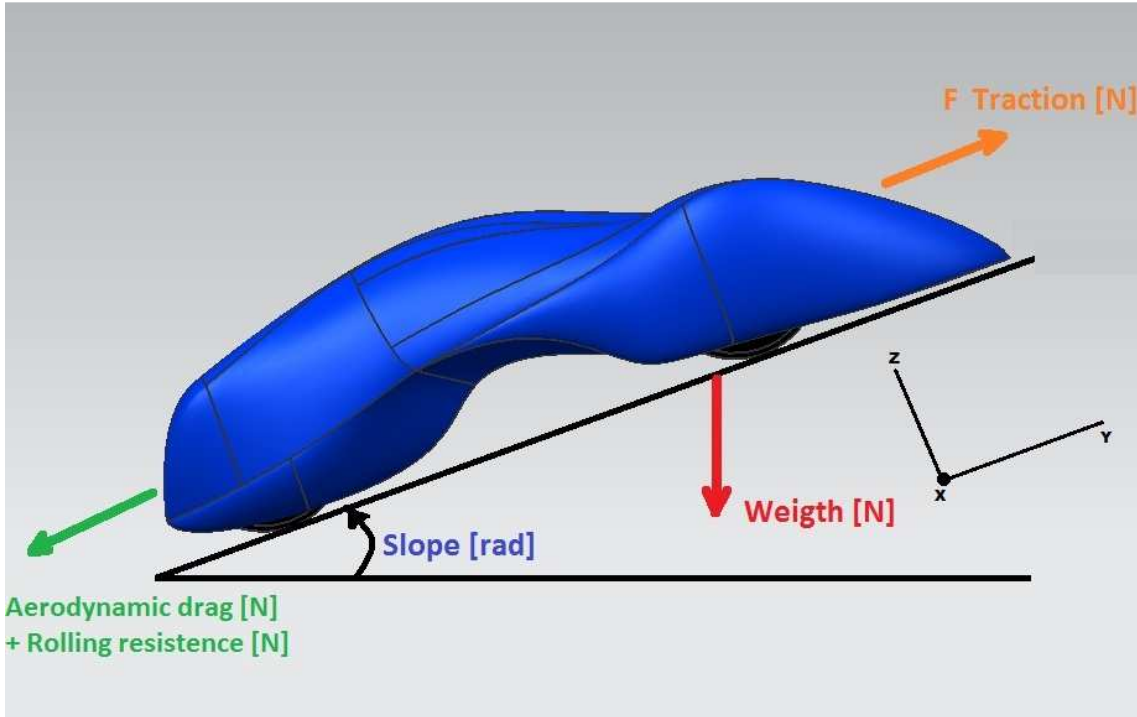
El Cx es un factor adimensional que cuantifica la resistencia que presenta la forma de algún cuerpo al penetrar y moverse a través del aire, es posible afirmar que hasta cierto punto es independiente del tamaño del cuerpo y de la velocidad del fluido (aire). Pasado ese punto podría haber variaciones en el Cx por cualquiera de las estas causas anteriormente mencionadas, es por esta razón que cuando no se utilizan modelos a escala real y por el contrario se usan modelos de menor escala para analizar la aerodinámica de un cuerpo nunca se usan modelos con escalas muy pequeñas más específicamente menores a 1:5.

"La mayoría de los vehículos modernos tienen un Cx de entre 0.28 y 0.35, los vehículos todo terreno tienen un Cx que varía entre 0.35 y 0.45, vehículos prototipo pueden bajar aún más su Cx hasta llegar a tener menos de 0.25. En cambio un auto de Formula 1 tiene un Cx de 0.7 a 1.1, dependiendo de la pista en la que va a correr".

2.2.2.2. RESISTENCIA DE RODADURA

La resistencia de rodadura involucra dos tipos de resistencias que afectan el desplazamiento del vehículo, siendo estas la resistencia al rozamiento y la resistencia a la pendiente como se observa en la figura.

Figura 7 Fuerzas actuando sobre el vehículo



RESISTENCIA AL ROZAMIENTO

Debido al peso concentrado sobre las rueda los neumáticos ejercen presión sobre el terreno, esta presión hace que el neumático no se apoye solo sobre un punto, sino sobre una superficie más o menos grande que origina el rozamiento con el terreno y por lo tanto una resistencia ($F_{rolling}$), llamada resistencia al rozamiento. La resistencia al rozamiento es la fuerza necesaria para vencer las fuerzas que ofrecen resistencia al movimiento, como son la fricción entre el neumático y el pavimento y la fricción en las partes móviles del vehículo, con el objetivo de convertir el esfuerzo motor en movimiento evitando los deslizamientos y los desplazamientos laterales

$$F_{rolling} = -M_{car} \cdot g \cdot \cos(\alpha_{slope}(t)) \cdot C_r \quad 5$$

Donde M_{car} es la masa del vehículo, g la constante de gravedad, α_{slope} el ángulo de la pendiente, C_r coeficiente de rodadura.

RESISTENCIA A LA PENDIENTE

Cuando el vehículo se encuentra en un plano inclinado (Figura), una parte del peso ejerce una fuerza en contra al sentido de la marcha, originando una resistencia (F_{slope}) debida a la pendiente, que se opone a la fuerza de tracción. En consecuencia hay que aumentar la fuerza de tracción para poder desplazar el vehículo. La resistencia a la pendiente depende del peso del vehículo y del ángulo de la pendiente.

$$F_{slope} = -M_{car} \cdot g \cdot \text{sen}(\alpha_{slope}(t)) \quad 6$$

2.2.2.3. FUERZA DE TRACCIÓN

Esta se refiere a la fuerza transmitida por el motor a través de una transmisión mecánica de engranajes a las ruedas, cuando la fuerza de tracción es mayor a las fuerzas que presentan resistencia al movimiento, se traduce en un desplazamiento del vehículo.

La fuerza de tracción está dada por:

$$F_{traccion} = \frac{T_{wheel}}{r_{wheel}} \quad 7$$

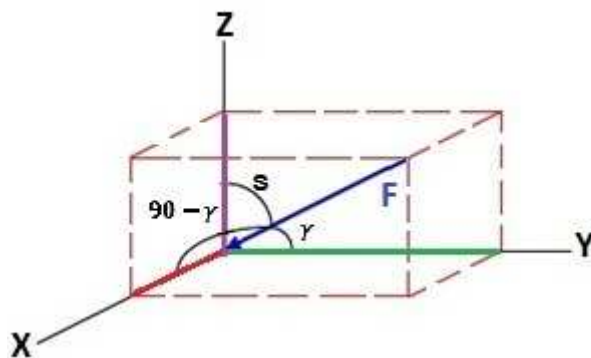
$$T_{wheel} = T_{motor} \cdot r_{gear} \cdot \eta_{gear} \quad 8$$

Donde T_{wheel} es el torque en la rueda, r_{wheel} el radio de la rueda, T_{motor} es el torque del motor, r_{gear} la relación de la transmisión (o engranaje), y η_{gear} es la eficiencia de la transmisión.

2.3. ANÁLISIS MECÁNICO

Después de realizar una explicación teórica de algunos conceptos que se tuvieron en cuenta en la realización de este trabajo, se presentan las consideraciones finales para analizar las diferentes fuerzas que influyen en el desplazamiento del vehículo, asumiendo las componentes de cada una en los tres ejes del sistema de coordenadas XYZ del modo que se muestra a continuación.

Figura 8 Eje de Coordenadas



Partiendo de los principios dinámicos fundamentales, la representación de las fuerzas del vehículo puede expresarse como:

$$\sum_{i=t}^k \mathbf{F}_i(t) = M_{car} \frac{dV_{car}(t)}{dt} \quad 9$$

En la cual la sumatoria de fuerzas puede expresarse como:

$$\sum_{i=t}^k \mathbf{F}_i(t) = \mathbf{F}_1 + \mathbf{F}_2 + \mathbf{F}_3 \quad 10$$

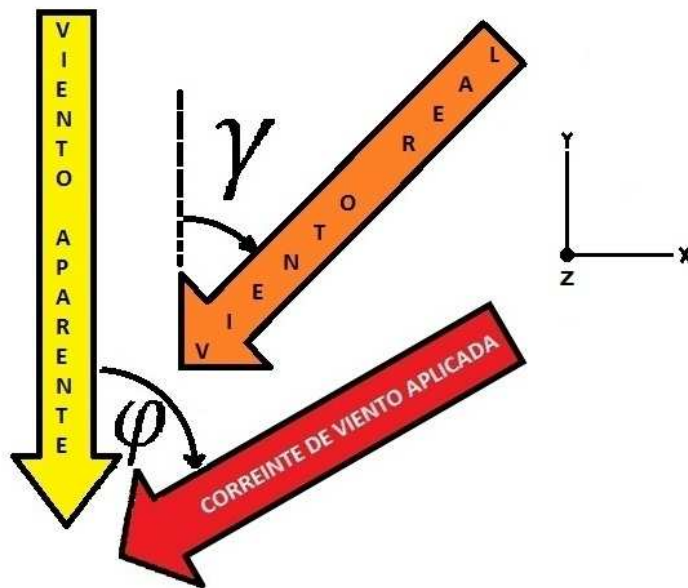
Donde F_1 es la fuerza de tracción, F_2 es la resistencia aerodinámica y F_3 es la resistencia de rodadura.

Fuerza Aerodinámica

La fuerza aerodinámica que experimenta el vehículo tiene una relación con el viento que interactúa con la carrocería del mismo, para poder analizar el comportamiento de este fenómeno, se establecieron diferentes puntos de incidencia del viento. Para este caso y como principal objetivo de este trabajo

se realiza un análisis de las corrientes de viento que rodean el vehículo junto con el viento aparente para encontrar la fuerza aerodinámica resultante, siendo esta la gran aportación del trabajo realizado para determinar el comportamiento del vehículo en su desplazamiento a medida que se ve afectado por los cambios de dirección de la corriente de viento que incide sobre este; de forma tal que se contara con resultados para las fuerzas aerodinámicas generadas alrededor de toda la carrocería.

Figura 9 Componentes de viento



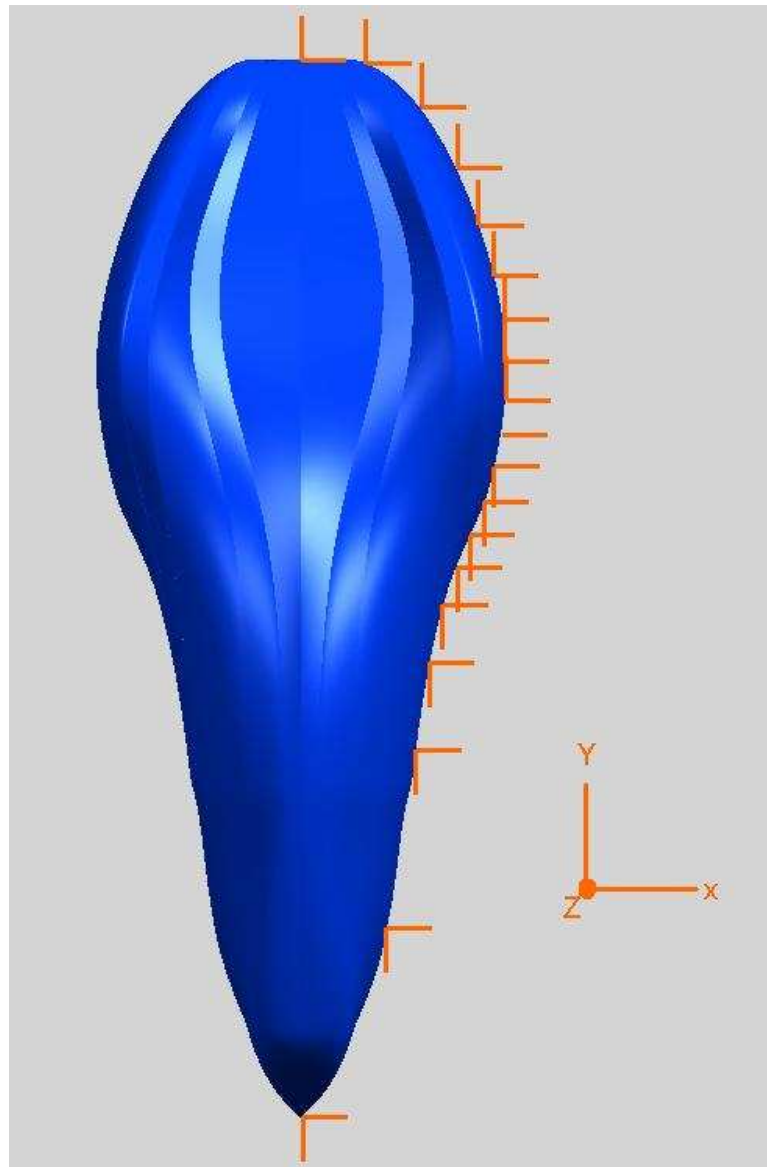
En la figura anterior se muestran los vectores que representan las corrientes de viento donde tenemos:

- El viento aparente V_a , que es la corriente que se genera en contra del movimiento vehículo.
- Corriente de viento aplicada V_c , es una corriente que se está aplicando con un ángulo phi (ϕ).
- Viento Real V_{r_i} , es la corriente resultante de la suma de los dos vectores de las dos corrientes de viento aplicadas sobre el vehículo, obteniendo así un vector de una corriente de viento real a un ángulo gamma (γ).

Si se divide el vehículo haciendo un corte por su eje longitudinal, se observa que es simétrico, por lo cual solo hace falta analizar una de las mitades,

teniendo en cuenta la simetría se estimo analizar el resultado de la fuerza aerodinámica cada 10° empezando desde 0° hasta llegar a 180° tal como se muestra en la siguiente imagen. En la imagen se muestra las componentes de la fuerza aerodinámica en cada punto de incidencia sobre su punto de aplicación en particular.

Figura 10 Componentes fuerza aerodinámica



Después de realizar la suma vectorial para encontrar el valor del vector del viento real y su ángulo realizamos una interpolación según los valores obtenidos de la siguiente tabla

Tabla 1 Variación fuerza aerodinámica

| $\angle \gamma$ | Fuerza de Arrastre F_{a_0} [N] |
|-----------------|----------------------------------|
| 0 | 27,71 |
| 10 | 27,60 |
| 20 | 27,81 |
| 30 | 31,10 |
| 40 | 32,60 |
| 50 | 33,80 |
| 60 | 35,70 |
| 70 | 34,72 |
| 80 | 35,47 |
| 90 | 35,94 |
| 100 | 34,09 |
| 110 | 36,11 |
| 120 | 36,63 |
| 130 | 35,42 |
| 140 | 34,64 |
| 150 | 32,13 |
| 160 | 24,66 |
| 170 | 22,31 |
| 180 | 21,14 |

Los valores de la fuerza de arrastre F_{a_0} , proporcionados por esta tabla han sido obtenidos por medio del software de dinámica de fluidos 'NX' tomando como valores, viento aparente de 30 Km/h y corriente de viento de 50 Km/h.

Para obtener los resultados de la fuerza aerodinámica a diferentes velocidades con un ángulo de incidencia (γ); se analizó la ecuación (4) y se consideró que los términos $\left(-\frac{1}{2}\rho_{air} \cdot A_f \cdot C_x\right)$ son constantes y se denotó con la letra K:

$$K = -\frac{1}{2}\rho_{air} \cdot A_f \cdot C_x \quad 11$$

Reemplazando en la ecuación (4) se tiene:

$$F_a = K \cdot v_R^2 \begin{cases} F_a^i(\gamma') = K(\gamma) \cdot (v_R^i(\gamma'))^2 \\ F_a^o(\gamma) = K(\gamma) \cdot (v_R^o(\gamma))^2 \end{cases} \quad 12$$

Con esto se consigue una relación cuadrática en la que al aumentar la fuerza, la velocidad aumenta al cuadrado, con esta relación se obtiene la fuerza de aerodinámica resultante:

$$F_a^i(\gamma') = \frac{F_a^o(\gamma)}{(v_R^o(\gamma))^2} \cdot (v_R^i(\gamma'))^2 \quad 13$$

Tras obtener la fuerza aerodinámica y conociendo su ángulo (γ) se puede obtener las componentes en cada uno de los ejes de la fuerza:

$$F_{a_x} = F_a \cdot \sin(\gamma) \quad 14$$

$$F_{a_y} = F_a \cdot \cos(\gamma) \quad 15$$

$$F_{a_z} = F_a \cdot \cos(90) \quad 16$$

Como se observa en la última ecuación F_{a_z} tendrá un valor de cero debido a que la fuerza aerodinámica no tiene componentes sobre este eje de coordenadas.

Resistencia a la Rodadura

La resistencia a la rodadura se obtiene de la sumatoria vectorial de la resistencia al rozamiento ($F_{rolling}$), y la resistencia a la pendiente (F_{slope}); para obtener las componentes en cada uno de los ejes se cuenta con las siguientes expresiones:

$$F_s = \sqrt{F_{rolling}^2 + F_{slope}^2} \quad 17$$

$$F_{s_x} = F_s \cdot \cos(90) \quad 18$$

$$F_{s_y} = F_s \cdot \cos(s) \quad 19$$

$$F_{s_z} = F_s \cdot \text{sen}(s) \quad 20$$

Donde s es el valor del ángulo de la pendiente.

Fuerza de Tracción

Para la fuerza de tracción sus componentes están dadas por las siguientes expresiones:

$$F_{T_x} = F_T \cdot \cos(90) \quad 21$$

$$F_{T_y} = F_T \cdot \cos(0) \quad 22$$

$$F_{T_z} = F_T \cdot \cos(90) \quad 23$$

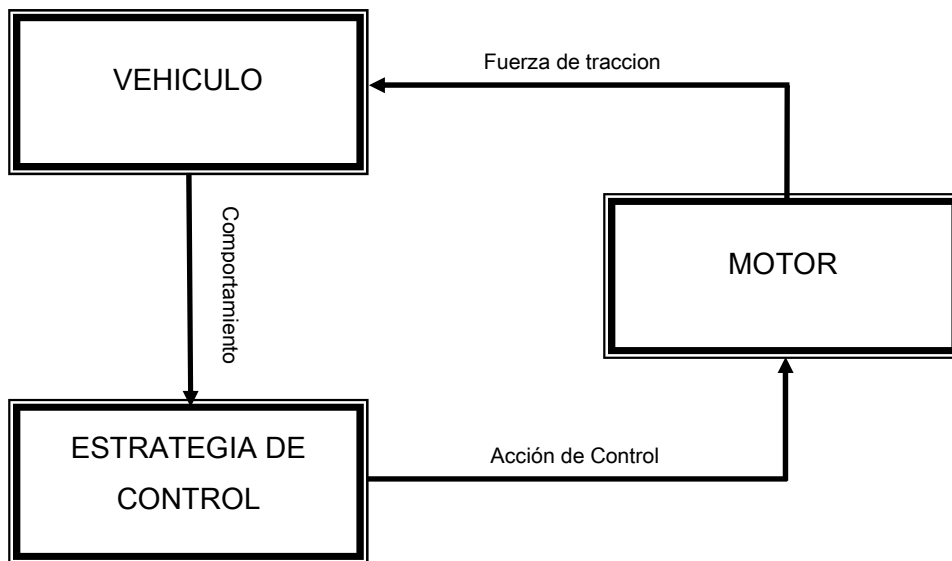
Se puede observar que la fuerza de tracción tiene solo una componente en el eje y , que es en el sentido del desplazamiento del vehículo.

2.4. IMPLEMENTACION DEL MODELO DEL VEHÍCULO EN SIMULINK

Un modelo no representa perfectamente la realidad pero si una parte, la cuestion es que tan preciso debe ser el modelo; si es demasiado preciso, sera muy complejo para usar y tomara mucho tiempo la simulacion, pero si es muy sencillo, no representara suficientemente la realidad y se producirian resultados erroneos y las conclusiones serian las equivocadas, se ha buscado la representacion del modelo de la mejor manera.

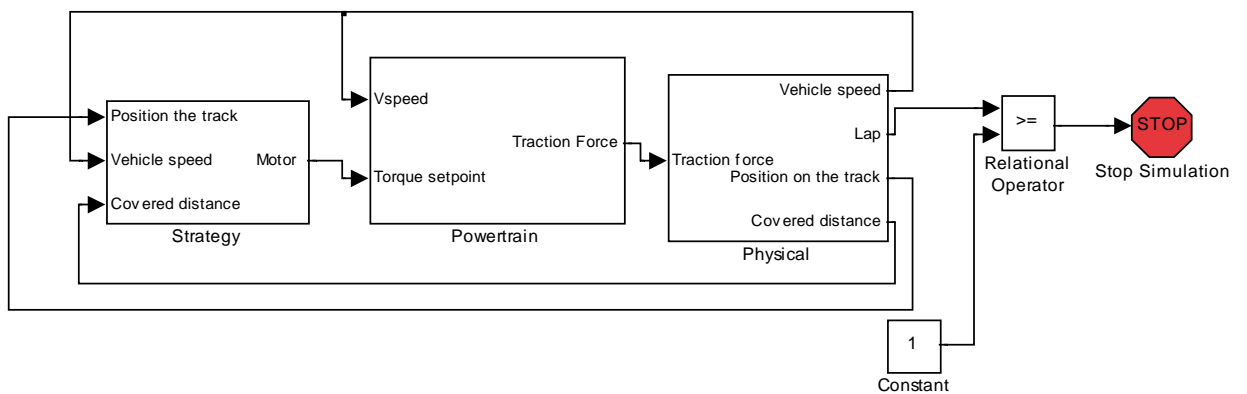
Una forma de representar lo que compone el modelo en simulink se muestra en el siguiente diagrama de bloques

Figura 11 Diagrama de Bloques del sistema



Con la ayuda de la herramienta de Matlab y Simulink se realizó la implementación del modelo del vehículo, y se realizaron diferentes simulaciones para obtener resultados de su comportamiento ante diferentes situaciones, el modelo de simulink es el siguiente:

Figura 12 Modelo Simulink del vehículo



El modelo está compuesto por tres bloques principales que son:

1. Bloque Physical
2. Bloque Powertrain
3. Bloque Strategy

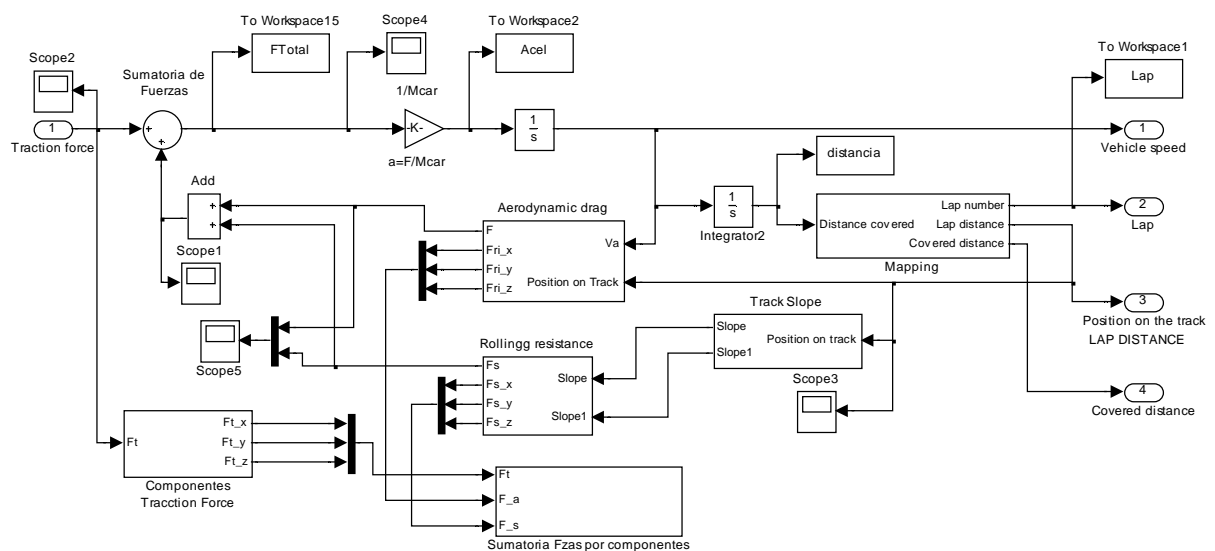
Se tiene una constante (1) que determina el número de vueltas a realizar por el vehículo en el circuito según sea el caso.

A continuación se mostraran cada uno de los bloques mencionados anteriormente para realizar una descripción de cada uno y sus partes que lo componen.

2.4.1. BLOQUE PHYSICAL

Dentro de este bloque se ha desarrollado el modelo dinámico del vehículo mediante análisis de fuerzas, como ya se describió anteriormente, de esta forma el bloque internamente está compuesto como se muestra en la figura.

Figura 13 Bloque Simulink Physical



Como se observa en la Figura 13 el bloque Physical aparte de tener cada una de las fuerzas involucradas en el desplazamiento del vehículo, también está compuesto por otros dos bloques que son:

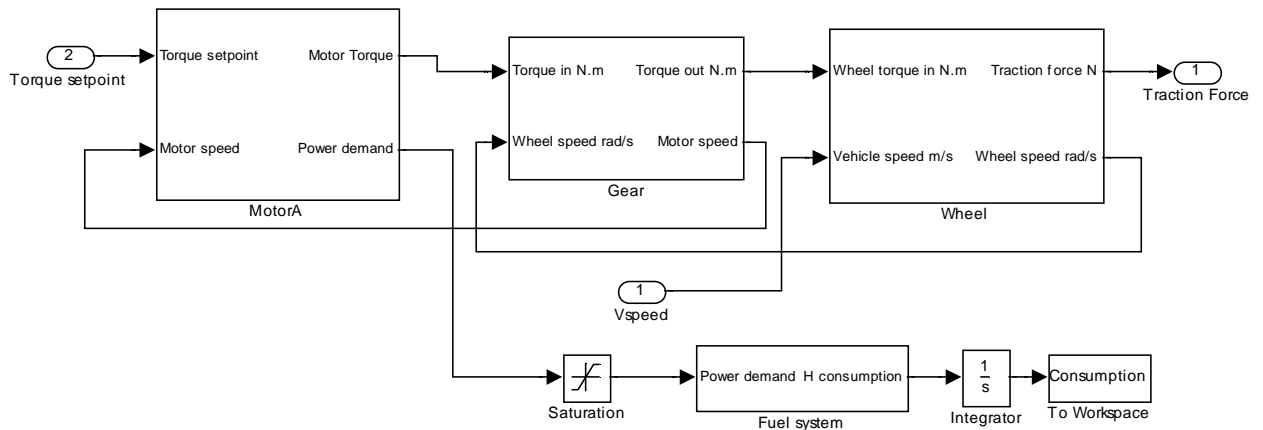
- **Mapping:** determina el recorrido del vehículo en el circuito, en donde se calcula el número de vueltas dadas por el vehículo, la posición actual en el circuito y la distancia total recorrida por el vehículo.

- **Track Slope:** este bloque permite determinar la pendiente del circuito según la posición donde se encuentra el vehículo dentro del circuito.

2.4.2. BLOQUE POWERTRAIN

En este bloque se pretende dar la mejor aproximación al modelo del tren de potencia del vehículo, está compuesto por el motor, la transmisión y la rueda como se ve en la figura.

Figura 14 Bloque Simulink Powertrain

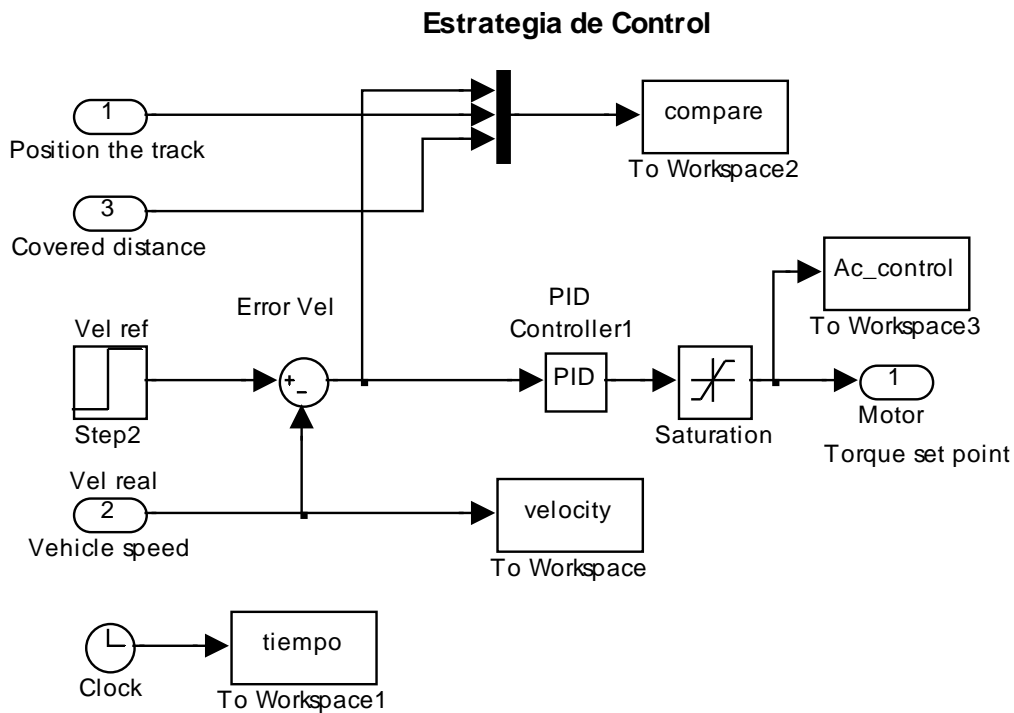


Dentro de este bloque además se tiene el sistema de combustible que proporciona el consumo del vehículo con relación a la potencia demandada por el motor.

2.4.3. BLOQUE STRATEGY

Finalmente se tiene el bloque Strategy, en el cual se determina que acciones se deben tomar para el movimiento del vehículo teniendo como referencia una velocidad determinada.

Figura 15 Bloque Simulink Strategy



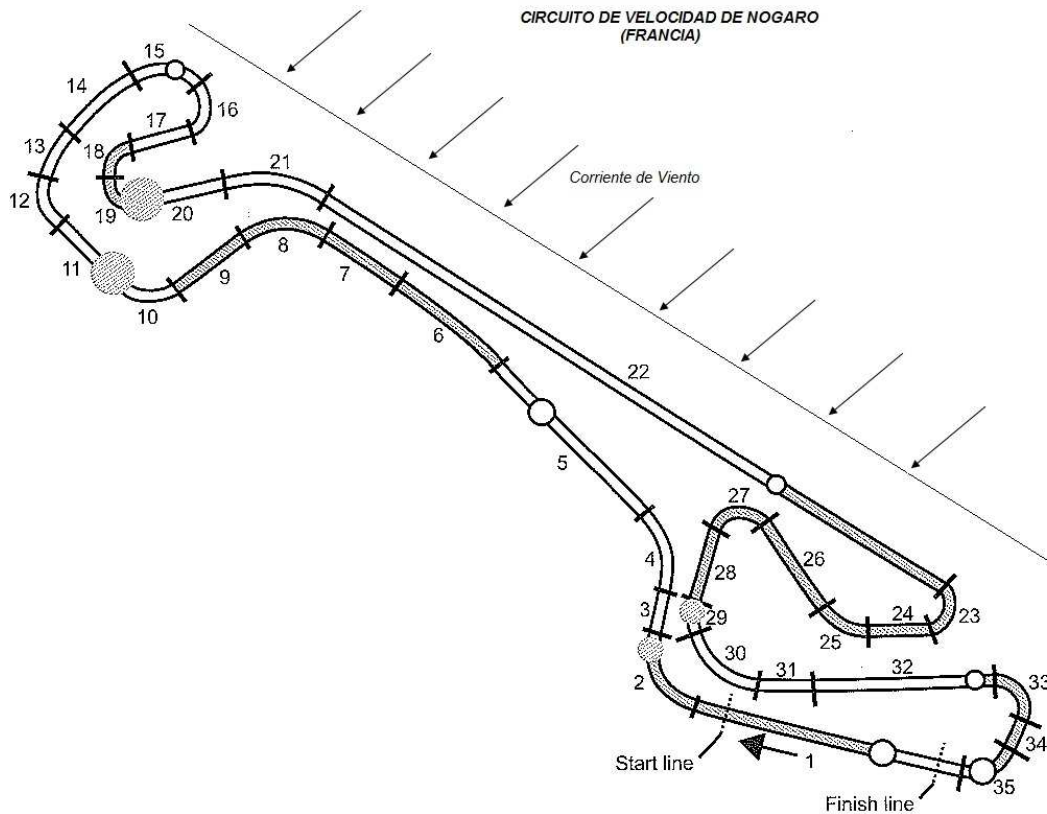
Se observa que dentro de los bloques principales que componen el modelo del vehículo hay bloques de subsistemas que no se muestran en este apartado; estos se pueden ver en el Anexo 1.

3. PROGRAMACIÓN Y SIMULACIÓN

Para las simulaciones del modelo y su comportamiento a lo largo del circuito se asumen las siguientes condiciones:

- Se asume que una corriente de viento con un ángulo determinado (φ') afecta a todo el circuito de manera uniforme.
- El vehículo sigue la trayectoria del circuito, con esto no se tendrá en cuenta la maniobrabilidad.
- El ángulo de aplicación de la corriente de viento inicial es determinado con respecto al punto de partida del circuito, ya que conforme el vehículo avanza en el circuito este ángulo varía.

Figura 16 Circuito de Velocidad de Nogaro



Conforme el vehículo avanza en el circuito el ángulo de incidencia de la corriente de viento (φ) cambia; la variación de este ángulo está dada por la relación existente entre el ángulo de orientación del vehículo con respecto al circuito ($\angle O$) en cada punto y ($\angle \varphi'$). En la siguiente tabla se muestran los valores del ángulo ($\angle O$)

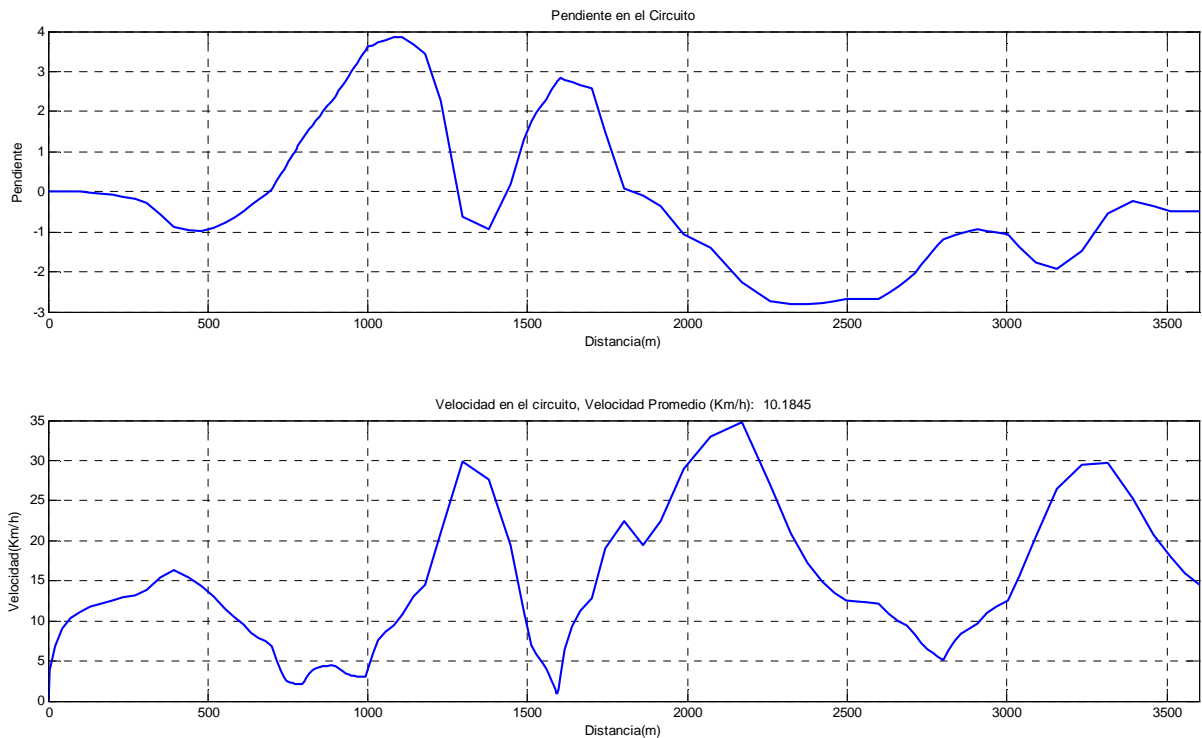
Tabla 2 Evolución Angulo (O) en el circuito

| Distancia Circuito | $\angle O$ |
|--------------------|------------|
| 0 | 0 |
| 100 | 90 |
| 200 | 90 |
| 300 | 90 |
| 400 | 90 |
| 500 | 80 |
| 600 | 80 |
| 700 | 80 |
| 800 | 40 |
| 900 | 40 |
| 1000 | 60 |
| 1100 | 60 |

| | |
|------|-----|
| 1200 | 60 |
| 1300 | 120 |
| 1400 | 120 |
| 1500 | 120 |
| 1600 | 120 |
| 1700 | 30 |
| 1800 | 30 |
| 1900 | 150 |
| 2000 | 150 |
| 2100 | 160 |
| 2200 | 160 |
| 2300 | 90 |
| 2400 | 20 |
| 2500 | 45 |
| 2600 | 45 |
| 2700 | 0 |
| 2800 | 90 |
| 2900 | 90 |
| 3000 | 90 |
| 3100 | 160 |
| 3200 | 160 |
| 3300 | 160 |
| 3400 | 90 |
| 3500 | 0 |
| 3600 | 0 |
| 3635 | 0 |

Teniendo estas consideraciones se realizo una primera simulación del sistema ante un impulso para observar su comportamiento en el recorrido del circuito ante las variaciones de pendiente en este.

Figura 17 Evolución de velocidad frente un impulso



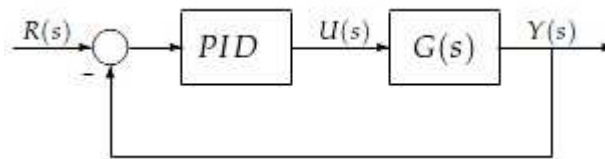
Se observa las variaciones en la velocidad con respecto a la pendiente, ante una pendiente positiva (ascenso) se ve la reducción en la velocidad y de la misma forma cuando se presenta una pendiente negativa (descenso), se observa un incremento en la velocidad.

3.1. CONTROLADORES Y ESTRATEGIAS DE CONTROL

El objetivo de cualquier estrategia de control es mantener una variable llamada controlada próxima a un valor deseado conocido como punto de ajuste "set-point".

Un sistema de control, solamente puede llegar a la regulación, aplicando en oposición a las fuerzas perturbadoras llamadas cargas, correcciones equivalentes en una o más variables denominada controlada. La variable controlada permanecerá estable, en el proceso mientras se encuentre en estado estacionario. Este equilibrio puede ser alcanzado usualmente por distintos sistemas de control.

18 Diagrama de Bloques PID



Los miembros de la familia de controladores PID, incluyen tres acciones: proporcional (P), integral (I) y derivativa (D). Estos controladores son los denominados P, PI, PD, PID.

La estructura de un controlador PID es simple, aunque su simpleza es también su debilidad, dado que limita el rango de plantas donde pueden controlar en forma satisfactoria (existe un grupo de plantas inestables que no pueden estabilizadas con ningún miembro de la familia PID).

Acción de Control Proporcional

Este tipo de controlador genera una salida que es proporcional al error actuante es decir:

$$u(t) = K_p \cdot e(t), \quad C_p(s) = K_p \quad 24$$

Donde K_p es una ganancia proporcional ajustable. Un controlador proporcional puede controlar cualquier planta estable, pero posee desempeño limitado y error en régimen permanente (off-set).

Acción de Control Integral

Genera una salida del controlador que es proporcional al error acumulado, lo que implica que es un modo de controlar lento.

$$u(t) = K_i \cdot \int_0^t e(\tau) d\tau, \quad C_i(s) = \frac{K_i}{s} \quad 25$$

La señal de control $u(t)$ tiene un valor diferente de cero cuando la señal de error $e(t)$ es cero. Por lo que se concluye que dada una referencia constante, o perturbaciones, el error en régimen permanente es cero.

Acción de Control Proporcional – Integral

Se define mediante:

$$u(t) = K_P \cdot e(t) + \frac{K_P}{T_i} \cdot \int_0^t e(\tau) d\tau \quad 26$$

donde T_i se denomina tiempo integral y es quien ajusta la acción integral. La función de transferencia resulta:

$$C_{PI}(s) = K_P \cdot \left(1 + \frac{1}{T_i s}\right) \quad 27$$

Con un control proporcional, es necesario que exista error para tener una acción de control distinta de cero. Con acción integral, un error pequeño positivo siempre nos dará una acción de control creciente, y si fuera negativo la señal de control será decreciente. Este razonamiento sencillo nos muestra que el error en régimen permanente será siempre cero.

Muchos controladores industriales tienen solo acción PI. Se puede demostrar que un control PI es adecuado para todos los procesos donde la dinámica es esencialmente de primer orden. Lo que puede demostrarse en forma sencilla, por ejemplo, mediante un ensayo al escalón.

Acción de Control Proporcional – Derivativa

Se define mediante:

$$u(t) = K_P \cdot e(t) + K_P \cdot T_d \cdot \frac{de(t)}{dt} \quad 28$$

dónde T_d es una constante denominada tiempo derivativo. Esta acción tiene carácter de previsión, lo que hace más rápida la acción de control, aunque tiene la desventaja importante que amplifica las señales de ruido y puede provocar saturación en el actuador. La acción de control derivativa nunca se utiliza por sí sola, debido a que solo es eficaz durante periodos transitorios. La función transferencia de un controlador PD resulta:

$$C_{PD} = K_P + K_P \cdot T_d \cdot s \quad 29$$

Cuando una acción de control derivativa se agrega a un controlador proporcional, permite obtener un controlador de alta sensibilidad, es decir que

responde a la velocidad del cambio del error y produce una corrección significativa antes de que la magnitud del error se vuelva demasiado grande. Aunque el control derivativo no afecta en forma directa al error en estado estacionario, añade amortiguamiento al sistema y, por tanto, permite un valor más grande que la ganancia K, lo cual provoca una mejora en la precisión en estado estable.

Acción de Control Proporcional – Integral – Derivativa

Esta acción combinada reúne las ventajas de cada una de las tres acciones de control individuales. La ecuación de un controlador con esta acción combinada se obtiene mediante:

$$u(t) = K_P \cdot e(t) + \frac{K_P}{T_i} \cdot \int_0^t e(\tau) d\tau + K_P \cdot T_d \cdot \frac{de(t)}{dt} \quad 30$$

Y su función de transferencia resulta:

$$C_{PID}(s) = K_P \cdot \left(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right) \quad 31$$

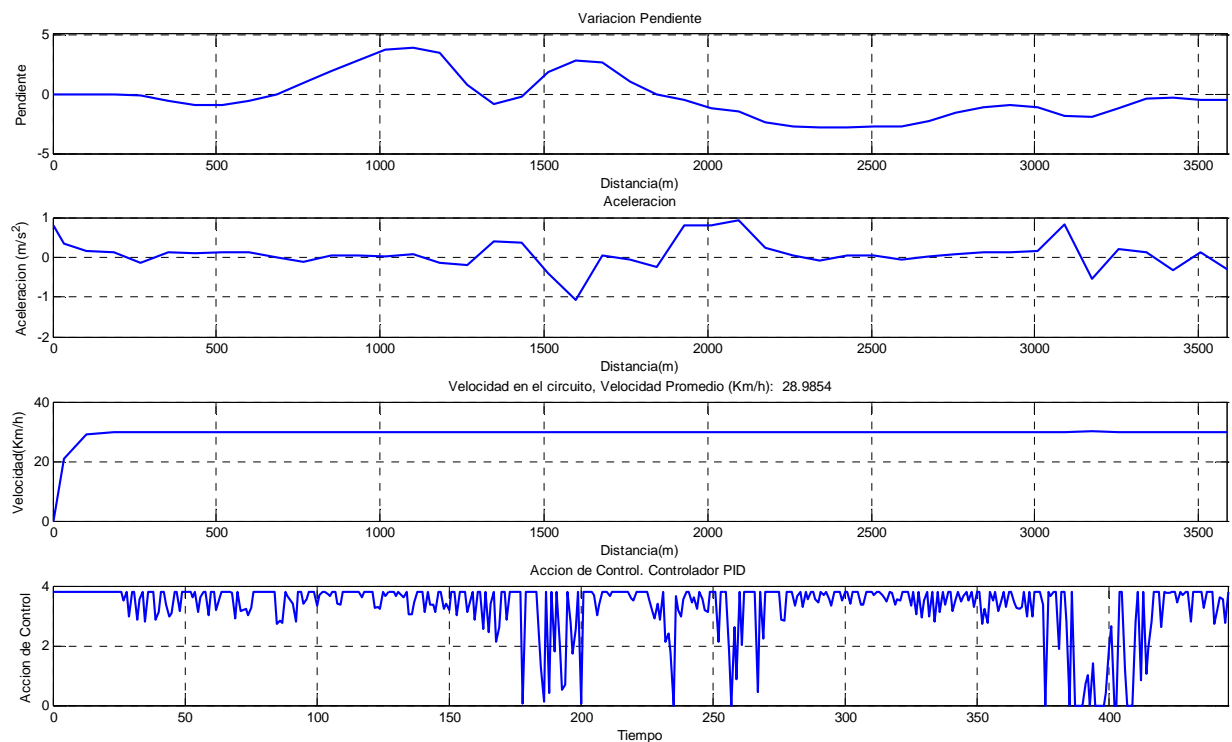
A continuación se mostraran los resultados obtenidos en la simulación para diferentes valores en el controlador; se realizaron las simulaciones con unos valores fijos para la velocidad del vehículo, la velocidad de la corriente de viento y el ángulo de esta, los valores dados son:

- Velocidad vehículo=30 km/h, será la velocidad de referencia para nuestro controlador.
- Velocidad Corriente de Viento=50Km/h
- Ángulo de la corriente de viento=40°

Teniendo estos valores fijos obtuvimos los siguientes resultados:

Para una acción proporcional $K_P = 100$, $K_i = 0$, $K_d = 0$

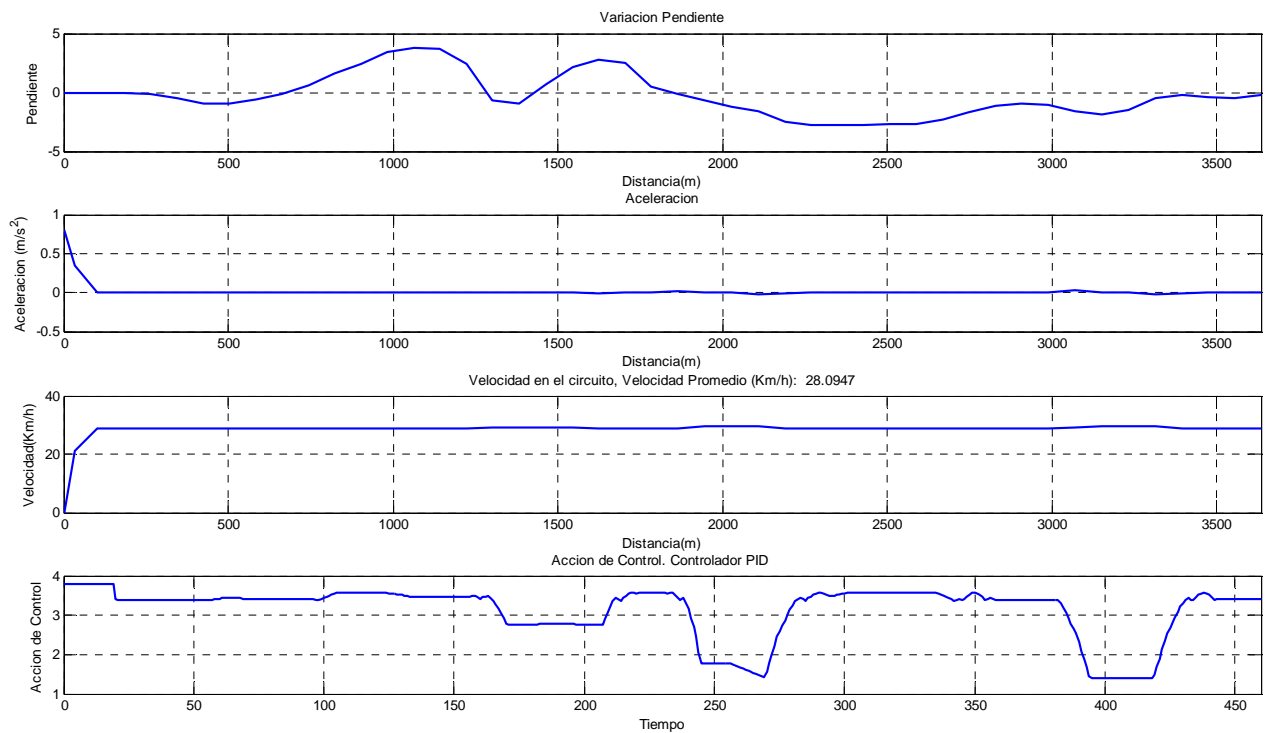
Figura 19 Control Proporcional $K_p=100$



Se ve en las graficas como se mantiene la velocidad estable en un promedio de 28.98 Km/h aunque no alcanzando la referencia de 30Km/h, pero se observa cómo se tiene una acción de control de alta frecuencia lo que no es muy conveniente pues se presentan muchas variaciones en la aceleración.

Si continuamos evaluando el sistema para un control proporcional se verá que la respuesta del sistema es estable pero se continua teniendo un error relativamente grande con respecto a la velocidad deseada como veremos a continuación para una $K_p = 10$, y las otras dos constantes a cero.

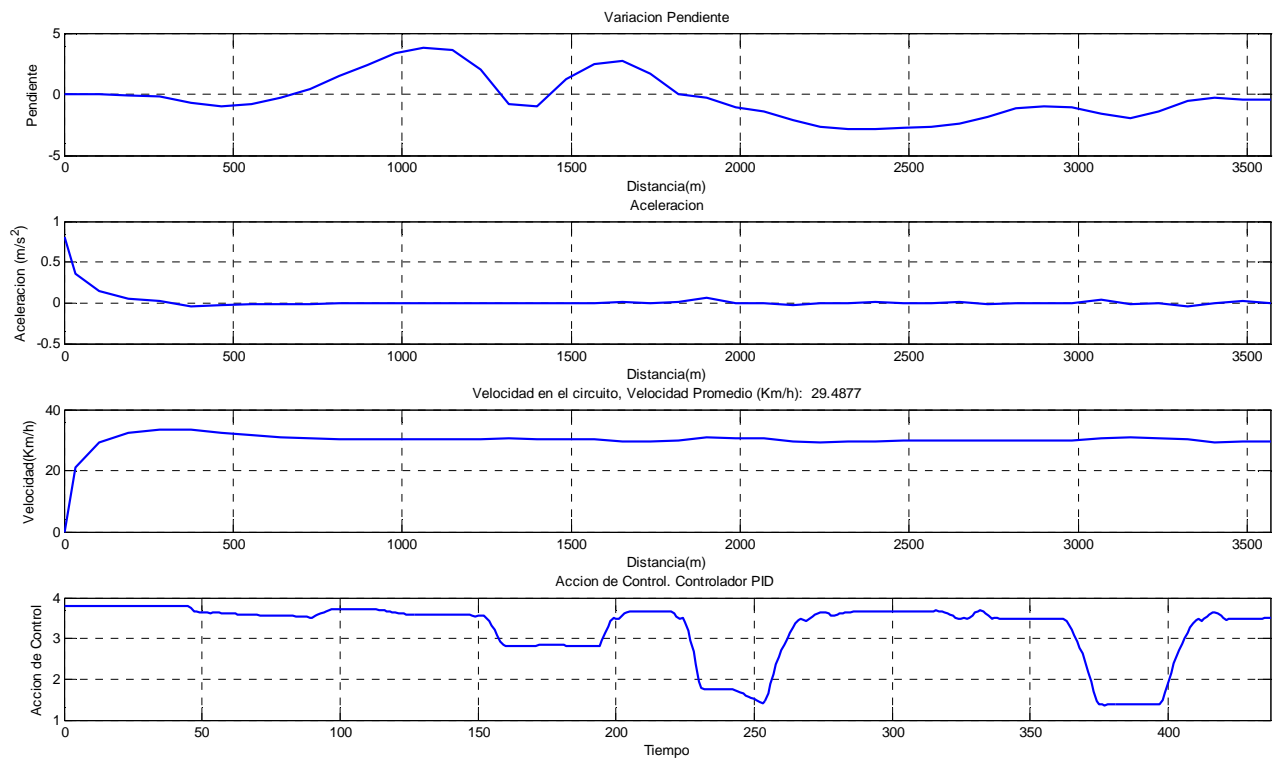
Figura 20 Control Proporcional $K_p=10$



Para los valores anteriormente mencionados para el controlador obtuvimos una velocidad promedio (km/h): 28.09. Entendiendo de esta forma que será necesario variar los valores para las otras dos ganancias del controlador K_i y K_d y así acercarse más a la velocidad de referencia.

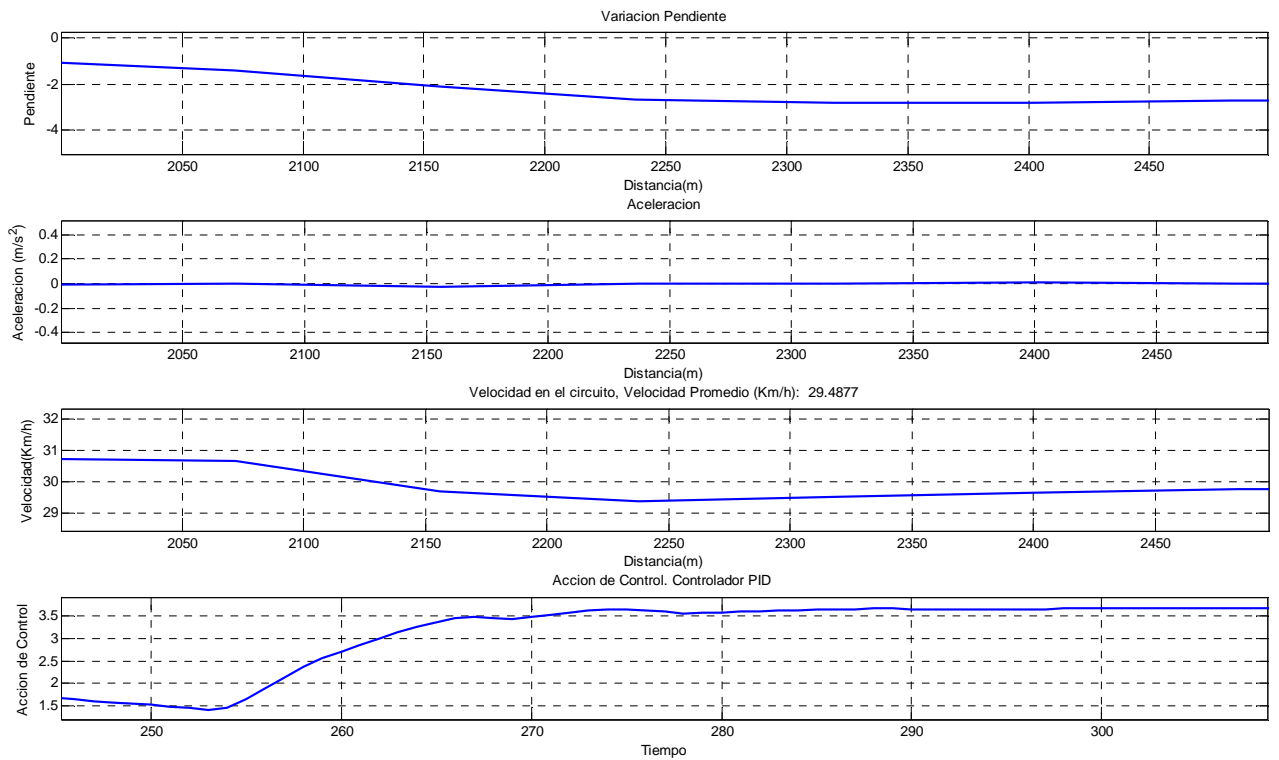
Para $K_p = 2, K_i = 1.5, K_d = 0.6$ se tiene:

Figura 21 Controlador PID



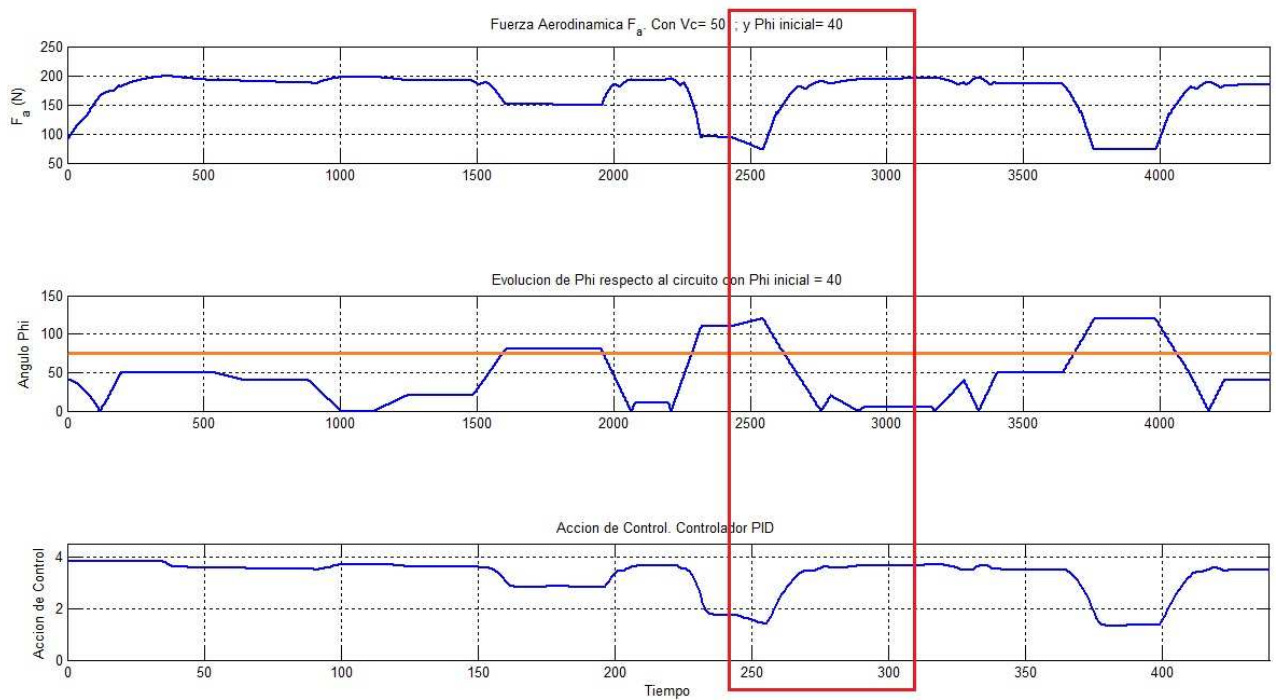
En las simulaciones se observa cómo hay una variación de descenso en la velocidad específicamente entre los 2000 m y 2500 m, generando un aumento en la aplicación de la acción de control, donde comparándola con la grafica de la variación de la pendiente es un descenso por lo cual debería en cambio darse un aumento de la velocidad.

Figura 22 Zoom Zona de variación de velocidad



Continuando con las simulaciones del modelo con el fin de determinar cuáles son las causas para que el vehículo se comporte de esta forma, fue necesario observar la evolución de la fuerza aerodinámica a lo largo del recorrido y analizando los resultados se pudo observar como el ángulo de incidencia de la corriente de viento cambia conforme el vehículo avanza en el circuito, generando un aumento en la fuerza aerodinámica lo que conlleva a la reducción de la velocidad en esa parte del circuito, como se puede observar en la figura.

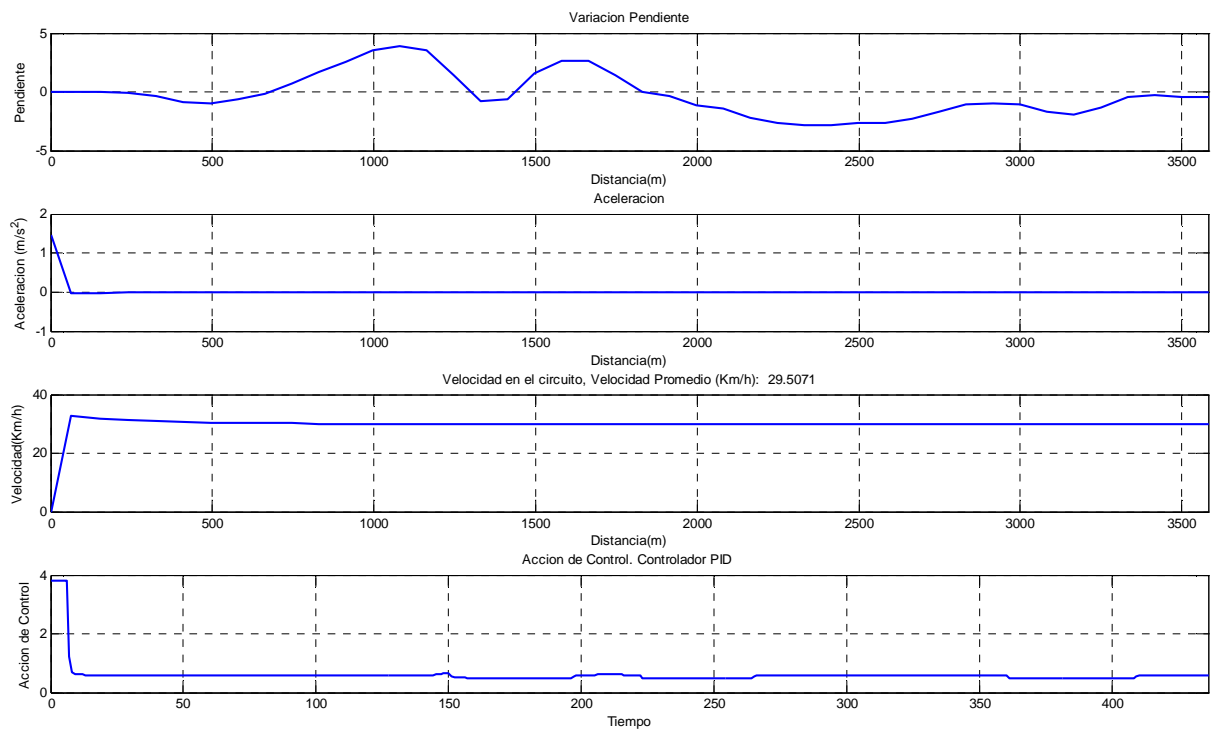
Figura 23 Evolución Fuerza Aerodinámica



Es importante mencionar de igual manera el efecto del ángulo de incidencia de la corriente de viento, como se observa en la grafica de la evolución del ángulo al pasar este de 90° es donde se nota una mayor reducción de la fuerza aerodinámica, debido a que la corriente de viento pasaría a representar una ayuda al avance del vehículo.

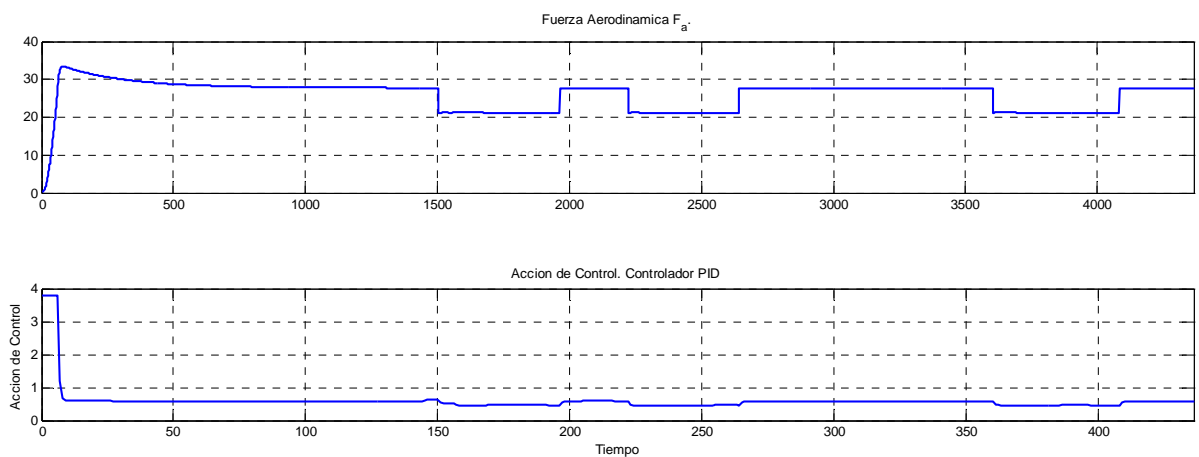
Para la siguiente simulación se determinó que no se encontraba presente corriente de viento, $V_c = 0$, con esta condición se obtuvo los siguientes resultados.

Figura 24 Comportamiento del Sistema sin Vc



Al no presentar corriente de viento la fuerza aerodinámica se reduce considerablemente, lo que conlleva a que el comportamiento del vehículo no se vea afectado durante su recorrido en el circuito.

Figura 25 Fuerza Aerodinámica sin Vc

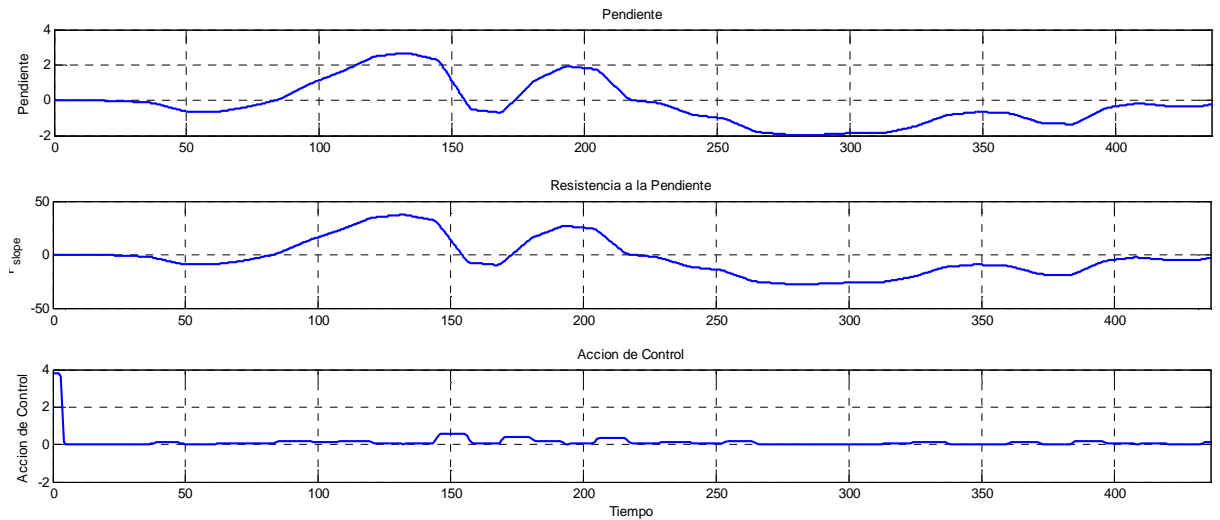


Se realizaron otras simulaciones asumiendo que no existe pendiente en el circuito y no hay resistencia al rozamiento, con las cuales se pudo observar que estas fuerzas son pequeñas, debido al peso del vehículo que es muy liviano y

no afectan significativamente su comportamiento, comparadas con la fuerza aerodinámica, que ha sido el objeto de estudio de este trabajo.

Continuando con las simulaciones se realiza el análisis de la influencia de otra de las fuerzas presentes como la resistencia a la pendiente, esta como única fuerza presente y así determinar el efecto sobre el vehículo.

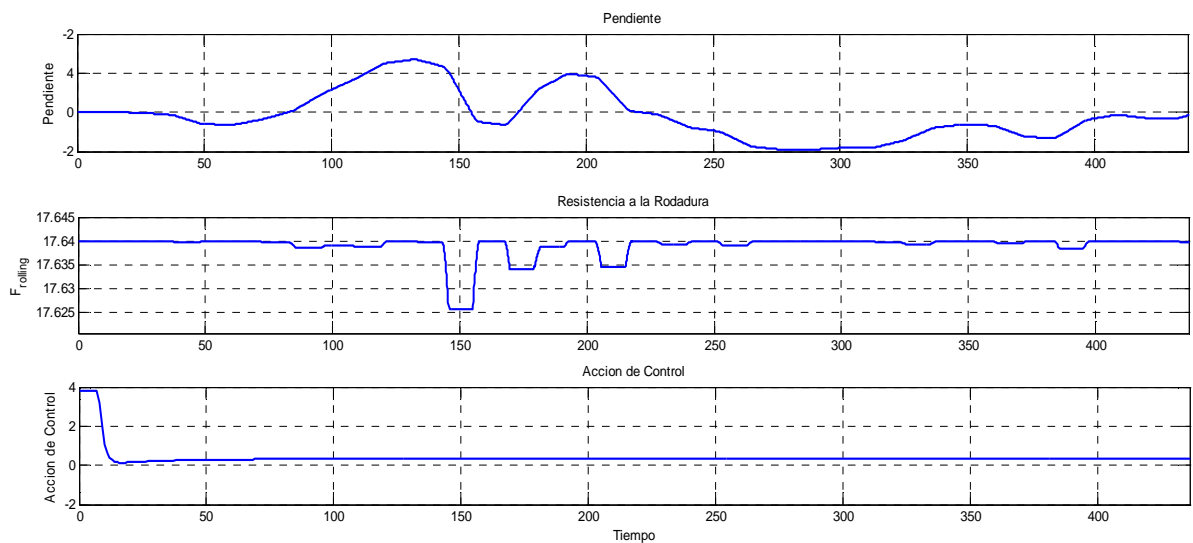
Figura 26 Resistencia a la Pendiente



Se nota como esta fuerza es relativamente pequeña, lo que permite al vehículo por sus características de peso, no ejercer mayores variaciones en la acción de control para completar su recorrido, y en comparación con la fuerza aerodinámica es pequeña.

Por último queda analizar la influencia de la resistencia de rozamiento, esta al igual que la resistencia a la pendiente se analizó como la única fuerza presente.

Figura 27 Resistencia de Rozamiento



De igual forma que se vio en la simulación con la resistencia a la pendiente, la resistencia al rozamiento es muy pequeña y la influencia sobre el desplazamiento del vehículo es muy poca. De esto se observa que la fuerza que más influye en el comportamiento del vehículo durante su recorrido es la fuerza aerodinámica.

De forma adicional se realizaron simulaciones con un control On-Off con histéresis de forma que en el momento que el vehículo sobrepasara la velocidad de referencia en 1Km/h

4. DISEÑO ÓPTIMO DE REGULADORES

El principal problema que se plantea en cualquier método de optimización es definir correctamente la función de coste. Así por ejemplo, para un determinado problema podemos encontrar varias funciones de coste a minimizar o maximizar en función de aquellos aspectos que deseen ser tenidos en cuenta. La función de coste dependerá de un conjunto de parámetros, el objetivo será escoger de entre todos los posibles valores de los parámetros, aquellos que den el valor óptimo de dicha función de coste.

En este caso se pretende ajustar los parámetros del regulador PID, de manera que el sistema se comporte de acuerdo a la referencia especificada, en lugar de modelar matemáticamente el proceso para un exacto diseño del

controlador, se opta por realizar una serie de experimentos de manera que se encuentre la mejor combinación de parámetros del regulador que minimicen la función objetivo.

Se utilizara el método simplex de Nelder – Mead para el auto ajuste del regulador PID.

4.1. MÉTODO SIMPLEX (NELDER - MEAD)

El método Simplex no lineal (Nelder- Mead) es un método heurístico de búsqueda de mínimos de cualquier función N-dimensional. Para ello a partir de un punto inicial estimativo, el método busca en el hiperespacio paramétrico aquellos valores de estos que minimizan la función objetivo. Se basa en fundamentos geométricos; a partir de la estimación inicial, y conocidos el número de parámetros a optimizar, N, el algoritmo construye el poliedro más sencillo en ese hiperespacio paramétrico: el poliedro posee N+1 vértices donde se evalúa la función objetivo y se decide que nuevos valores de los parámetros se ajustarán mejor al objetivo prefijado. Por ejemplo: para ajustar dos parámetros, el algoritmo construye un triángulo, en cuyos vértices se evalúa la función objetivo y según sus valores el poliedro se va moviendo y deformando para buscar el óptimo.

Para el caso del vehículo el índice a optimizar es el consumo de combustible, ya que se busca lograr obtener el mejor rendimiento de este en una competición.

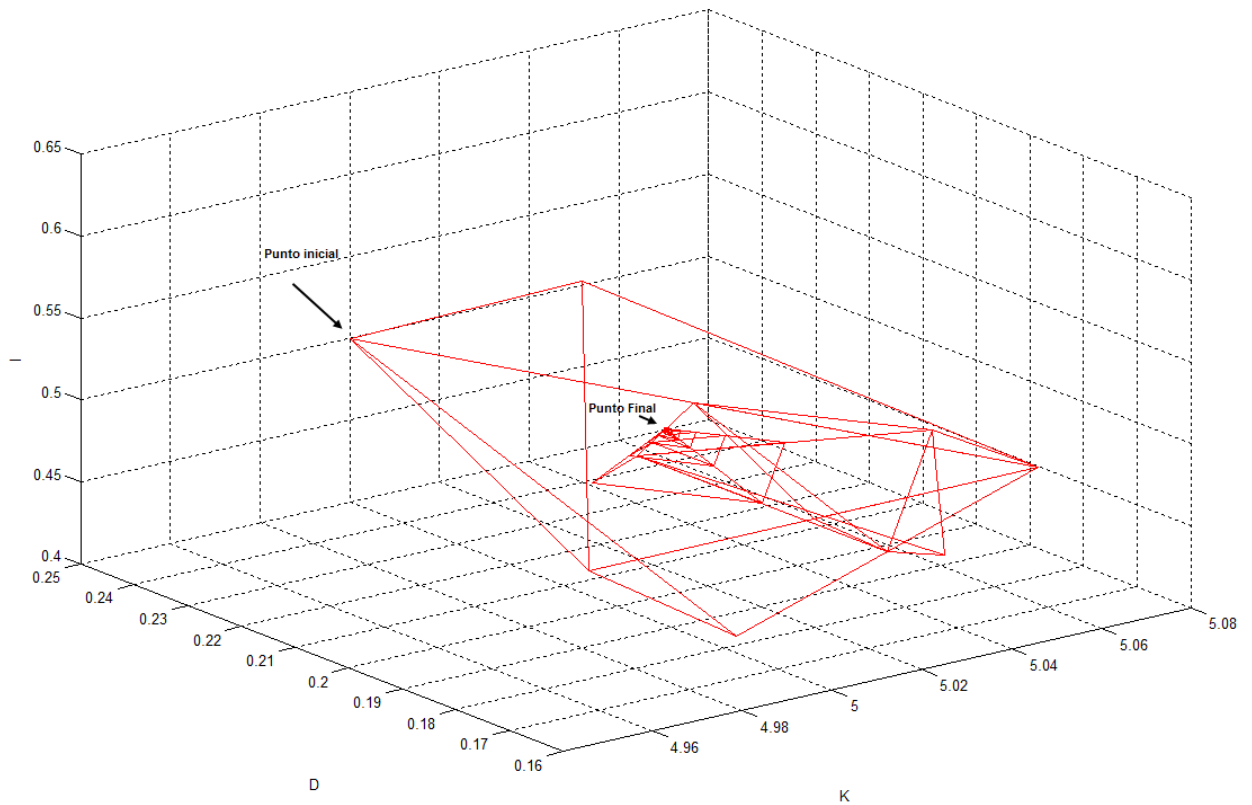
$$J = \min (\text{Consumo}) \quad 32$$

Sujeto a: $K_p > 0, K_i \geq 0, K_d \geq 0$.

El algoritmo desarrollado se muestra en el Anexo 2.

Mediante la siguiente grafica se puede observar la evolución de los parámetros del PID mediante el método simplex.

Figura 28 Evolución parámetros método simplex



Con el fin de tener una comparación y poder ver la utilidad del ajuste de los parámetros del regulador por el método simplex, también se realizó una simulación del vehículo recorriendo el circuito con una estrategia del tipo “stop and go”, usando un control On-Off con histéresis, de forma que en el momento que el vehículo sobrepase cierto valor la velocidad de referencia +1Km/h este dejaría de acelerar y cuando su velocidad estuviese por debajo de -5Km/h con respecto a la referencia incrementaría su aceleración para lograr nuevamente alcanzar la velocidad deseada. De igual forma se tiene de la simulación anterior del PID sin implementar la optimización, el consumo generado.

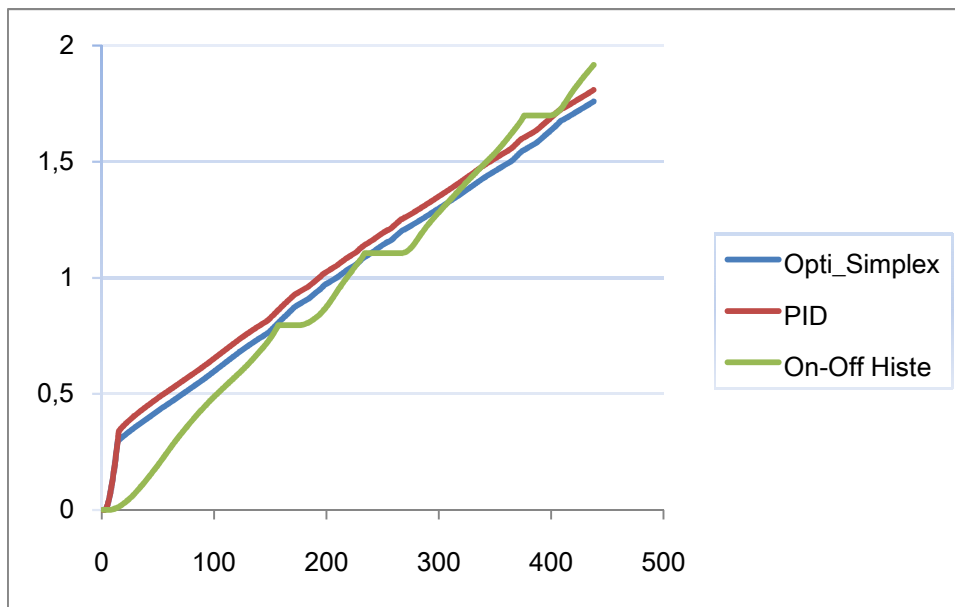
De esta forma tenemos:

Tabla 3 Consumo

| Simulación | H ₂ Consumo (g) | Consumo Equivalente Gasolina (Km/l) |
|-----------------------|----------------------------|-------------------------------------|
| On-Off con Histéresis | 1,916143798 | 2866.662 |
| PID | 1,808602654 | 3037.116 |
| Optimización Simplex | 1,759676930 | 3122.042 |

Se observa que usando el ajuste del controlador con el método simplex se obtuvo una mejora del 8% en el consumo frente al consumo usando la estrategia del controlador on-off con histéresis.

Figura 29 Grafica Consumo



5. CONCLUSIONES

Es fundamental en el diseño de un vehículo consolidar un modelo dinámico que abarque la mayor cantidad de variables posibles, acercándose al comportamiento real, dado que un modelo puede fácilmente ser simulado las veces que sea necesario, aplicando diferentes configuraciones y realizando un recorrido determinado, de esta forma ahorrando tiempo y costos en su estudio.

Se planteo un análisis aerodinámico en el cual se tienen en cuenta corrientes de viento que podían influir en el desempeño de estos vehículos dadas sus características de bajo peso y tamaño, obteniendo resultados importantes dado que los valores de las fuerzas generadas eran altos, en comparación con las demás fuerzas analizadas.

Con el modelo que se diseñó se puede analizar la influencia de las fuerzas en conjunto, pero dada su versatilidad, de ser necesario se puede realizar un análisis por separado de cada una de estas, para ver la influencia que tienen en un recorrido establecido, determinando así las variables que más lo afectan como peso, forma o configuración mecánica y dedicar esfuerzos en encontrar el punto óptimo de estas.

Después de realizar las simulaciones estimadas para el modelo en Matlab, se determinó que estrategia de control es la más adecuada para la conducción del vehículo de acuerdo a los resultados obtenidos.

El ajuste de los parámetros del regulador PID obtenido por el método de minimización simplex ha supuesto un ahorro de consumo de combustible del 8% con respecto a la estrategia de conducción con el control On-Off.

6. TRABAJOS FUTUROS

De la realización de este trabajo se puede tener en cuenta para aplicaciones como la simulación del comportamiento de un submarino, como es el caso que se está desarrollando en el proyecto Divisamos, aportando la posibilidad de evaluar los diferentes factores que lo puedan afectar, como corrientes de agua en diferentes direcciones, su desplazamiento en el agua etc.

Implementar este modelo para los futuros diseños de los vehículos usados por la UPV para la Shell Eco-Marathon.

Realizar la implementación de otro tipo de controladores como puede ser Control predictivo, PID inteligente, como a su vez poder utilizar otros métodos de optimización para mejorar el consumo.

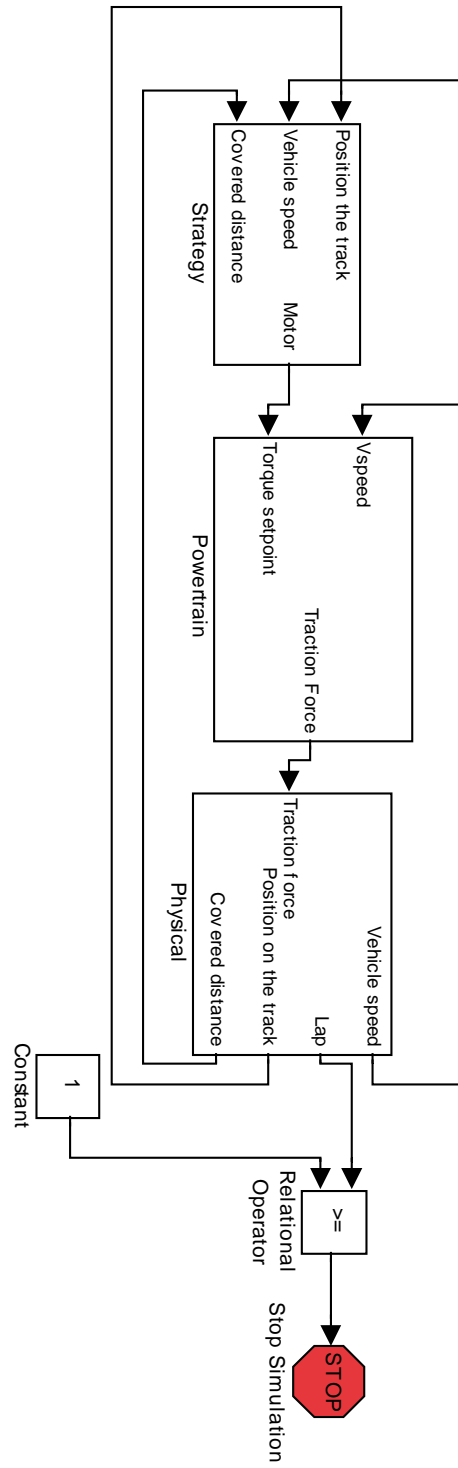
7. REFERENCIAS

- Ogata, Katsuhiko. Ingeniería de Control Moderna. 3ª Edición. Prentice Hall. 1995.
- Tornero M, Josep y Armesto A, Leopoldo. Técnicas de Optimización. Editorial Universidad Politécnica de Valencia. 2007.

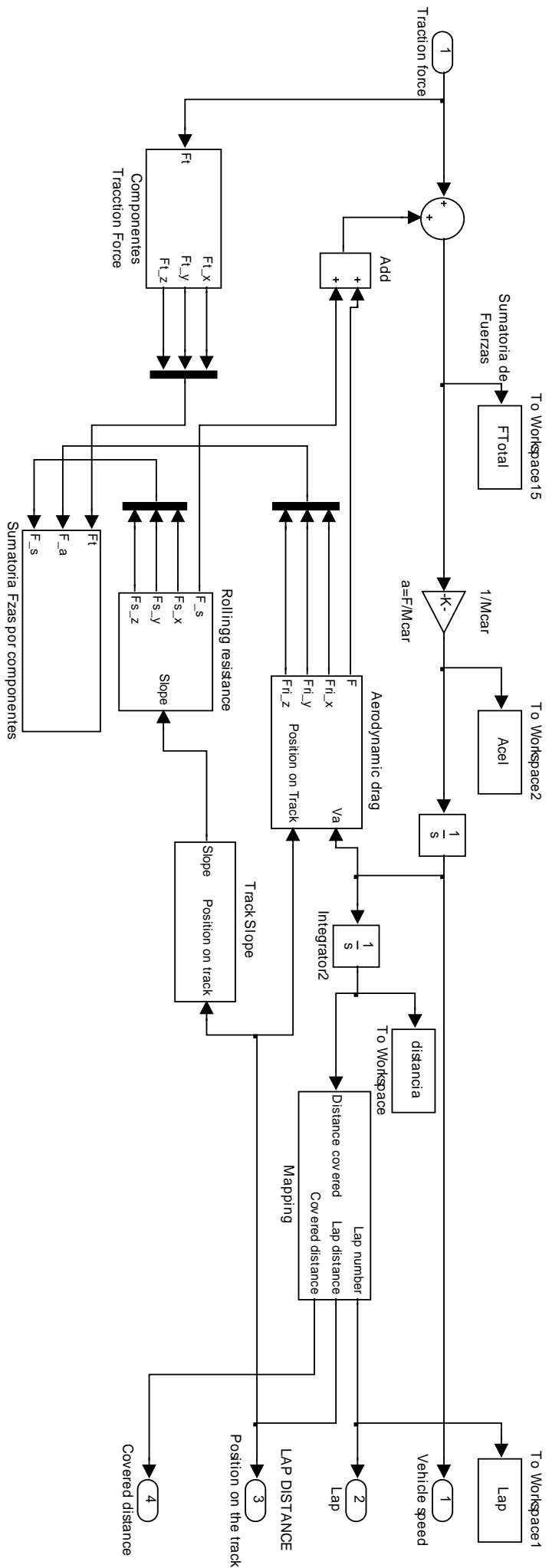
- Aguirre G, Fredy. Tesis de Máster “Análisis Aerodinámico del Vehículo para la competencia Shell Eco-marathon”. Universidad Politécnica de Valencia. 2009.
- González L, Javier. PFC “Modelización Y Simulación Dinámica Del Vehículo Tipo Kartcross Del Laboratorio De Automoción De La Escuela Superior De Ingenieros De San Sebastián”. Universidad de Navarra. 2001.
- Mazaeda, R y De Prada, C. Ajuste Automático de controladores PID. CEA, XXIV Jornadas de Automática. León 2003.
- Sebastián, E y Sotelo, M. A. Control de Trayectoria Pseudo-Dinámico para vehículos subacuáticos. CEA, XXIV Jornadas de Automática. León 2003.
- Villagra, J, Milanés, V, Pérez, J y De Pedro, T. Control basado en PID inteligentes: aplicación al control de cruce de un vehículo de bajas velocidades. Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial. Volumen 7 N° 4. 2010.
- Kunusch, C, Puleston, P. F, Mayosky, M. A, Husar, A. Modelado Dinámico y Validación Experimental de una Pila de Combustible PEM. Congreso Latinoamericano de Control Automático. 2010.
- Babuska, R y Stramigioli, S. Matlab and Simulink for Modeling and Control. Delft University of Technology. 1999.
- Ruiz L, E. y Raffo L, E. Calculo de los coeficientes Aerodinámicos usando Matlab. Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Perú. Revista de la facultad de Ingeniería Industrial, Volumen 8. 2005.
- Shell Eco-marathon. www.shell.com
- Leeson “Electric Motors, Gearmotors and Drives. www.leeson.com
- Hydro2power <http://www.h2planet.eu/esp/>

ANEXO 1. BLOQUES MODELO SIMULINK

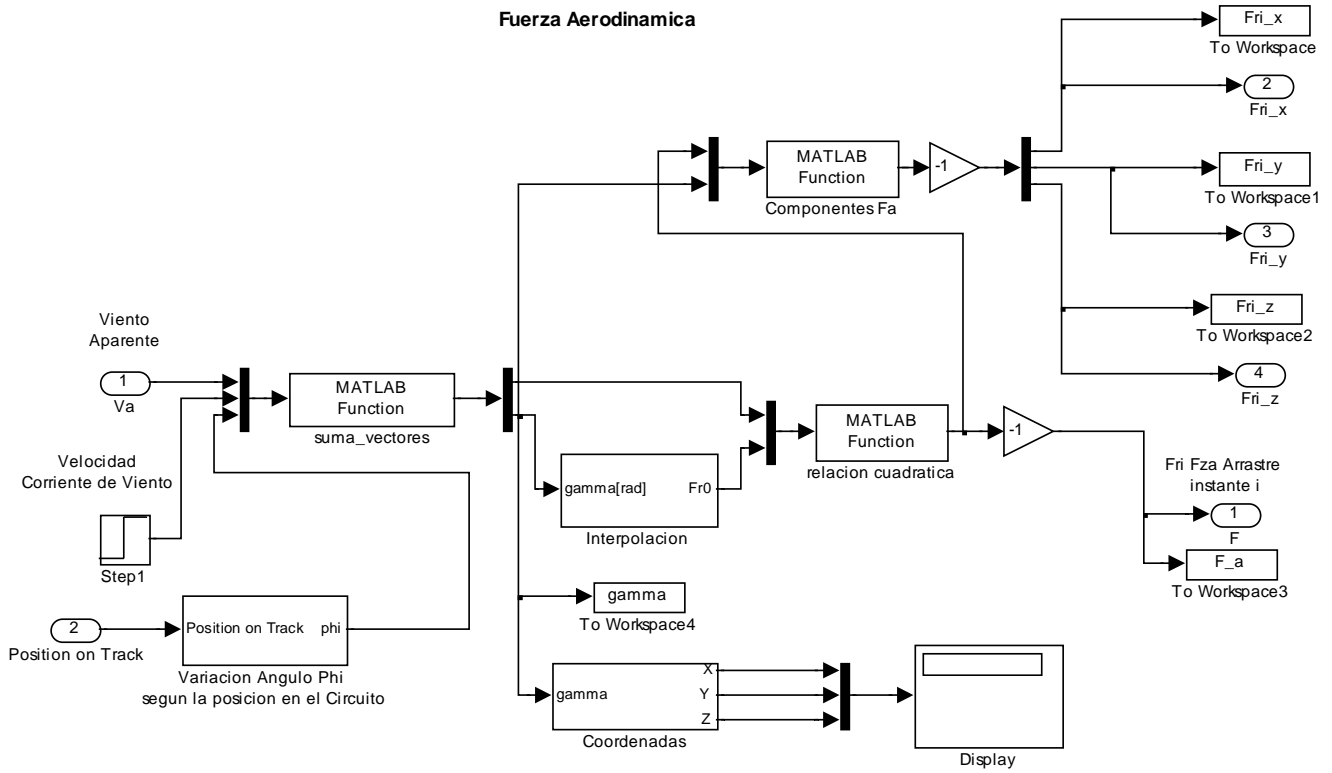
En este anexo se muestra el contenido de cada uno de los bloques de Simulink, con sus subsistemas.



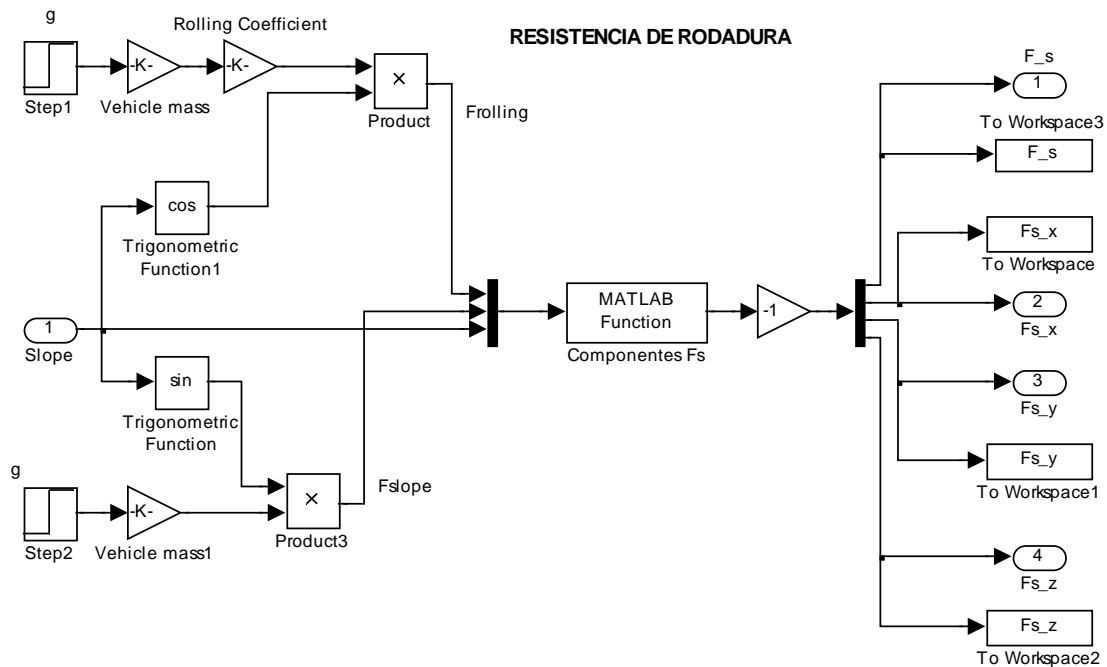
Modelo del vehículo, Bloque principal



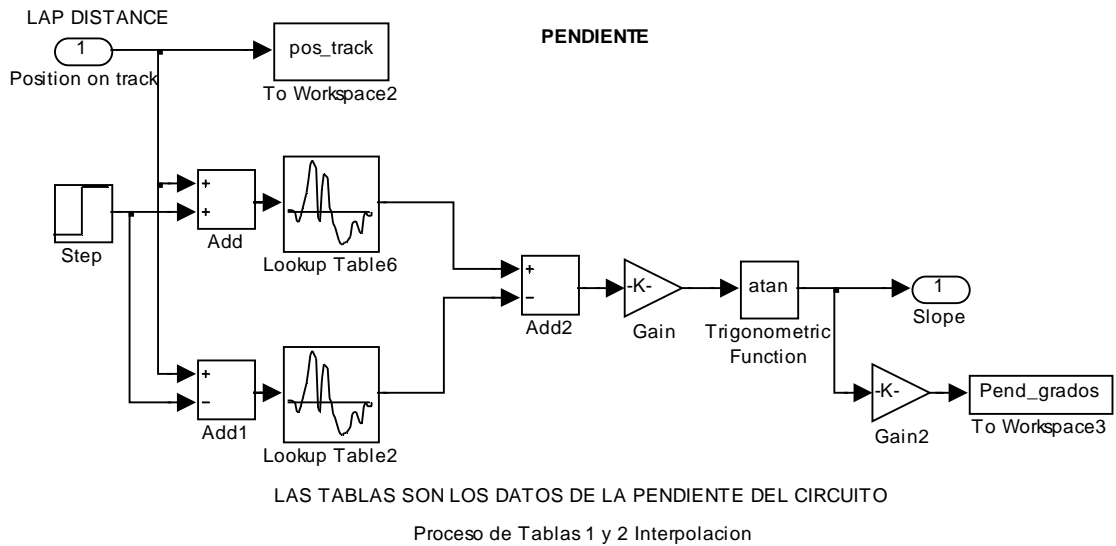
Bloque Physical



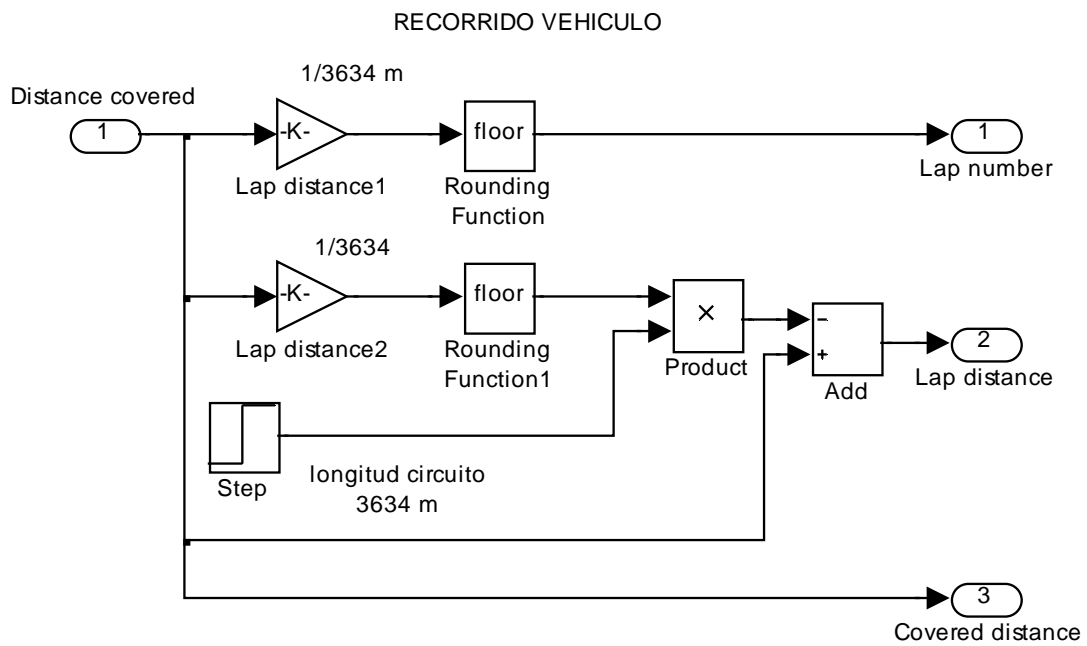
Bloque Physical / Aerodynamic Drag



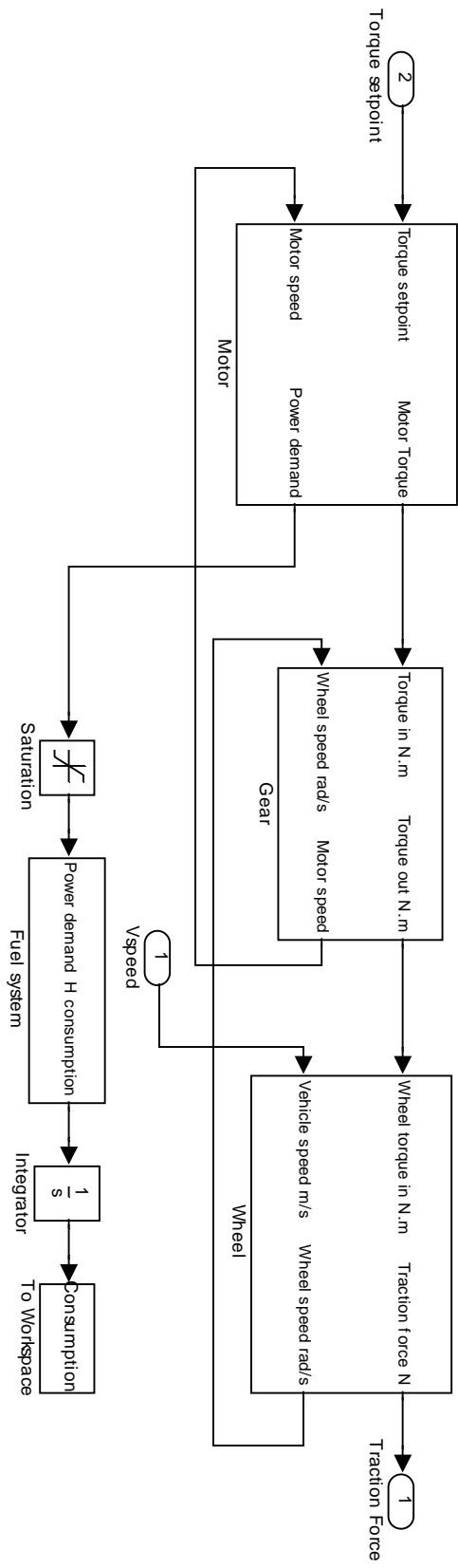
Bloque Physical / Rolling Resistance



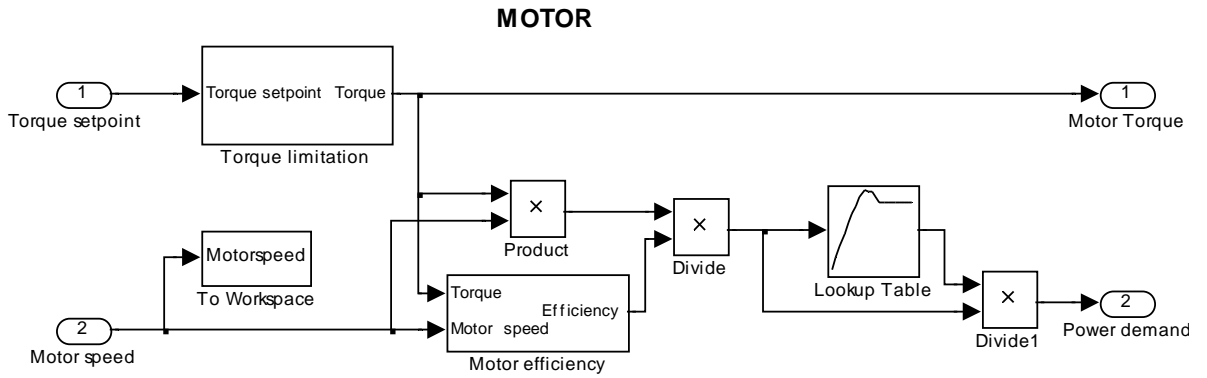
Bloque Physical / Track Slope



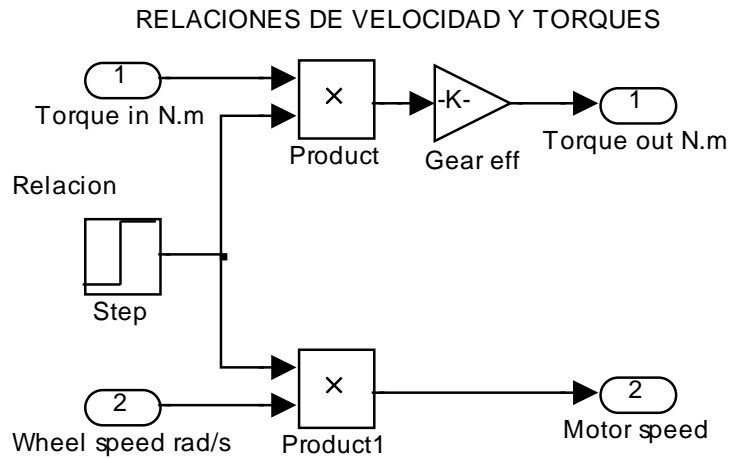
Bloque Physical / Mapping



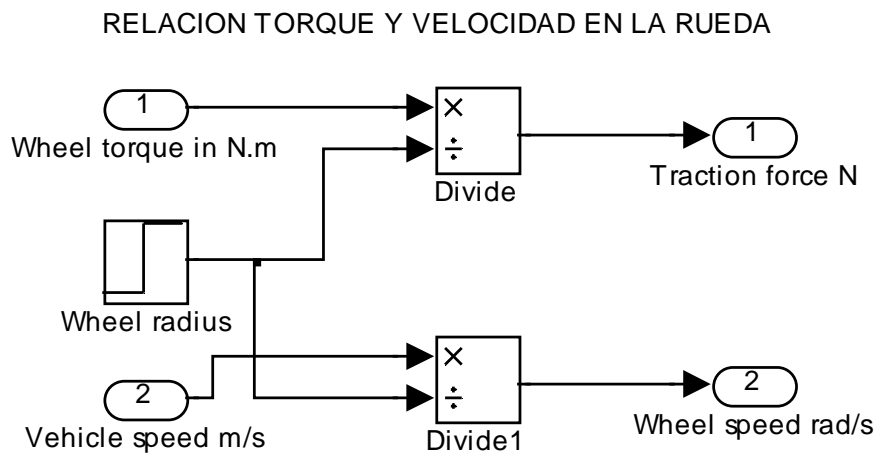
Bloque Powertrain



Bloque Powertrain / Motor

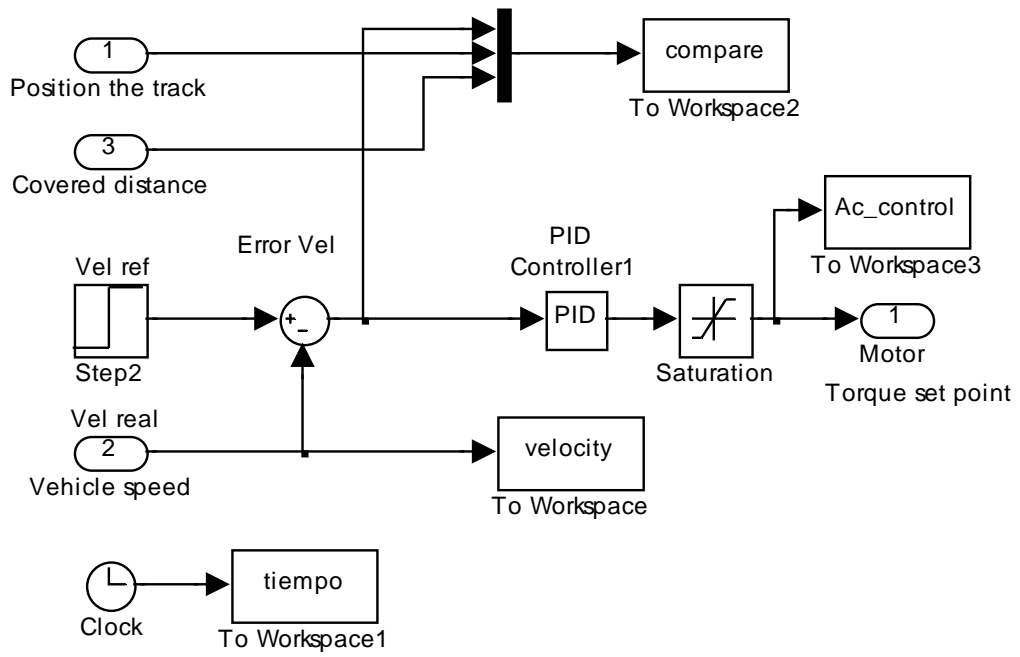


Bloque Powertrain / Gear



Bloque Powertrain / Wheel

Estrategia de Control



Bloque Strategy

ANEXO 2. FICHERO MÉTODO SIMPLEX

Se muestra a continuación el código implementado para la ejecución del ajuste de los parámetros del regulador PID por medio del método simplex.

```
% ***** OPTIMIZACIÓN POR SIMPLEX
*****
%*****
****
% Inicialización de variables internas del proceso de graficación
valor=zeros(1,length(pto_ini));
p_1=zeros(4,3);
p_2=p_1;
p=[];
p(1,:)=pto_ini;
p(2,:)=p(1,:)+factor*[-0.5,-(sqrt(3)/2),0];
p(3,:)=p(1,:)+factor*[0.5,-(sqrt(3)/2),0];
%El siguiente punto es lo que terminará de formar a la pirámide por lo
que
%se cálculo trigonometricamente el punto siguiente
p(4,:)=p(1,:)+[0,-factor*(sqrt(3)/4),(sqrt(factor^2-
((factor*sqrt(3)/4)^2))];
%se inicializa la variable que contara el número de aproximaciones
nIteraciones=0;

%*****
****
% Gráfica de la evolución del ajuste de parámetros
%*****
****

    params=figure; zoom; hold; xlabel('K'); ylabel('D'); zlabel('I');
    title('Evolución de los parámetros del PID al ajustarlos con
Simplex en control simulado');
    set(params,'name',...
        'Evolución de los parámetros del PID al ajustarlos con Simlex en
control simulado',...
        'numbertitle','off');
    view(-37.5,30); grid on;

%*****
% Evaluamos el valor de la función en cada punto inicial de la primera
% aproximación triangular
%*****
% Punto 1
K=p(1,1)*K_escalado; D=p(1,2);
I=p(1,3);sim('vehicle');
x=length(tiempo);
f1=Consumption(x,1);
%*****
***
% Graficación progresiva del control
%*****
%*****
% Punto 2
K=p(2,1)*K_escalado; D=p(2,2);
I=p(2,3); sim('vehicle');
```

```

x=length(tiempo);
f2=Consumption(x,1);
% Punto 3
K=p(3,1)*K_escalado; D=p(3,2);
I=p(3,3); sim('vehicle');
x=length(tiempo);
f3=Consumption(x,1);
% Punto 4
K=p(4,1)*K_escalado; D=p(4,2);
I=p(4,3); sim('vehicle');
x=length(tiempo);
f4=Consumption(x,1);
valor=[f1,f2,f3,f4];
%
*****
***
% Ordenación de puntos iniciales y de sus valores de función,
% Ordenados de menor a mayor valor de función
[ordenados,indice]=sort(valor);
p=[p(indice(1),:);p(indice(2),:);p(indice(3),:);p(indice(4),:)];
valor=ordenados;
% Mientras no alcancemos el número total especificado de iteraciones
% seguimos realizando iteraciones
while nIteraciones<tot_iteraciones
    s=0;
    nIteraciones=nIteraciones+1;
    % Proyectamos el peor de los puntos del triángulo equilátero
    vmedio=mean([p(1,:); p(2,:);p(3,:)]);
    p(4,:)=p(4,)+2*(vmedio-p(4,:));
    % En el caso de que repitamos triángulo reducimos el mismo a la
    mitad
    if p(4,:)==p_2(4,:)
        p(3,:)=0.5*(p(1,)+p(3,:));
        p(2,:)=0.5*(p(1,)+p(2,:));
        p(4,:)=0.5*(p(1,)+p(4,:));
        % Evaluamos la función en el nuevo Punto 2
        K=p(2,1)*K_escalado; D=p(2,2);
        I=p(2,3);sim('vehicle');
        x=length(tiempo);
        valor(2)=Consumption(x,1);
    end
    % Evaluamos la función en el nuevo Punto 3
    K=p(3,1)*K_escalado; D=p(3,2);
    I=p(3,3); sim('vehicle');
    x=length(tiempo);
    valor(3)=Consumption(x,1);
    % Evaluamos la función en el nuevo Punto 4
    K=p(4,1)*K_escalado; D=p(4,2);

    I=p(4,3);
    sim('vehicle');
    x=length(tiempo);
    valor(4)=Consumption(x,1);
    % Ordenación de puntos actuales y de sus valores de función,
    % Ordenados de menor a mayor valor de función
    [ordenados,indice]=sort(valor);
    p=[p(indice(1),:);p(indice(2),:);p(indice(3),:);p(indice(4),:)];
    valor=ordenados;

%*****

```

```

****
% Para graficación progresiva del control
%*****
****
    K=p(1,1)*K_escalado; D=p(1,2);

    I=p(1,3); sim('vehicle');
    % Para graficación ajuste de parámetros
    figure(params);
    %Se agregaron las líneas para formar la piramide

line('xdata',[p(1,1);p(2,1)], 'ydata',[p(1,2);p(2,2)], 'zdata',[p(1,3);p
(2,3)], 'color','green')

line('xdata',[p(2,1);p(3,1)], 'ydata',[p(2,2);p(3,2)], 'zdata',[p(2,3);p
(3,3)], 'color','green')

line('xdata',[p(3,1);p(1,1)], 'ydata',[p(3,2);p(1,2)], 'zdata',[p(3,3);p
(1,3)], 'color','green')

line('xdata',[p(4,1);p(1,1)], 'ydata',[p(4,2);p(1,2)], 'zdata',[p(4,3);p
(1,3)], 'color','green')

line('xdata',[p(4,1);p(2,1)], 'ydata',[p(4,2);p(2,2)], 'zdata',[p(4,3);p
(2,3)], 'color','green')

line('xdata',[p(4,1);p(3,1)], 'ydata',[p(4,2);p(3,2)], 'zdata',[p(4,3);p
(3,3)], 'color','green')
    grid on;

%*****
    % Almacenamos los puntos de hace dos iteraciones (por si se repite
el triángulo)
    p_2=p_1;    p_1=p;
end

% Se separan los últimos valores alcanzados para desplegar en pantalla
además de
% calcular la resolución
pto_opt=p(1,:);valor_opt=valor(1);
precision=sqrt((p(1,1)-p(2,1)-p(3,1))^2+(p(1,2)-p(2,2)-
p(3,2))^2+(p(1,3)-p(2,3)-p(3,3))^2);
% Evaluamos la función en el óptimo obtenido
K=p(1,1)*K_escalado
D=p(1,2)

I=p(1,3)
sim('vehicle');

%% Se procede mostrar los resultados y graficarlos

```