

Trabajo Fin de Grado  
Grado en Ingeniería de las Tecnologías  
Industriales

Control de la dinámica de vehículos eléctricos con  
motores en las ruedas

Autor: Juan Carlos Fraile García

Tutores: Carlos Bordons Alba

Juan José Marquez Quintero

Dpto. de Ingeniería de Sistemas y Automática  
Escuela Técnica Superior de Ingeniería  
Universidad de Sevilla

Sevilla, 2019





Trabajo Fin de Grado  
Grado en Ingeniería de las Tecnologías Industriales

# **Control de la dinámica de vehículos eléctricos con motores en las ruedas**

Autor:

Juan Carlos Fraile García

Tutores:

Carlos Bordons Alba

Catedrático

Juan José Marquez Quintero

Investigador FPI

Dpto. de Ingeniería de Sistemas y Automática

Escuela Técnica Superior de Ingeniería

Universidad de Sevilla

Sevilla, 2019



Trabajo Fin de Grado: Control de la dinámica de vehículos eléctricos con motores en las ruedas

Autor: Juan Carlos Fraile García

Tutor: Carlos Bordons Alba  
Juan José Marquez Quintero

El tribunal nombrado para juzgar el Proyecto arriba indicado, compuesto por los siguientes miembros:

Presidente:

Vocales:

Secretario:

Acuerdan otorgarle la calificación de:

Sevilla, 2019

El Secretario del Tribunal



# Agradecimientos

---

**E**n lo personal, quisiera agradecerle a mis Padres el haber hecho todo lo posible para que pudiera llegar hasta aquí y a mi hermano por enseñarme gran parte de los valores que hoy día me hacen ser quien soy.

En lo profesional, debo agradecerle a mi tutor Carlos Bordons, la posibilidad que me otorgó para que pudiera realizar este proyecto tan relacionado con una de mis mayores pasiones, la automoción.

También estaré infinitamente agradecido con Juan José Márquez por todo el apoyo que nos ha dado durante el desarrollo del proyecto.

En último lugar, dar las gracias a mi compañero Isidro por haberme ayudado tanto con todos los problemas que nos surgían.

*Juan Carlos Fraile García*

*Sevilla, 2019*



# Resumen

---

En los últimos años, las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) han estado produciendo efectos cada vez más severos sobre el clima. Parte de la comunidad científica, afirma que es necesario comenzar a frenar el calentamiento global de inmediato con el fin de evitar consecuencias devastadoras en un futuro no muy lejano. Como segundo mayor contribuyente de emisiones GEI se encuentra el sector del transporte, en especial, el tráfico rodado. Esto, unido a los recientes descubrimientos sobre los efectos perjudiciales del diésel sobre la salud humana, ha desembocado en un creciente desarrollo de la movilidad eléctrica para poner fin a la comercialización de los vehículos de combustión interna.

En términos de seguridad activa, los coches eléctricos poseen una mayor versatilidad, ya que puede actuarse directamente sobre el par de sus motores a diferencia de los vehículos de combustión interna en los que se suele recurrir al sistema de frenos debido a que la actuación sobre el par motor no es tan directa. Además, existen vehículos eléctricos que disponen de un motor por cada rueda que, frente a los que cuentan con un solo motor o uno por cada eje, permiten alcanzar un control más preciso al poder modificar concretamente el par de cada rueda.

En este proyecto se pretende evaluar, comparar y depurar distintos algoritmos para los sistemas de tracción y estabilidad de un vehículo eléctrico con motores en rueda. Para ello, se hará uso del vehículo FOX, un modelo real desarrollado como proyecto de investigación en la Universidad de Sevilla.

Se utilizarán diversas estrategias de control que han sido aplicadas en otros sectores industriales como el control PID o control basado en lógica difusa, haciendo uso de una unidad de control electrónico (ECU), que determinará el voltaje necesario para conseguir el par establecido por el control para cada rueda. Todas las estrategias de control seleccionadas han sido sometidas a pruebas mediante el uso de un simulador, pero no todas han sido implementadas en el modelo real del FOX por lo que será necesario desarrollar el código que permita dicha implementación. En general, casi todas ellas pretenden establecer un control sobre la velocidad angular (para ajustar la trayectoria del vehículo) y sobre el ángulo de deslizamiento (con el fin de evitar el deslizamiento lateral).

Para la realización de las pruebas de conducción se va a desarrollar un software de supervisión (SCADA) que nos permita monitorizar el estado del vehículo (baterías, motores, velocidades, aceleraciones...) y realizar ajustes sobre el sistema de estabilidad y tracción (cambio de estrategia de control, modificación de parámetros y selección de motores sobre los que se actúa)

En las pruebas de conducción se realizarán diferentes maniobras que fuercen situaciones en las que sea necesaria la actuación de los sistemas de tracción y estabilidad. En primer lugar, se hará uso del software de supervisión desarrollado para conseguir ajustar de forma óptima todas las estrategias de control y evaluar su impacto. Tras esto, con los controladores ajustados se realizarán otra batería de pruebas para compararlas entre ellas tanto *in situ* como posteriormente mediante un análisis más exhaustivo de los datos proporcionados por la ECU.

Por último, cabe mencionar que este proyecto ha sido desarrollado junto a Isidro Raya Ramos. Las pruebas realizadas sobre tres de los seis controladores seleccionados son expuestas por él en [16].



# Abstract

---

In recent years, greenhouse gas (GHG) emissions have been producing increasingly severe effects on the climate. Part of the scientific community, affirms that it is necessary to stop global warming immediately in order to avoid devastating consequences in a near future. The second largest producer of GHG emissions is the transport sector, especially road traffic. This added to the recent discoveries about the damaging effects of diesel on human health, has led to an increasing development of electric mobility to end the commercialization of internal combustion vehicles.

In terms of active safety, electric cars have greater versatility, since they can act directly on the torque of their engines, unlike internal combustion vehicles where the braking system is usually used because the action on their torque is not so direct. In addition, there are electric vehicles that have one engine for each wheel that, compared to those with only one engine or one for each axle, allow a more precise control because of the ability to modify the torque of each wheel.

The main objective of this project is to evaluate, compare and debug different algorithms for traction and stability systems of an electric vehicle with motors on their wheels. For this purpose, the FOX vehicle, a real model developed as a research project of the University of Seville, will be used.

Some of the control strategies that are going to be used have been applied in other industrial sectors such as PID control or control based on fuzzy logic. The FOX use an electronic control unit (ECU) to calculate the voltage that is needed to have the torque calculated by the control in each wheel. All the selected control strategies have been tested using a simulator, but not all of them have been implemented in the real FOX model, so it will be necessary to develop the code that allows such implementation. In general, almost all of them intend to establish an angular velocity control (to fix the trajectory of the vehicle) and sliding angle control (in order to avoid lateral sliding).

To carry out the driving tests, a SCADA software will be developed to allow monitoring the vehicle's condition (batteries, motors, speeds, accelerations ...) and make changes in the stability and traction system (change the control strategy, modify their parameters and activate the engines that are going to be used).

In the driving tests, the pilot will force situations in which the action of the traction and stability systems are necessary. Firstly, the SCADA software will be used to optimally set up all the control strategies and evaluate their impact. After this, another set of tests will be carried out in which the different strategies will be used switching between them. This will allow us to compare them both *in situ* and later through a more exhaustive analysis of the data provided by the ECU.

Finally, it is worth mentioning that this project has been developed with Isidro Raya Ramos. The tests carried out on three of the six selected controllers are analysed by him in [16].

# Índice

---

<b>Agradecimientos</b>	<b>7</b>
<b>Resumen</b>	<b>9</b>
<b>Abstract</b>	<b>11</b>
<b>Índice</b>	<b>12</b>
<b>Índice de Figuras</b>	<b>14</b>
<b>Índice de Tablas</b>	<b>17</b>
<b>Notación</b>	<b>17</b>
<b>1 Introducción</b>	<b>1</b>
1.1 <i>Motivación del proyecto</i>	1
1.2 <i>Objetivos</i>	3
<b>2 Estado del arte</b>	<b>5</b>
2.1 <i>Introducción a la dinámica de vehículos. Conceptos básicos</i>	5
2.1.1 Tracción	5
2.1.2 Ángulos de orientación	5
2.1.3 Deslizamiento	5
2.1.4 Subviraje y sobreviraje	7
2.2 <i>Sistemas de control de tracción y estabilidad</i>	7
2.2.1 Sistemas de Control de Estabilidad	7
2.2.2 Sistemas de Control de Tracción	8
2.2.3 Sistemas de control por vectorización del par.	9
2.3 <i>Estrategias de control aplicadas a los sistemas de estabilidad y tracción en vehículos eléctricos</i>	9
2.3.1 Características generales	9
2.3.2 Control basado en Lógica Difusa (Fuzzy Logic)	10
2.3.3 Control Proporcional con dos modos de operación	13
2.3.4 Control basado en MPC	15
2.3.5 Controlador de velocidad angular y deslizamiento empleando ganancias, enfocado a competición.	17
2.3.6 Control PI de estabilidad	19
2.3.7 Control PI con sistema de control de tracción	20
<b>3 Vehículo fox</b>	<b>23</b>
3.1 <i>Introducción al vehículo FOX</i>	23
3.2 <i>Arquitectura</i>	24
3.2.1 Motores	24
3.2.2 Sistema de frenado	24
3.2.3 Baterías	24
3.2.4 ECU (Engine Control Unit)	24

3.2.5	Supervisor	25
3.2.6	IMU (Inertial Measurement Unit)	25
3.2.7	Otros sensores	25
3.2.8	Comunicación	26
<b>4</b>	<b>Supervisor</b>	<b>27</b>
4.1	<i>Objetivos</i>	27
4.1.1	Monitorización de datos	27
4.1.2	Ajuste y evaluación de la estrategia de control de tracción y estabilidad	28
4.2	<i>Estructura interna del Supervisor</i>	29
4.2.1	Lectura de datos	29
4.2.2	Programa Principal	32
4.3	<i>La Interfaz. Estructura externa del Supervisor</i>	36
<b>5</b>	<b>Pruebas</b>	<b>41</b>
5.1	<i>Descripción de las pruebas a realizar</i>	41
5.1.1	Maniobra de doble cambio de carril. ISO 3888-2	42
5.1.2	Prueba SKIDPAD de Formula Student	42
5.1.3	Problemática con el control del deslizamiento lateral	43
5.2	<i>Pruebas sin control de estabilidad y tracción</i>	44
5.2.1	Prueba SKIDPAD	44
5.2.2	Maniobra de doble cambio de carril	47
5.3	<i>Control basado en Lógica Difusa.</i>	49
5.3.1	Implementación del controlador	49
5.3.2	Prueba SKIDPAD	53
5.3.3	Maniobra de doble cambio de carril	58
5.4	<i>Control Proporcional con dos modos de operación.</i>	61
5.4.1	Implementación del controlador.	61
5.4.2	Prueba SKIDPAD	64
5.4.3	Maniobra de doble cambio de carril	70
5.5	<i>Control PI de estabilidad, sin aplicación de capa control de tracción.</i>	73
5.5.1	Implementación del controlador.	73
5.5.2	Prueba SKIDPAD	74
5.5.3	Maniobra de doble cambio de carril	78
<b>6</b>	<b>Conclusiones y trabajo futuro</b>	<b>83</b>
6.1	<i>Conclusiones. Análisis comparativo de las diferentes estrategias de control</i>	83
6.2	<i>Trabajo futuro</i>	86
	<b>REFERENCIAS</b>	<b>87</b>

# ÍNDICE DE FIGURAS

---

Figura 1-1:Fenómenos meteorológicos extremos en Europa.[1]	1
Figura 1-2: Emisiones GEI Mundiales por sectores económicos (en MtCO <sub>2</sub> equivalentes).[2]	2
Figura 2-1: Ángulos de orientación <sup>1</sup>	5
Figura 2-2: Subviraje (Izquierda) y Sobreviraje (Derecha)	7
Figura 2-3: Comparación maniobra de emergencia con ESP vs sin ESP	8
Figura 2-4: Sistema de frenado de emergencia con lógica tradicional	10
Figura 2-5: Sistema de frenado de emergencia con lógica difusa <sup>6</sup>	10
Figura 2-6: Estrategia de control de estabilidad basada en Fuzzy Logic	11
Figura 2-7: Funciones de pertenencia para el error del ángulo de deslizamiento.	12
Figura 2-8: Estrategia de control proporcional con dos modos de operación	14
Figura 2-9: Esquema de activación-desactivación de los modos de operación.[5]	14
Figura 2-10: Control basado en MPC	15
Figura 2-11: Funcionamiento MPC Discreto	16
Figura 2-12:Coeficiente de rozamiento (Eje Y) frente a deslizamiento (Eje X) [13]	18
Figura 2-13:Ciclo de histéresis	18
Figura 2-14: Control PI. Diagrama de bloques	19
Figura 2-15: Control PI con sistema de control de tracción. Diagrama de bloques	20
Figura 3-1: Vehículo FOX	23
Figura 3-2: Detalle chasis tubular	23
Figura 3-3: Motor sin rueda (izquierda) y con rueda montada (derecha)	24
Figura 3-4: Potenciómetro lineal en amortiguación	25
Figura 3-5: Esquema Comunicaciones FOX [15]	26
Figura 4-1: Diagrama de archivos y sus conexiones en el proyecto de LabVIEW	29
Figura 4-2: Archivo <i>FOX_READ</i>	30
Figura 4-3:Paso 1 <i>FOX_RXTRADUCTOR</i>	31
Figura 4-4: Paso 2 <i>FOX_RXTRADUCTOR</i>	31
Figura 4-5: Estructuras secuenciales en LABVIEW	32
Figura 4-6: Diagrama de flujo de <i>FOX_SUPERVISOR</i> .	32
Figura 4-7: Inicialización del clúster de datos global. <i>FOX_SUPERVISOR</i>	32
Figura 4-8: Inicialización y configuración del USBCAN. <i>FOX_SUPERVISOR</i> .	33

Figura 4-9: Bucle Principal. Lectura de datos.	34
Figura 4-10: Envío Primario. Bucle Principal	34
Figura 4-11: Envío Secundario. Bucle Principal	35
Figura 4-12: Parte de la fase de representación. Bucle Principal	35
Figura 4-13: Bloque <i>EXIT LABVIEW</i> .	36
Figura 4-14: Pestañas por defecto para el cambio de ventana activa.	36
Figura 4-15: Programación (parte) para la conmutación de ventanas (Arriba). Botones en la interfaz (Abajo)	36
Figura 4-16: Ventana FOX. (Valores iniciales)	37
Figura 4-17: Ventana BMS. Barras en verde: Tensión celdas. Barras en rojo: Temperatura celdas	37
Figura 4-18: Ventana MOT. (General). Las otras ventanas solo contienen el resto de indicadores.	38
Figura 4-19: Ventana ERR. Cada indicador de error tiene asociado una leyenda para su interpretación.	38
Figura 4-20: Ventana CAN.	39
Figura 4-21: Ventana ESC. (Controlador Ganancias Activo)	39
Figura 5-1: Pista de pruebas disponible	41
Figura 5-2: Maniobra de doble cambio de carril.	42
Figura 5-3: Disposición oficial de la prueba SKIDPAD.	43
Figura 5-4: Trayectoria SKIDPAD sin control	44
Figura 5-5: Velocidad lineal. SKIDPAD sin control	45
Figura 5-6: Ángulo del volante. SKIDPAD sin control	45
Figura 5-7: Yaw rate. SKIDPAD sin control	46
Figura 5-8: Aceleración transversal. SKIDPAD sin control	46
Figura 5-9: Trayectoria maniobra de doble cambio de carril. Sin control	47
Figura 5-10: Velocidad lineal. Maniobra de doble cambio de carril sin control.	47
Figura 5-11: Yaw rate. Maniobra de doble cambio de carril sin control.	48
Figura 5-12: Aceleración transversal. Maniobra de doble cambio de carril sin control.	48
Figura 5-13: Giro del volante. Maniobra de doble cambio de carril sin control.	49
Figura 5-14: Trayectoria SKIDPAD. Control basado en lógica difusa.	53
Figura 5-15: Velocidad lineal. SKIDPAD con control basado en lógica difusa	53
Figura 5-16: Ángulo del volante. SKIDPAD con control basado en lógica difusa	54
Figura 5-17: Yaw rate. SKIDPAD con control basado en lógica difusa	54
Figura 5-18: Aceleración transversal. SKIDPAD con control basado en lógica difusa	55
Figura 5-19: Pares sobre la rueda DI. SKIDPAD con control basado en lógica difusa	56
Figura 5-20: Pares sobre la rueda DD. SKIDPAD con control basado en lógica difusa	56
Figura 5-21: Pares sobre la rueda TI. SKIDPAD con control basado en lógica difusa	57
Figura 5-22: Pares sobre la rueda TD. SKIDPAD con control basado en lógica difusa	57
Figura 5-23: Trayectoria. Maniobra de doble cambio de carril con control basado en lógica difusa.	58
Figura 5-24: Velocidad lineal. Maniobra de doble cambio de carril con control basado en lógica difusa.	58
Figura 5-25: Giro del volante. Maniobra de doble cambio de carril con control basado en lógica difusa.	59

Figura 5-26: Yaw rate. Maniobra de doble cambio de carril con control basado en lógica difusa.	59
Figura 5-27: Aceleración transversal. Maniobra de doble cambio de carril con control basado en lógica difusa.	60
Figura 5-28: Pares aplicados sobre cada rueda. Maniobra de doble cambio de carril con control basado en lógica difusa.	60
Figura 5-29: Trayectoria. SKIDPAD con control proporcional.	65
Figura 5-30: Velocidad lineal. SKIDPAD con control proporcional	65
Figura 5-31: Giro del volante. SKIDPAD con control proporcional.	66
Figura 5-32: Yaw rate. SKIDPAD con control proporcional.	66
Figura 5-33: Control Activo. SKIDPAD con control proporcional.	67
Figura 5-34: Aceleración transversal. SKIDPAD con control proporcional	67
Figura 5-35: Pares sobre la rueda DI. SKIDPAD con control proporcional	68
Figura 5-36: Pares sobre la rueda DD SKIDPAD con control proporcional	68
Figura 5-37: Pares sobre la rueda TI SKIDPAD con control proporcional	69
Figura 5-38: Pares sobre la rueda TD SKIDPAD con control proporcional	69
Figura 5-39: Trayectoria. Maniobra de doble cambio de carril con control proporcional.	70
Figura 5-40: Velocidad lineal. Maniobra de doble cambio de carril con control proporcional.	70
Figura 5-41: Giro del volante. Maniobra de doble cambio de carril con control proporcional.	71
Figura 5-42: Yaw rate. Maniobra de doble cambio de carril con control proporcional.	71
Figura 5-43: Control activo. Maniobra de doble cambio de carril con control proporcional.	72
Figura 5-44: Aceleración transversal. Maniobra de doble cambio de carril con control proporcional.	72
Figura 5-45: Pares aplicados sobre cada rueda. Maniobra de doble cambio de carril con control proporcional.	73
Figura 5-46: Trayectoria SKIDPAD. Control PI de estabilidad	74
Figura 5-47: Velocidad lineal. SKIDPAD con control PI de estabilidad	74
Figura 5-48: Ángulo del volante. SKIDPAD con control PI de estabilidad	75
Figura 5-49: Yaw rate. SKIDPAD con control basado en lógica difusa	75
Figura 5-50: Aceleración transversal. SKIDPAD con control PI de estabilidad.	76
Figura 5-51: Pares aplicado sobre la rueda DI. SKIDPAD con control PI de estabilidad	76
Figura 5-52: Pares aplicado sobre la rueda DD. SKIDPAD con control PI de estabilidad	77
Figura 5-53: Pares aplicado sobre la rueda TI. SKIDPAD con control PI de estabilidad	77
Figura 5-54 Pares aplicado sobre la rueda TD. SKIDPAD con control PI de estabilidad	78
Figura 5-55: Trayectoria. Maniobra de doble cambio de carril con control PI	78
Figura 5-56: Velocidad lineal. Maniobra de doble cambio de carril con control PI	79
Figura 5-57: Giro del volante. Maniobra de doble cambio de carril con control proporcional.	79
Figura 5-58: Yaw rate. Maniobra de doble cambio de carril con control PI	80
Figura 5-59: Aceleración transversal. Maniobra de doble cambio de carril con control PI	80
Figura 5-60: Pares aplicados sobre cada rueda. Maniobra de doble cambio de carril con control PI.	81
Figura 6-1: Comparativa del control en velocidad angular de las distintas estrategias. Prueba SKIDPAD	84
Figura 6-2: Comparativa del control en velocidad angular de las distintas estrategias. MOOSE Test	85

# ÍNDICE DE TABLAS

---

Tabla 2-1: Conjuntos de pertenencia	12
Tabla 4-1: Información del estado general del coche	28
Tabla 4-2: Información específica del coche	28
Tabla 5-1: Parámetros ajustados del controlador basado en lógica difusa	52
Tabla 5-2: Parámetros ajustados del controlador proporcional con dos modos de operación.	64
Tabla 5-3: Parámetros ajustados del controlador PI de estabilidad.	73
Tabla 6-1: Resumen errores presentados por cada controlador en cada prueba.	85

## Notación

---

GEI.....	Gases de Efecto Invernadero
OMS.....	Organización Mundial de la Salud
ECU.....	Unidad de Control Electrónico
IMU.....	Unidad de Medición Inercial
$\beta$ .....	Ángulo de deslizamiento del vehículo
ISE.....	Integral del error cuadrático



# 1 INTRODUCCIÓN

## 1.1 Motivación del proyecto

En la actualidad, fenómenos meteorológicos tan extremos como la ola de frío que se dio en Estados Unidos el pasado mes de enero, en la que se alcanzaron récords de temperatura de hasta los  $-50^{\circ}\text{C}$  obligando a algunos norteamericanos a permanecer en sus casas por riesgos de congelación, o la ola de calor extrema que arrasó Australia donde los termómetros alcanzaron los  $50^{\circ}\text{C}$  provocando la muerte de animales y el daño de infraestructuras, son alguno de los fenómenos que hacen cada vez más latente la realidad del cambio climático. Según un estudio de EASAC (European academies Science Advisory Council) estos violentos fenómenos meteorológicos no han dejado de incrementar desde 1980.

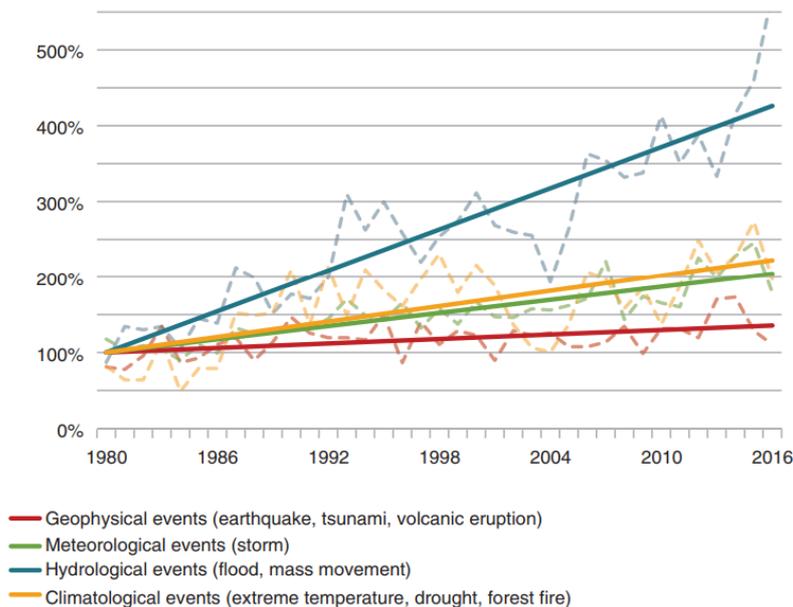


Figura 1-1: Fenómenos meteorológicos extremos en Europa.[1]

Dichos fenómenos han despertado la preocupación de muchos ciudadanos, desembocando incluso en movimientos activistas como el gestado por la joven Greta Thunberg: "*Fridays for the future*", que ha animado a jóvenes de todo el mundo a manifestarse para exigir a gobiernos, empresas y organizaciones medidas reales y efectivas para frenar el calentamiento de la Tierra.

La causa de este cambio climático, cada vez más presente, no es otra que el calentamiento global del planeta producido principalmente, por la emisión y acumulación de gases de efecto invernadero (GEI) en la atmósfera, produciendo un aumento de la temperatura media global. Los principales contribuyentes son el Dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), el metano ( $\text{CH}_4$ ) y el Óxido Nitroso ( $\text{N}_2\text{O}$ ). Por sectores económicos, el sector del transporte se sitúa como segundo productor mundial de GEI (15%) sobrepasado solo por la producción de energía eléctrica y térmica (31%). Además, la mayor parte de las emisiones producidas por el sector del transporte provienen del tráfico rodado.

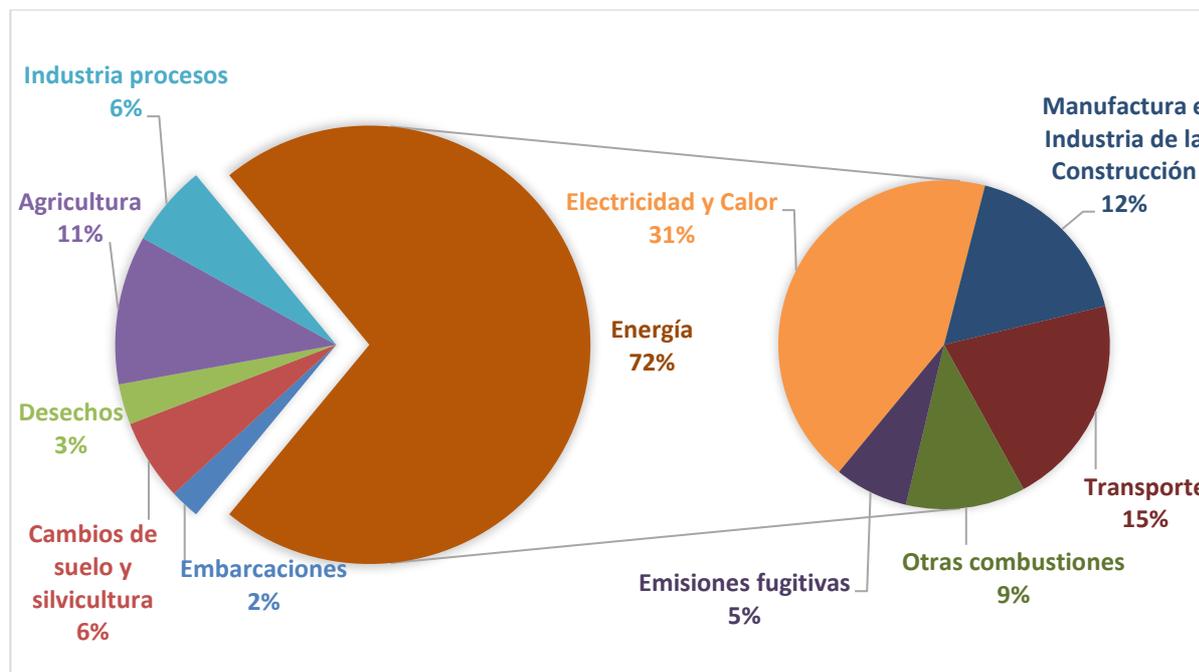


Figura 1-2: Emisiones GEI Mundiales por sectores económicos (en MtCO<sub>2</sub> equivalentes).[2]

Además de suponer un impacto negativo para el medio ambiente, los GEI provocan efectos perjudiciales sobre nuestra salud. Aunque la migración de la gasolina al diésel en los motores de combustión interna, fue pensada como una evolución positiva por la reducción de emisiones de algunos gases contaminantes como el CO<sub>2</sub>, se ha demostrado recientemente que los motores diésel emiten una mayor cantidad de NO<sub>2</sub> y partículas microscópicas. Para estos contaminantes no existe un nivel seguro de exposición, mientras mayor sean sus concentraciones peores serán las consecuencias para la salud humana. Recientemente la OMS los reclasificó como cancerígenos.

En cualquier caso, los efectos negativos sobre el medio ambiente y sobre la salud humana que las emisiones de los coches de gasolina y diésel generan, han llevado a países y empresas automovilísticas a ponerles fecha de caducidad a la producción y comercialización de los mismos, dando paso al desarrollo de la movilidad eléctrica.

El origen de los coches eléctricos se remonta a principios del siglo XX. Eso sí, para aquel entonces la autonomía conseguida con las baterías de níquel o plomo y su escasa velocidad no lo situaron como un rival para los coches que montaban motores de gasolina. A día de hoy, las autonomías de los coches eléctricos han aumentado significativamente gracias a la aparición de las baterías de litio que, respecto a sus predecesoras son más estables, con una mayor vida útil, una mayor capacidad y un menor peso.

La reducción del coste y la mejora del rendimiento de las baterías empleadas ha favorecido el desarrollo de la movilidad eléctrica. Según la Agencia Internacional de Energía, en 2017 se alcanzó la cifra de 3 millones de vehículos eléctricos matriculados en todo el mundo.

En términos de seguridad, los motores eléctricos suponen una ventaja para los elementos de seguridad activa del vehículo tales como el control de estabilidad y tracción. Al poder actuar directamente sobre el par entregado por los motores, sin tener que depender tanto del sistema de frenos, se amplía el abanico de posibilidades para la implantación de estrategias de control orientadas a mejorar estos sistemas de tracción y estabilidad. Además, los sistemas de control de estabilidad y tracción son dos de los sistemas de seguridad de un vehículo que más accidentes evita junto con el cinturón de seguridad, el ABS y el sistema de frenada de emergencia. De lo anterior se deduce la importancia de mejorar dichos sistemas mediante la optimización de las estrategias de control ya existentes o el desarrollo de otras nuevas.

## 1.2 Objetivos

Antes de nada, cabe mencionar que este proyecto ha sido desarrollado en colaboración con Isidro Raya Ramos de forma que este documento debe ser complementado con el que ha sido elaborado por el mismo [16] para alcanzar una visión global y completa de dicho proyecto.

Con el presente proyecto, se pretende evaluar, comparar y depurar, en la medida de lo posible, distintos algoritmos para los sistemas de tracción y estabilidad del Vehículo FOX, proyecto de investigación desarrollado en la Universidad de Sevilla.

En primer lugar, se revisarán las distintas estrategias de control que han sido implementadas con anterioridad en el FOX, con el objetivo de seleccionar aquellas que resulten adecuadas para nuestro estudio. Al mismo tiempo, se revisará el estado del vehículo (sensores, software, comunicaciones...) por si fuese necesario realizar algún ajuste.

Para la evaluación y comparación de las distintas estrategias, será necesario reconstruir el Supervisor (SCADA) del que dispone el FOX. El primer objetivo de esto es proporcionar al copiloto todos los datos necesarios para realizar una ligera evaluación del control de tracción y estabilidad en tiempo real.

El segundo objetivo es el de facilitar al copiloto la interacción con la unidad de control electrónico (ECU), que se encarga de implementar los controles de tracción y estabilidad. Con esto, se pretende que el copiloto tenga la capacidad para decidir en cada momento que motores activar, que estrategia de control seleccionar, así como el ajuste de los parámetros más relevantes de las mismas para sacarles el máximo partido.

Se realizarán unas pruebas preliminares para evaluar la implementación de los distintos controladores con el objetivo de comprobar si necesitan alguna modificación (a nivel de programación) para así, reproducir lo más fielmente posible las estrategias de control planteadas.

Con las versiones definitivas de los controladores mencionados anteriormente, se procederá a someter a cada uno de ellos a diferentes maniobras que fueren situaciones en las que sea necesaria su actuación para corregir la estabilidad del vehículo y/o evitar la pérdida de tracción de las ruedas. Con esto se pretende ajustar *in situ*, los parámetros más relevantes de cada uno de los controladores de forma que consigan sacarle el máximo partido al mismo.

Por último, con todas las estrategias de control optimizadas por igual, se realizarán una batería de pruebas que permitan comparar *in situ* la acción de cada uno de los controladores ante diferentes maniobras y situaciones que, como en las pruebas anteriores, tiendan a provocar situaciones de inestabilidad y/o pérdida de adherencia en los neumáticos. Para concluir correctamente la comparación, se hará uso de los registros de datos de dichas pruebas para realizar un análisis comparativo más exhaustivo.



## 2 ESTADO DEL ARTE

### 2.1 Introducción a la dinámica de vehículos. Conceptos básicos

Como punto de partida, se ha considerado oportuno introducir al lector los conceptos más básicos relacionados con la dinámica del vehículo con el objetivo de conseguir una mejor comprensión de los temas expuestos a continuación.

#### 2.1.1 Tracción

La tracción puede ser definida como:

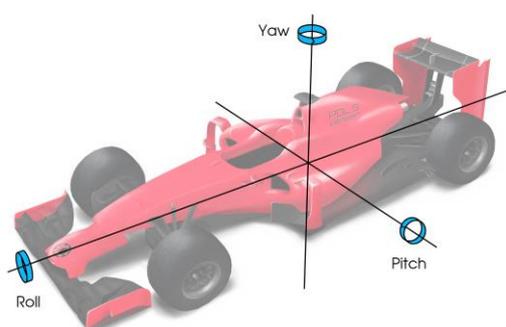
*“un proceso físico en el que una fuerza tangencial se transmite a través de una superficie existente entre dos cuerpos a través de fricción seca o una película de fluido intermedia que resulta en movimiento, detención o transmisión de energía.” [3]*

Para generar la tracción en los vehículos, se hace uso del par que genera el/los motor/es sobre las ruedas. Ese par supone una fuerza en dirección paralela a la superficie de apoyo del vehículo y en el sentido de movimiento del mismo. Como consecuencia de esa fuerza aparece otra en la misma dirección, pero sentido opuesto: La fuerza de fricción o rozamiento. La fuerza de rozamiento de cada rueda dependerá de la proporción del peso total del vehículo que recaiga sobre cada una y del coeficiente de rozamiento de la rueda con el terreno.

Mientras que la fuerza que ejerza el motor sobre la rueda sea menor que la fuerza de rozamiento, la rueda acelerará. Es decir, existirá una fuerza resultante de las aplicadas sobre la rueda que se traducirá en la fuerza que tracciona o empuja al vehículo visto desde el suelo.

#### 2.1.2 Ángulos de orientación

La orientación del vehículo puede ser determinada en todo momento mediante la utilización de los ángulos de Euler: Roll, Pitch, Yaw. Tal como se puede apreciar en la Figura 2-1<sup>1</sup>:



-Roll: Mide la orientación con respecto al eje longitudinal del vehículo.

-Pitch: Mide la orientación con respecto al eje transversal.

-Yaw: Mide la orientación con respecto al eje perpendicular a la superficie del terreno.

El Yaw es el que mayor información nos proporciona acerca de la trayectoria del vehículo por lo que será el que se utilice en las estrategias de control que se expondrán más adelante.

Figura 2-1: Ángulos de orientación<sup>1</sup>

#### 2.1.3 Deslizamiento

El deslizamiento es el movimiento relativo que se produce entre los neumáticos del vehículo y la superficie del

<sup>1</sup> <https://soymotor.com/articulos/la-f1-tu-alcance-asi-funciona-el-fric-96064> Consultado en marzo de 2019

terreno sobre las que se desplaza. Podemos distinguir entre deslizamiento longitudinal y deslizamiento lateral.

### 2.1.3.1 Deslizamiento longitudinal

El deslizamiento longitudinal podría definirse como:

$$\text{Deslizamiento} = \frac{\omega r - v}{v} \quad (2.1)$$

Siendo  $v$  la velocidad lineal de la rueda,  $\omega$  la velocidad angular de la rueda y  $r$  el radio de la misma.

Un deslizamiento positivo implica que la rueda está girando, pero, mientras mayor sea el valor del deslizamiento menor es la proporción de la energía transmitida por el motor a las ruedas usadas para traccionar el coche. En el caso extremo, deslizamiento= $\infty$ , la rueda giraría, pero sin provocar el avance del vehículo ( $v=0$ ).

Un deslizamiento negativo está relacionado con el derrape del vehículo. En el caso extremo, deslizamiento= $-1$ , se corresponde con un bloqueo de las ruedas ( $\omega=0$ ) mientras el coche sigue avanzando ( $v \neq 0$ ).

### 2.1.3.2 Deslizamiento lateral

Es el movimiento lateral del neumático respecto a la superficie del terreno que se produce cuando la fuerza lateral aplicada sobre el neumático es mayor que su resistencia a la fricción. Este deslizamiento puede ser cuantificado con el denominado **Ángulo de Deslizamiento** o **Sideslip**:

$$\beta = \tan^{-1} \left( \frac{V_y}{V_x} \right) \quad (2.2)$$

Siendo  $V_x$  la velocidad longitudinal y  $V_y$  la velocidad lateral.

Mientras mayor sea el Ángulo de Deslizamiento mayor serán las fuerzas laterales que se aplican sobre el neumático. Por esto, es importante que dicho ángulo se mantenga por debajo de unos umbrales, o de lo contrario, podrían provocar el vuelco del vehículo.

### 2.1.4 Subviraje y sobreviraje

El subviraje y el sobreviraje son las dos situaciones indeseadas que se pueden producir cuando un vehículo está tomando una curva o realizando cualquier otra maniobra de giro.

-**Subviraje:** Fenómeno que se produce durante un giro en el que el eje delantero gira más que el eje trasero provocando que el coche gire menos de lo que se pretende. Es decir, el vehículo presentará menor velocidad angular (Yaw-rate) de la deseada.

-**Sobreviraje:** Fenómeno que se produce durante un giro en el que el eje trasero gira más que el eje delantero provocando que el coche gire más de lo que se pretende. Es decir, el vehículo presentará mayor velocidad angular (Yaw-rate) de la deseada.

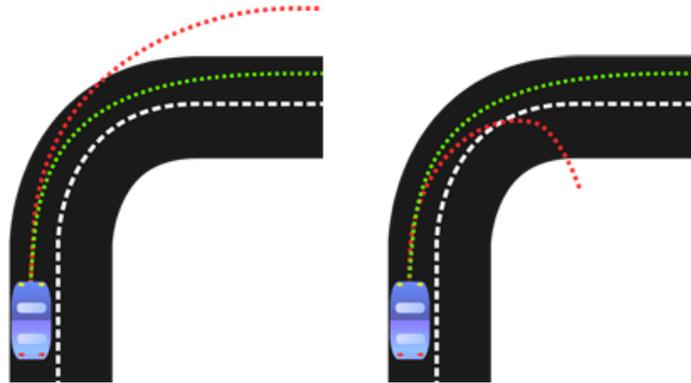


Figura 2-2: Subviraje (Izquierda) y Sobreviraje (Derecha) <sup>2</sup>

## 2.2 Sistemas de control de tracción y estabilidad

### 2.2.1 Sistemas de Control de Estabilidad

El control de estabilidad es un elemento de seguridad activa de un vehículo cuya finalidad es la de comparar la trayectoria real que está siguiendo el vehículo con la dirección marcada por el conductor mediante el volante. Es por tanto un sistema que actúa eliminando o disminuyendo lo máximo posible, las pérdidas de control direccional del vehículo, evitando que se traduzcan en derrapes (causados por un **sobreviraje** o **subviraje**) durante el trazado de curvas, la realización de giros o maniobras de emergencia.

En el mercado automovilístico este sistema es designado mediante distintas siglas que dependen del fabricante: ESP, ESC, DSC, VDC, VSA o VSC son algunas de ellas.

Este sistema se apoya principalmente en una unidad de control electrónico (ECU) y en un conjunto de sensores que permiten determinar si el vehículo está respondiendo correctamente a la trayectoria comandada por el conductor. Cuando tiene que hacerlo, el control de estabilidad puede actuar sobre los frenos proporcionando una frenada selectiva de las ruedas mediante un grupo hidráulico que regula la presión de frenado de cada rueda. También se puede conseguir el mismo efecto **modificando el par motor**.

<sup>2</sup> Den Hieperboree. Disponible en: <http://commons.wikimedia.org/wiki/Image:Understeer.svg> (Licencia Creative Commons)

Smurrayinchestet. Disponible en: <http://commons.wikimedia.org/wiki/Image:Oversteer.svg> (Licencia Creative Commons). Consultado marzo 2019

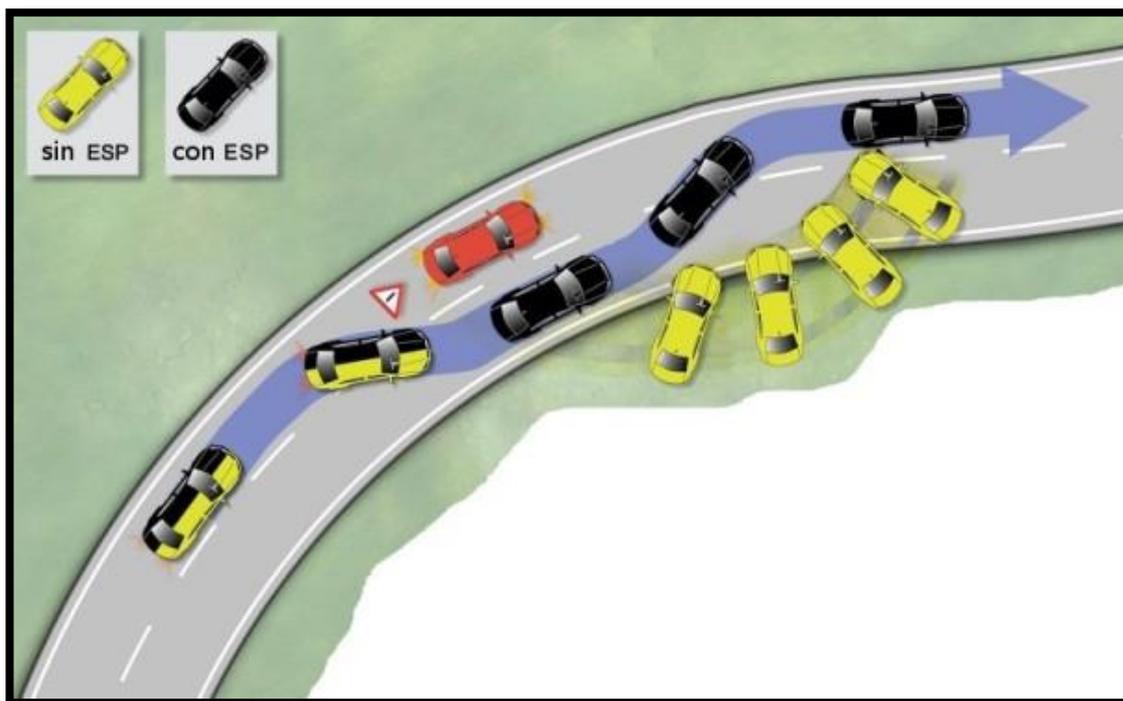


Figura 2-3: Comparación maniobra de emergencia con ESP vs sin ESP<sup>3</sup>

Cualquier vehículo dotado de un control de estabilidad, por lo general, dispone de un Sistema Antibloqueo de Frenos (ABS) y de un Sistema de Control de Tracción (ASR). El ABS le permite realizar las frenadas selectivas y obtener información para determinar la situación actual del vehículo a través de los sensores que este sistema incorpora. El ASR evitará que la corrección de la trayectoria del vehículo desemboque en una pérdida de tracción.

### 2.2.2 Sistemas de Control de Tracción

El objetivo principal de un sistema de control de tracción (también conocido por sus siglas: ASR, EDS o TCS, entre otras) es prevenir la pérdida de adherencia de las ruedas, de tal forma que estas patinen. Esto se produce cuando la fuerza transmitida por el motor a las ruedas es superior a la fuerza de rozamiento existente entre éstas y el suelo. Una reducción del contacto neumático-suelo por la presencia de una película líquida, una aceleración brusca o una frenada repentina son casos que pueden provocar esa pérdida de adherencia. Por eso, el ASR destaca su utilidad en el trazado de curvas cerradas, en las salidas (aceleración desde reposo) sobre suelos deslizantes (por lluvia o nieve, por ejemplo) o en frenadas de emergencia.

Para recuperar la adherencia entre el suelo y las ruedas que patinen, los ASR convencionales se sirven de los sensores del ABS y actúan sobre el motor y/o el sistema de frenos<sup>4</sup>. Normalmente estos sistemas en primer lugar, intentan recuperar la adherencia mediante el frenado de la rueda que patina, generando un efecto similar al de un diferencial autoblocante<sup>5</sup>. Si la acción del freno no es suficiente, el sistema pasa a reducir la potencia transmitida a las ruedas (en automóviles con motores térmicos esto se puede conseguir mediante la reducción o supresión de la inyección de combustible y/o la reducción o supresión de la chispa que se genera en uno o más cilindros del mismo).

<sup>3</sup> <http://www.racesimonline.com/articulos/ESP.php> consultado en Marzo de 2019

<sup>4</sup> Por regla general, las siglas ASR hacen referencia a controles de tracción que utilizan técnicas basadas en la reducción del par motor. Por el contrario, las siglas EDS se refieren a aquellos controles de tracción que utilizan el sistema de frenos para cumplir la misma función. A pesar de todo lo anterior, hoy día ya existen sistemas que combinan ambas estrategias de actuación.

<sup>5</sup> Un **diferencial autoblocante** es un diferencial que permite una diferencia de giro máxima (hasta un cierto porcentaje) entre las ruedas. Por encima de ese porcentaje, anula el propio efecto diferencial entre las ruedas.

En la actualidad, ESP, ABS y ASR son complementados por algunas tecnologías que mejoran la asistencia en conducción. Algunas de estas son: El control de arranque en pendiente, control adaptativo de la carga o el sistema de mantenimiento de carril.

### 2.2.3 Sistemas de control por vectorización del par.

La vectorización del Par o TVC (Torque Vectoring Control) es una estrategia de distribución del par motor entre los ejes delantero y trasero o entre cada una de las ruedas (cuando se dispone de motores In-Wheel, como los equipados en el FOX). En coches de combustión interna este reparto lo consiguen generalmente, mediante el uso de diferenciales electrónicos o un sistema de frenos. Por otro lado, en los vehículos eléctricos el TVC puede ser implementado mediante la modificación directa del par aplicado a los motores.

Esta estrategia de reparto de par permite la implementación de sistemas de control de estabilidad y tracción más flexibles, que suponen una mejora significativa frente a los sistemas convencionales utilizados en vehículos de combustión interna que dependen en mayor medida del sistema de frenos.

## 2.3 Estrategias de control aplicadas a los sistemas de estabilidad y tracción en vehículos eléctricos

A lo largo del desarrollo del *Proyecto FOX*, se han estudiado e implementado diversas estrategias destinadas a cumplir las funciones propias de los sistemas de control de tracción y estabilidad del mismo. Por lo tanto, son controladores pensados principalmente, para vehículos eléctricos equipados con motores en las ruedas.

### 2.3.1 Características generales

Todos los controladores que se expondrán a continuación, presentan una serie de características comunes:

- Es imprescindible que el controlador no sea muy agresivo, para que se note lo menos posible la actuación del mismo. De lo contrario, provocaría al conductor una sensación de inseguridad por no tener pleno control sobre el vehículo.
- Controlan la velocidad angular en el eje perpendicular al suelo (**Yaw-rate**) para que la trayectoria descrita por el coche coincida lo máximo posible con la deseada por el conductor.
- Controlan que el ángulo de deslizamiento del vehículo sea lo más próximo a 0° para evitar el deslizamiento lateral. (excepto las estrategias 2.3.6 y 2.3.7)
- A efectos de tracción, la mayoría de ellos (a excepción de la estrategia 2.3.6) incluyen una capa cuyo objetivo es minimizar el deslizamiento o pérdida de agarre de las ruedas. Para ello utilizan la técnica propuesta por Dejun Yin, Sehoon Oh, y Yoichi Hori [4], llamada **MTTE** (*Maximum Transmissible Torque Estimation*), o Estimación del Par Máximo Transmisible.

El **MTTE** se basa en estimar cual es el par máximo que podemos aplicar sobre cada rueda para que, un coeficiente conocido como "*Factor de relajación*" (que nos da una idea del deslizamiento de la rueda sin tener que entrar en la complejidad de su cálculo) no supere un determinado valor, establecido experimentalmente, para conseguir una disminución del deslizamiento y así evitar la pérdida de adherencia en los neumáticos.

$$T_{max} = \left( \frac{J_w}{\alpha M r^2} + 1 \right) r F d \quad (2.3)$$

Donde **Fd** es la Fuerza longitudinal en la rueda, **Jw** el momento de inercia de la rueda respecto al eje perpendicular de la misma, **r** el radio de la misma y **M** la masa total del vehículo.

En cuanto al mencionado Factor de relajación ( $\alpha$ ), este se define como el cociente entre la aceleración del chasis y la aceleración de la rueda. Tal como mencionan sus desarrolladores [4], cuando la rueda

entra en condiciones de deslizamiento, la diferencia entre la velocidad del vehículo y la de la rueda tiende a incrementar junto con el deslizamiento de la misma. Con esto y tras diversas pruebas, concluyen que el valor de dicho factor debe establecerse próximo e inferior a uno para evitar que la rueda deslice.

## 2.3.2 Control basado en Lógica Difusa (Fuzzy Logic)

### 2.3.2.1 Introducción a la lógica difusa

Este tipo de control fue ideado en 1965 por el ingeniero y matemático Lotfi A. Zadeh y está basado en reglas lógicas que se asemejan al pensamiento humano. A diferencia de la lógica convencional del "Verdadero o Falso", la lógica difusa no presenta verdades absolutas sino grados de pertenencia a conjuntos definidos entre extremos.

Para entenderlo mejor, tomemos como ejemplo el sistema de frenado de emergencia de un coche A (Figuras 2-4 y 2-5):

Inicialmente podríamos decir que al medir la distancia hasta un coche B(rojo) situado delante, el coche A(morado) podría estar LEJOS si la distancia es mayor a 50 metros o CERCA si la distancia es menor a 50 metros. Siguiendo las reglas de la lógica clásica, un coche A a 49,99 m deberá activar el sistema de frenado al estar CERCA del vehículo B, pero uno situado tan solo 2cm más alejado a 50,01 m no, al estar LEJOS del vehículo B. Si pensamos en la actuación de un conductor, lo normal es que dosifique el pedal de freno conforme la distancia varía entorno a esos 50 metros. Esto es, por que los humanos tenemos un pensamiento eminentemente difuso de forma que las distancias entre los vehículos A y B no están limitadas a pertenecer solo a esos dos conjuntos antes nombrados, sino que designamos conjuntos intermedios con calificadores como: Un poco cerca, muy cerca...

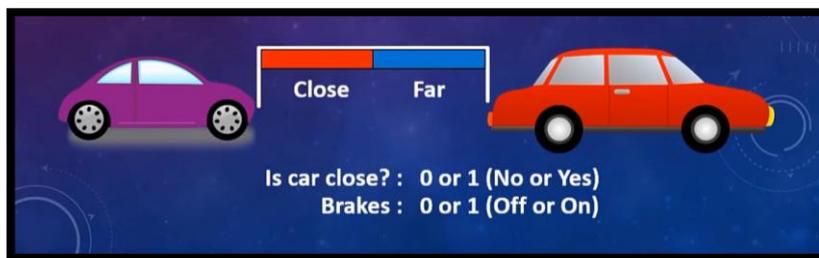


Figura 2-4: Sistema de frenado de emergencia con lógica tradicional<sup>6</sup>

De esta forma si a 48 metros consideramos que estamos un poco cerca, esta distancia tendría un grado de pertenencia al conjunto "LEJOS" y otro al conjunto "CERCA" y, por consiguiente, la actuación de los frenos sería ponderada según el grado de pertenencia a esos conjuntos. (en este caso actuaríamos "UN POCO" sobre los frenos).



Figura 2-5: Sistema de frenado de emergencia con lógica difusa<sup>6</sup>

Este tipo de control ha sido aplicado en numerosas ramas de la tecnología: Sistemas de estabilización de imagen, aires acondicionados, cambio automático de marchas en automóvil, robots para la fabricación...

Entre sus ventajas podríamos destacar:

- La rapidez de cálculo al tratarse de condiciones lógicas

<sup>6</sup> <https://www.labroots.com/trending/videos/11496/what-is-fuzzy-logic> consultado en Marzo de 2019

- Son intuitivos ya que parten del lenguaje convencional humano.
- Están basados eminentemente en la experiencia al necesitar ver como es el comportamiento del sistema a su salida ante diferentes entradas.
- Permite una alternativa de control menos brusca que con control tipo TODO o NADA (que estaría basado en la lógica clásica)

Su principal inconveniente es que, a medida que crece la complejidad del sistema, crece el número de reglas lógicas necesarias para implementar el control en dicho sistema pudiendo llegar a resultar ineficiente el desarrollo de este tipo de controlador frente a otras alternativas.

### 2.3.2.2 Estrategia de control de estabilidad basada en lógica difusa

El siguiente controlador fue desarrollado por Ángel Ojo Jiménez [5] para el FOX basándose en el propuesto por B.L Boada [6] para coches de combustión interna pero aplicándolo a un coche eléctrico resultando algo similar al propuesto por Jalali Kiumars [7].

En este controlador vamos a diferenciar cuatro bloques o capas:

- **Generador de referencias:** Genera los valores de referencia del Yaw-rate y del ángulo de deslizamiento.
- **Control Superior:** En base al estado actual del vehículo (Yaw y ángulo de deslizamiento) calculará el momento total extra necesario para llevarlo al estado de referencia.
- **Control Inferior:** Se encargará de repartir ese momento total extra de forma adecuada entre las 4 ruedas para conseguir el comportamiento deseado.
- **MTTE:** Corrige los pares a aplicar sobre cada rueda (si es necesario) para mejorar la tracción.

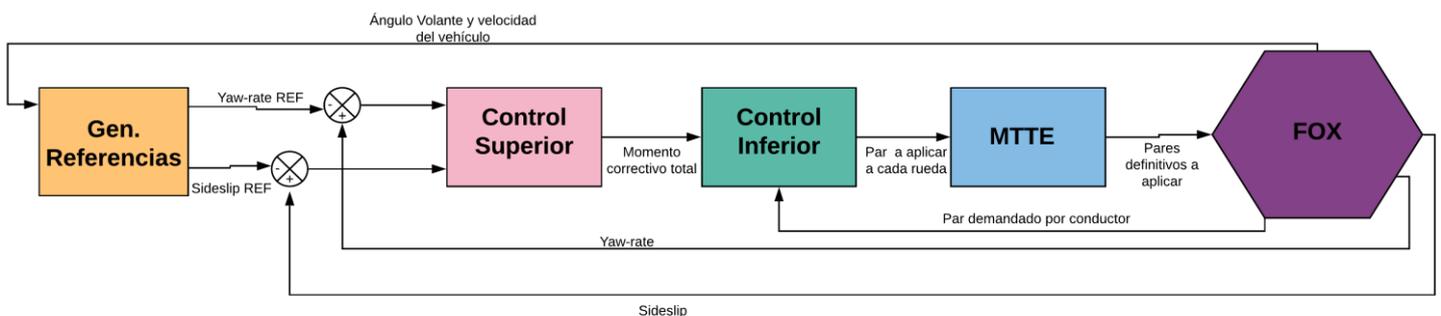


Figura 2-6: Estrategia de control de estabilidad basada en Fuzzy Logic

#### 2.3.2.2.1 Control Superior

La capa de control superior se divide en 4 pasos:

1. **Conversión a Lógica Difusa (Fuzzification):** Los errores calculados a la entrada del control superior, error de Yaw rate y error de ángulo de deslizamiento, se convierten grados de pertenencia a los conjuntos definidos por las variables lingüísticas mostradas en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia..**

Símbolo	Significado
NB	Negativo Grande
NM	Negativo Medio
NS	Negativo Pequeño
ZE	Cero
PS	Positivo Pequeño
PM	Positivo Medio
PB	Positivo Grande

Tabla 2-1: Conjuntos de pertenencia

Para esta conversión se necesitan unas funciones que establezcan que porcentaje de pertenencia presentan los errores con cada uno de los conjuntos.

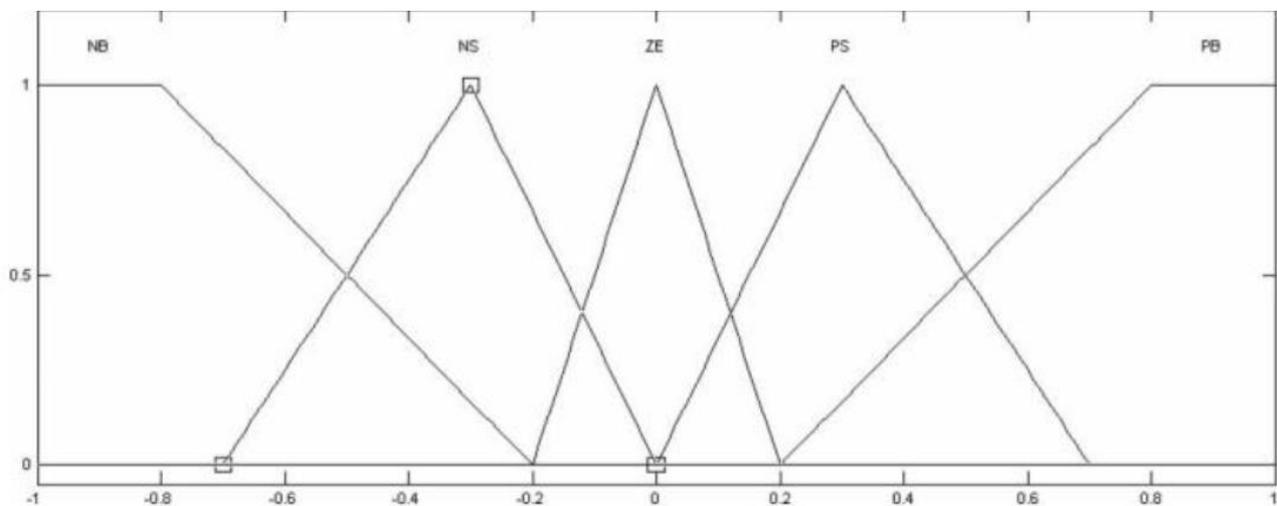


Figura 2-7: Funciones de pertenencia para el error del ángulo de deslizamiento.

*Por ejemplo, si el error de deslizamiento vale -0.5, ese error es 50% Negativo alto y 50% Negativo Medio como se puede apreciar en la Figura 2-7.*

2. **Decisión difusa:** En base a las entradas establecidas en forma de variables lingüísticas, Se definen unas reglas lingüísticas de actuación. Estas reglas permiten conocer el grado de pertenencia que presenta el momento correctivo total con cada uno de los conjuntos definidos (NB, NM, NS...)

El momento correctivo total depende, en su mayor parte, del error en Yaw rate. Mientras el error en Yaw sea positivo (el giro descrito por el coche es más cerrado de lo deseado), el momento a aplicar será negativo (para trazar un giro más abierto) y viceversa. A mayor error en Yaw, mayor será el valor del momento necesario para corregir la trayectoria, aunque en última instancia, dependerá del error del ángulo de deslizamiento para escoger los grados de pertenencia a cada conjunto.

3. **Conversión de la salida a valor numérico:** Esto se realiza empleando unas funciones de pertenencia similares a las vistas en la Figura 2-7. Dado el porcentaje de pertenencia a cada una de las categorías o variables lingüísticas definidas, se obtiene un valor del momento normalizado entre  $[-1$  y  $1]$ .
4. **Escalado:** Por último, ese valor normalizado del momento total es escalado empleando una ganancia que debe ser ajustada correctamente para conseguir el mejor comportamiento posible.

#### 2.3.2.2.2 Control Inferior

Esta capa está basada en el TVC explicado en el apartado 2.2.3.

En primer lugar, el momento total a aplicar para corregir la dinámica del vehículo, se reparte entre los ejes delantero y trasero según un parámetro de ponderación que depende del reparto de carga en el coche. En el caso del FOX, la diferencia de carga sobre el eje trasero y el delantero no es muy grande por lo que, este reparto del momento total entre los ejes se realizará de forma equitativa.

A continuación, en cada eje, se calculan los pares a aplicar sobre cada rueda para conseguir el momento total calculado para ese eje en el paso anterior.

Por último, deberá escogerse si el par adicional de cada rueda debe ser sumado o restado al demandado por el conductor mediante el acelerador. Para ello nos basaremos en el Yaw rate de referencia y el Yaw rate real (para saber si existe sobreviraje o subviraje) y en la idea de funcionamiento de un par diferencial:

- Si sumamos par a las derechas y restamos a las izquierdas buscamos que las ruedas derechas tengan más par que las izquierdas consiguiendo que el coche corrija su giro hacia la derecha.
- Si sumamos par a las izquierdas y restamos a las derechas buscamos que las ruedas izquierdas tengan más par que las derechas consiguiendo que el coche corrija su giro hacia la izquierda.

---

*En una curva hacia la derecha en la que se dé sobreviraje (Figura 2-2), habría que girar menos a la derecha de lo que se está girando. Para ello debemos restar par a las izquierdas y sumar a las derechas para conseguir corregir la trayectoria.*

---

#### 2.3.2.2.3 MTTE

Tal como se explicó en el apartado 2.3.1 se incorpora como última capa, la técnica “*Maximum Transmissible Torque Estimation*” a efectos de tracción, para evitar la pérdida de agarre de las ruedas.

### 2.3.3 Control Proporcional con dos modos de operación

El siguiente controlador fue desarrollado por Ángel Ojo Jiménez [5] para el FOX basándose en el propuesto por J. Bravo Baviera y P. Luque Rodríguez [8].

En él, podemos diferenciar cuatro capas distintas:

- **Supervisor:** Determina en todo instante el modo de operación del controlador en función de los errores de Yaw-rate y de ángulo de deslizamiento.
- **Control Superior:** Genera la referencia de Yaw-rate en función del modo de operación seleccionado por el Supervisor.
- **Control Inferior:** Genera los pares a aplicar sobre cada rueda (Par correctivo + Par Demandado por conductor)
- **MTTE:** Corrige los pares a aplicar sobre cada rueda (Si es necesario) para mejorar la tracción.

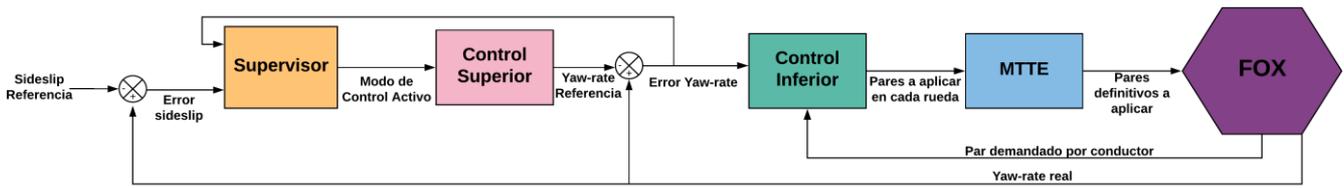


Figura 2-8: Estrategia de control proporcional con dos modos de operación

### 2.3.3.1 Supervisor

El Supervisor es el bloque encargado de decidir si el sistema de control se activa o no. En caso afirmativo, además, elige cuál de los dos modos de control existentes es activado:

- **Maniobrabilidad (ESC- $\gamma$ ):** Se usa para corregir el Yaw-rate del vehículo en situaciones de bajo deslizamiento. Este modo de control se activa (transición  $e1$ ) cuando el error en Yaw-rate sobrepasa un cierto umbral. El valor umbral para la desactivación (transición  $e2$ ) deberá ser menor al de activación para evitar conmutaciones continuas de activación-desactivación que tiendan a inestabilizar el sistema.
- **Estabilidad Lateral (ESC- $\beta$ ):** Se usa para corregir el Yaw-rate del vehículo en situaciones de mayor deslizamiento. La transición a este modo de control (transición  $e5$ ) se da cuando el ángulo de deslizamiento sobrepasa un cierto valor umbral. De igual forma que el anterior, el valor umbral de desactivación (transición  $e6$ ) se da a menor valor del ángulo de deslizamiento para así evitar conmutaciones continuas de activación-desactivación que tiendan a inestabilizar el sistema.

Estos modos de control están basados en los propuestos por Yoon, J., Yim, S., Cho, W. Koo, B. y Yi, K. [9]

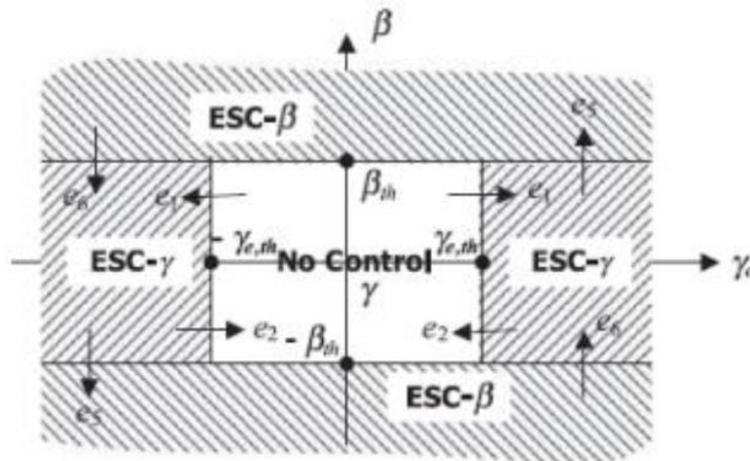


Figura 2-9: Esquema de activación-desactivación de los modos de operación.[5]

### 2.3.3.2 Control Superior

El control superior es el bloque encargado de generar la referencia de Yaw-rate. El cálculo de esta dependerá del modo de control activado, aunque en ambos casos, se basaran en la física del modelo de la bicicleta (modelo de dos grados de libertad).

### 2.3.3.3 Control Inferior

El control inferior es el bloque encargado de calcular el valor del momento correctivo a aplicar sobre el vehículo para corregir su dinámica y posteriormente distribuirlo entre las ruedas.

Para ello se usa el control proporcional propuesto por Hallowell y Ray [10]:

$$M_z = K (\gamma_{ref} - \gamma) I_{zz} \quad (2.4)$$

Siendo  $K$  la ganancia a ajustar y  $I_{zz}$  el momento de inercia del vehículo respecto el eje Z.

Para repartir el momento correctivo total se usa el procedimiento utilizado en el control inferior del controlador de lógica difusa (*Torque Vectoring Control*. Véase apartado 2.3.2.2.2). Para decidir si los pares de cada rueda son sumados o restados al que la misma rueda tiene aplicado, también se basan en la idea de un par diferencial:

- Si  $M_z > 0$ , (con el sentido positivo del eje Z definido desde la superficie hacia el coche) el momento correctivo pretende que el vehículo gire más hacia la izquierda.
- Si  $M_z < 0$ , el momento correctivo pretende que el vehículo gire más hacia la derecha.

Por último, al momento correctivo (con signo) a aplicar sobre cada rueda, se suma el par demandado por el conductor.

### 2.3.3.4 MTTE

Tal como se explicó en el apartado 2.3.1 se incorpora como última capa, la técnica “*Maximum Transmissible Torque Estimation*” a efectos de tracción, para evitar la pérdida de agarre de las ruedas.

## 2.3.4 Control basado en MPC

El siguiente controlador fue desarrollado por Gonzalo Hernández [11] para el FOX.

Para este controlador podemos distinguir tres bloques:

- **Un controlador predictivo basado en modelo (MPC)** a alto nivel para la generación de un momento correctivo total.
- **Un controlador vectorial de par (*Torque Vectoring Control*)** a bajo nivel para el reparto de par entre las ruedas.
- **MTTE**

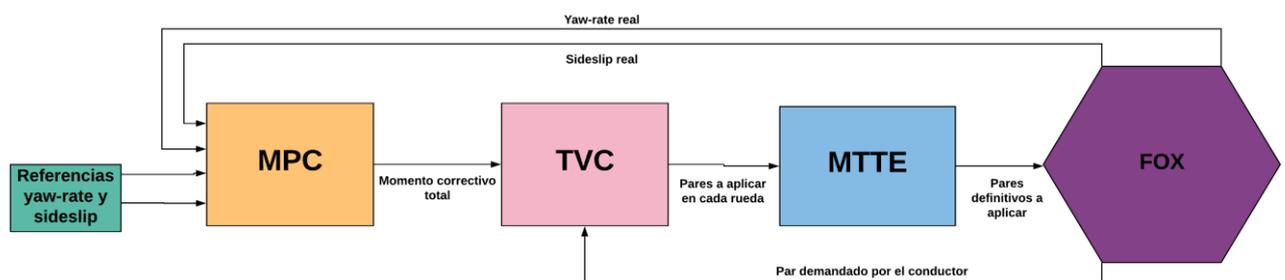


Figura 2-10: Control basado en MPC

### 2.3.4.1 Control predictivo basado en modelo (MPC)

Este tipo de controladores se originó en la década de los 70 para ser utilizado en la industria de procesos. El objetivo del MPC es utilizar un modelo del sistema a controlar para, a través de este, estimar las salidas futuras  $y(t+k|t)$ <sup>7</sup>. El valor de esas salidas depende de los valores pasados de las entradas y salidas del sistema y de la acción de control futura  $u(t+k|t)$  con  $k=0,1\dots N-1$ . Con lo anterior, se calcula en todo instante la acción de control a aplicar que minimice una función cuadrática objetivo. Al minimizar esta función se pretende disminuir el error existente entre las salidas futuras y las referencias de las mismas, limitando a su vez, el esfuerzo de la acción de control. De esta forma, la acción de control  $u(t|t)$  será la que se aplique en cada instante  $t$ .

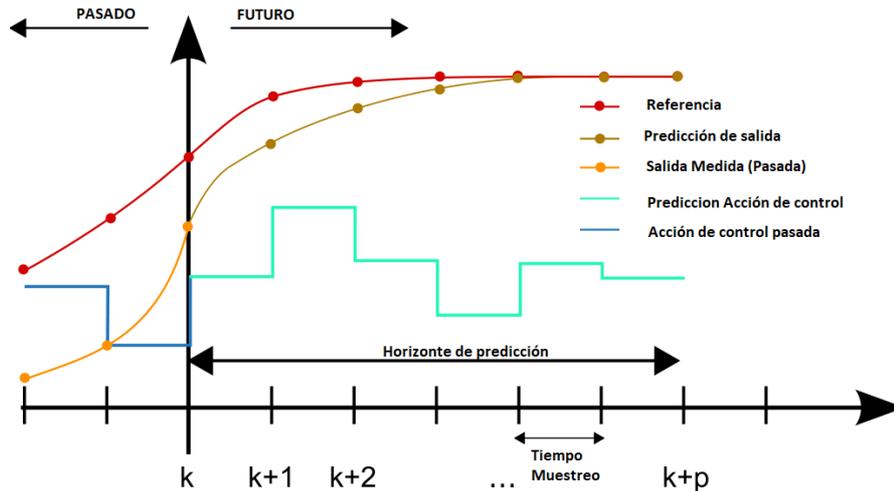


Figura 2-11: Funcionamiento MPC Discreto<sup>8</sup>

En la implementación de este controlador, se han realizado las siguientes consideraciones extraídas de [11] donde, además, puede consultarse la formulación del MPC completa aplicada al FOX:

- En este caso la acción de control  $u(t)$  no es más que el momento correctivo total ( $Mz(t)$ )
- Para el cálculo del Yaw-rate de referencia se asume que el coche describe una trayectoria curvilínea de radio de giro constante ( $R$ ) con una dinámica estacionaria. Con esta consideración se puede llegar a una expresión para el cálculo de la misma.
- En el caso del ángulo de deslizamiento de referencia, como en el resto de controladores, intentaremos minimizarlo lo máximo posible con lo cual, basta con considerar como referencia  $0^\circ$ .
- El modelo dinámico que emplea dicho controlador es el modelo de la bicicleta.

### 2.3.4.2 Controlador Vectorial de par (TVC)

Este bloque se encarga del reparto del momento correctivo Total ( $Mz$ ) entre las ruedas. Para este reparto, se procede de igual forma que en el controlador de lógica difusa ya que ambos se basan en [7]. En primer lugar, se reparte equitativamente el momento total entre los dos ejes. Después, para cada eje se calcula el par a aplicar sobre cada rueda del eje para conseguir el momento correctivo necesario en el mismo. Por último, se determina el signo de los pares de cada rueda atendiendo a la idea de par diferencial, tal como se explicó en el apartado (2.3.2.2.2).

<sup>7</sup> Esta notación significa salida y del instante  $t+k$  calculada en  $t$  con  $k=1,2,3\dots N$ , siendo  $N$  el horizonte de predicción.

<sup>8</sup> Martin Behrendt en [https://es.wikipedia.org/wiki/Control\\_predictivo\\_por\\_modelo#/media/File:MPC\\_scheme\\_basic.svg](https://es.wikipedia.org/wiki/Control_predictivo_por_modelo#/media/File:MPC_scheme_basic.svg). Consultado en: marzo de 2019. (Licencia CC)

### 2.3.4.3 MTTE

Además del MPC y del TVC, este sistema de control presenta, al igual que los dos anteriores, una última capa que actúa a modo de control de tracción, para evitar la pérdida de agarre que pueden sufrir las ruedas mediante la limitación del par aplicado a ellas. La técnica empleada está basada en el MTTE (Maximum Transmissible Torque Estimation)

### 2.3.5 Controlador de velocidad angular y deslizamiento empleando ganancias, enfocado a competición.

El siguiente controlador se inspira en el diseño de Lochlan Brown [12] y ha sido desarrollado para el FOX por [13].

Al igual que los anteriores controladores, realiza una vectorización del par aplicado a las ruedas o TVC. Sin embargo, en este controlador, no se calcula en primer lugar un momento correctivo total a aplicar sobre el vehículo, sino que se calculan directamente, los pares individuales de cada motor.

La presente estrategia de control se basa en una regulación del par aplicado a los motores sobre el par demandado por el conductor. Esta regulación se realiza mediante dos ganancias dinámicas:

$$T_{aplicadorueda} = K_{tracción} K_{estabilidad} T_{conductor} \quad (2.5)$$

Ambas ganancias toman valores distintos para cada rueda:

- Las ganancias de tracción ( $K_{tracción}$ ) tienen como objetivo regular el par aplicado evitando que sea mayor del que la rueda puede aprovechar de acuerdo con el nivel de tracción que presenta la misma en cada momento. Son proporcionales a una ganancia ajustable ( $K_t$ ) y a la fuerza vertical ( $F_z$ ) existente en la rueda.
- Las ganancias de estabilidad ( $K_{estabilidad}$ ) están pensadas para mantener la estabilidad del vehículo evitando subvirajes y sobrevirajes mediante el control del Yaw-rate. Dependen de una ganancia ajustable ( $K_p$ ) y del error en Yaw rate:

$$K_{estabilidad} = 1 \pm K_p e_{yaw\ rate} \quad (2.6)$$

Se basa en la misma idea del par diferencial (explicada en el apartado 2.3.2.2.2 para el controlador de lógica difusa) para decidir si sumar o restar (ecuación 2.6) al par del conductor, un par correctivo que sería proporcional al par del conductor y al error de Yaw-rate. Sustituyendo (2.6) en (2.5):

$$T_{aplicadorueda} = K_{tracción} (1 \pm K_p e_{yaw\ rate}) T_{conductor} \quad (2.7)$$

#### 2.3.5.1 Mejora $K_{estabilidad}$ para mejorar la adherencia.

En la Figura 2-12 puede observarse como varía el coeficiente de rozamiento dinámico de las ruedas sobre diferentes superficies en función del deslizamiento de las mismas. Se observa cómo, el máximo agarre se da en las diferentes superficies, para valores en torno a 0.2. Para mayores valores del deslizamiento, se alcanza una región inestable en la cual el neumático empieza a perder adherencia.

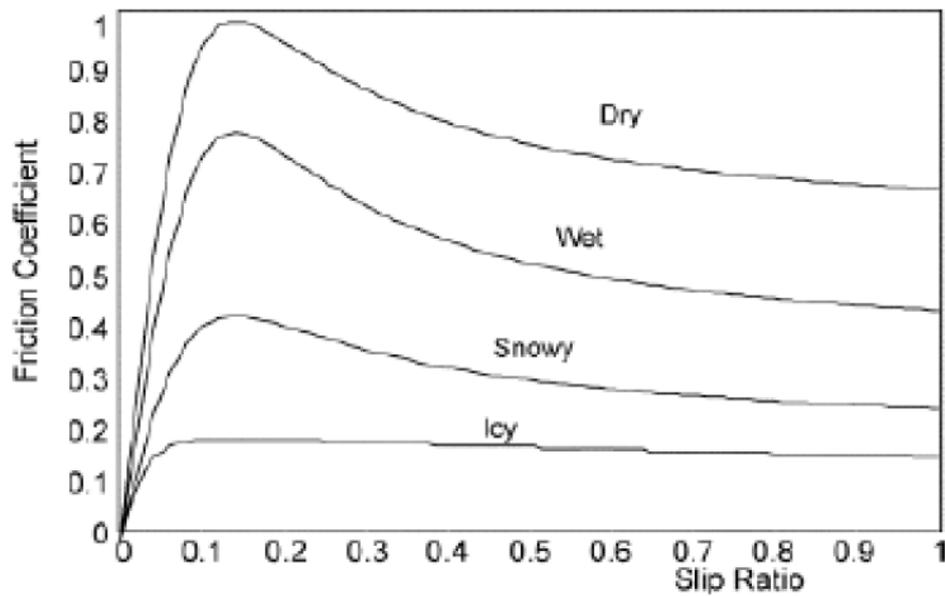


Figura 2-12: Coeficiente de rozamiento (Eje Y) frente a deslizamiento (Eje X) [13]

Para asegurar que el agarre de los neumáticos permanece en la región estable (por debajo de 0.2) se define una ganancia adicional  $K_d$  que modifica la  $K_{estabilidad}$  de la siguiente forma:

$$K_{estabilidad} = \frac{K_{estabilidad}}{K_d * deslizamiento\ rueda} \quad (2.8)$$

Sin embargo, la corrección de  $K_d$  se aplica según un ciclo de histéresis, para evitar continuas conmutaciones no deseadas de activación-desactivación. Dicho ciclo de histéresis queda definido mediante un valor umbral de deslizamiento para la activación ( $U+\epsilon$ ) y otro umbral, distinto, para la desactivación ( $U-\epsilon$ ).

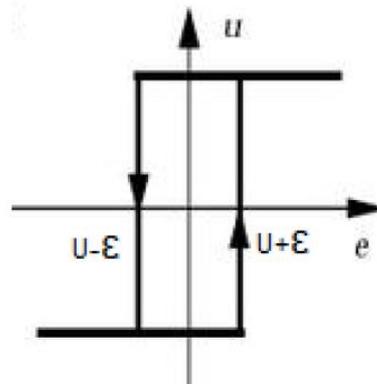


Figura 2-13: Ciclo de histéresis

Por último, anotar que para el cálculo de la referencia de Yaw-rate se usa, al igual que en el controlador anterior, el modelo de la bicicleta.

### 2.3.6 Control PI de estabilidad

Los controladores PID son estrategias de control realimentadas ampliamente usadas en la industria. El algoritmo calcula la actuación sobre el Sistema a controlar ( $u(t)$ ) mediante 3 términos: El proporcional, el integral y el derivativo. Los 3 son proporcionales a valores del error (valor actual, valores pasados y una predicción de valores futuros respectivamente) existentes entre la salida instantánea del sistema a controlar y el valor deseado de la misma. De esta forma, se define (en el dominio continuo de tiempo) según la ecuación 2.9.

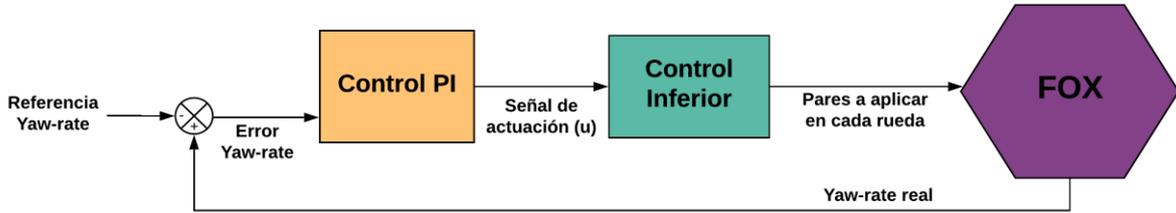


Figura 2-14: Control PI. Diagrama de bloques

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(\tau) d\tau + K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (2.9)$$

Sin embargo, normalmente estos controladores se implementan en el dominio discreto. Una de las aproximaciones de la ecuación 2.9 es la siguiente:

$$u_k = K_p e_k + K_i I_k + K_d (e_k - e_{k-1}) \quad (2.10)$$

$$I_k = I_{k-1} + e_k T \quad (2.11)$$

Siendo  $T$  el periodo del ciclo de control,  $I_k$  el error integral y  $u_k$  la actuación resultante de aplicar el PID cada ciclo  $k$ .

El controlador propuesto para el FOX, se trata de un control Proporcional-Integral (PI) [14]. Este controlador calcula en función del error entre la velocidad angular del vehículo y la velocidad angular de referencia (error de Yaw-rate) una variable de actuación  $u_k$  que permite distribuir el par total demandado por el conductor ( $4T$ ). Suma del par demandado para cada rueda ( $T$ ) a través del acelerador, entre las distintas ruedas según unos ratios establecidos que dependen exclusivamente de esa variable  $u_k$ . El par aplicado sobre cada rueda quedaría como:

$$T_{rueda} = T_{total\ conductor} \cdot \text{ratio de la rueda} \quad (2.12)$$

De (2.12) se deduce que, la suma de los 4 ratios debe ser igual a la unidad para que el par aplicado total sea igual al par total demandado por el conductor. Este controlador también hace uso del modelo simplificado de la bicicleta para el cálculo del Yaw rate de referencia.

Por último, mencionar que, a diferencia de los anteriores, esta estrategia solo considera el control de estabilidad sin incluir una capa específica para el control de tracción.

### 2.3.7 Control PI con sistema de control de tracción

El último controlador está basado en el propuesto por Jose Carlos Alonso [15] para el FOX. Sin embargo, en su implementación, su estructura se ha visto modificada ligeramente resultando en la disposición de capas mostrada en la Figura 2-15.

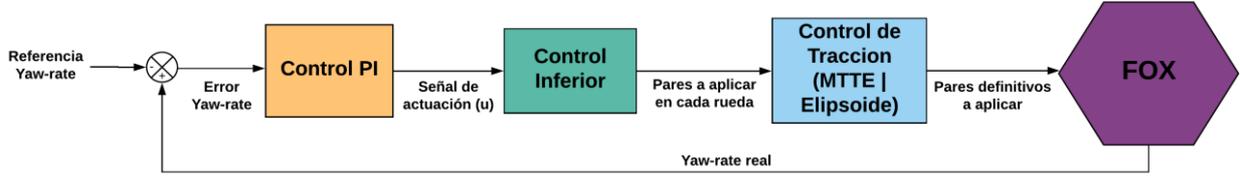


Figura 2-15: Control PI con sistema de control de tracción. Diagrama de bloques

Aquí se propone que el control de estabilidad se resuelva, únicamente, mediante la capa de distribución de par por control de Yaw rate, empleando como base para el mismo, el controlador PI que ha sido mencionado en el apartado 2.3.6. Sin embargo, a diferencia de dicho controlador, en este caso se propone limitar el Yaw-rate de referencia en función de dos aspectos:

- Aceleración lateral que sufre el vehículo
- Angulo de deslizamiento lateral ( $\beta$ )

En cuanto al control de tracción se proponen dos estrategias distintas: Control directo sobre el deslizamiento (Elipsoide de tracción) y MTTE (ya introducida en el apartado 2.3.1).

#### 2.3.7.1 Elipsoide de Tracción

Si representamos gráficamente el valor límite de la fuerza que el neumático es capaz de transmitir al suelo, teniendo en cuenta las posibles variaciones en sus componentes longitudinal y transversal, resulta una forma elíptica a la que se denomina elipsoide de tracción. Con esto, es importante recordar que el módulo de dicha fuerza debe ser menor que la fuerza de fricción entre ellos.

$$\mu F_z \geq \sqrt{F_x^2 + F_y^2} = F_{transmitida} \quad (2.13)$$

Siendo  $\mu$  el coeficiente de rozamiento con el suelo,  $F_z$  la fuerza de rozamiento del neumático,  $F_x$  la fuerza longitudinal transmitida por la rueda y  $F_y$  la lateral.

Por lo tanto, para evitar la pérdida de tracción en los neumáticos, se calcula el par máximo que se puede transmitir a cada rueda estableciendo un valor límite a la componente longitudinal de la fuerza transmitida ( $F_x^{lim}$ )

Debido a las aproximaciones y estimaciones que hay que realizar, el sistema no resulta, por si solo, fiable desde el punto de vista de la estabilidad y por eso se integra junto con un control proporcional del deslizamiento de la rueda (slip).

$$T_{limite} = r F_x^{lim} + K \cdot e_{slip} \quad (2.14)$$

Siendo  $r$  el radio de la rueda,  $K$  una constante proporcional a ajustar y  $e_{slip}$  el error de deslizamiento de la rueda.

De esta forma el par máximo aplicable a la rueda estará limitado, además de por un valor límite de la fuerza longitudinal transmisible al suelo, por el valor del error en deslizamiento de cada rueda. El deslizamiento de la

rueda será conocido a partir del cálculo del coeficiente de deslizamiento ( $\lambda$ ) de la misma (también llamado pseudodeslizamiento) que debe ser menor que  $\lambda_{ref}=0.2$  ya que por encima de dicho valor el comportamiento de la rueda tiende a ser inestable.

$$\lambda_{rueda} = \frac{|\omega r - v|}{\max(\omega r, v)} \quad (2.15)$$

Siendo  $\omega$  la velocidad angular de la rueda,  $r$  el radio de la rueda y  $v$  la velocidad lineal de la misma.



# 3 VEHÍCULO FOX

## 3.1 Introducción al vehículo FOX

El FOX es un vehículo eléctrico desarrollado en la Universidad de Sevilla que presenta dos principales novedades frente a los modelos convencionales:

- Sistema de alimentación eléctrica que permite combinar el uso de baterías y una pila de hidrógeno. Aunque, durante el desarrollo de este proyecto, solo se utilizan las baterías.
- Tracción integral a las cuatro ruedas mediante la inclusión de 4 motores intrarueda, ofreciendo mayor aptitud que los vehículos que presentan como máximo un motor por eje, para el desarrollo de los sistemas de tracción y estabilidad mencionados en el capítulo anterior.



Figura 3-1: Vehículo FOX

Está montado bajo un chasis de competición (S2- SilverCars) modificado para la introducción de los cuatro motores eléctricos instalados en las ruedas y la fuente de alimentación.



Figura 3-2: Detalle chasis tubular

## 3.2 Arquitectura

En el siguiente apartado se destacan las características primordiales de los elementos principales que componen el vehículo.

### 3.2.1 Motores

Dispone de un motor eléctrico sin escobilla por cada rueda (tracción integral). Estos motores presentan una potencia nominal de 7Kw y un par máximo entregable de 78Nm. Al no presentar escobillas, se consigue una menor pérdida energética por rozamientos traduciéndose en una mayor autonomía.

Cada motor está instalado dentro de cada rueda, sin necesidad de una conexión mecánica entre los mismos (Figura 3-3) siendo, por lo tanto, independientes entre ellos. Esto último presenta la ventaja de reducir las pérdidas que ocasionaría la presencia de un sistema de transmisión.

Cada motor dispone de su propio controlador a bajo nivel (gestión de potencia y protecciones del mismo) comandado por una señal emitida por la unidad de control electrónico del vehículo. Dicha señal dependerá de la estrategia de control implementada y el par demandado por el conductor (accionamiento del acelerador).



Figura 3-3: Motor sin rueda (izquierda) y con rueda montada (derecha)

### 3.2.2 Sistema de frenado

Este sistema constituye un sistema totalmente desacoplado del que se utiliza para gestionar el par de cada rueda en base a la señal de control y es controlado por el conductor mediante el pedal de freno correspondiente. Utiliza frenos de disco en las 4 ruedas.

### 3.2.3 Baterías

El vehículo dispone de una batería con un total de 6 paquetes que contienen 4 celdas cada uno.

Incluye un sistema de gestión de baterías (BMS) que se encarga principalmente de asegurar que esta no opere fuera de su zona segura y de hacer un seguimiento de su estado.

### 3.2.4 ECU (Engine Control Unit)

Unidad de control Electrónico del vehículo constituida por un ordenador con arquitectura tipo PC104. Se encarga principalmente de recopilar todos los datos del vehículo, implementar los algoritmos de control y calcular las señales de actuación a aplicar sobre los motores para el accionamiento de los mismos. Dicha unidad utiliza el sistema operativo de tiempo real *QNX*.

### 3.2.5 Supervisor

El Supervisor está conformado por un ordenador con arquitectura tipo PC104 que tiene instalado una versión empotrada del Sistema operativo *Windows XP professional* y por una pantalla táctil que sirve de HMI (Human-Machine Interface) entre el copiloto y el FOX.

### 3.2.6 IMU (Inertial Measurement Unit)

Unidad de medición inercial que proporciona las medidas de las variables de entrada necesarias para el control del vehículo. Esto lo realiza a través de los siguientes sensores:

- Acelerómetro: Proporciona la aceleración lineal y angular del FOX
- Magnetómetro: Proporciona los ángulos de Euler referenciados a un **sistema de ejes local**.
- Giróscopo: Proporciona Velocidad angular del vehículo.
- GPS: Posición y velocidad referenciados a un sistema de coordenadas no locales (Ejes NED).

### 3.2.7 Otros sensores

Además de la IMU el FOX cuenta con otros sensores necesarios para el control:

- Potenciómetros lineales en la amortiguación utilizados para conocer las fuerzas verticales que actúan sobre cada rueda. (Figura 3-4)
- Potenciómetros lineales en los pedales utilizados para conocer la posición o recorrido de cada pedal.
- Potenciómetro rotatorio en el volante empleado para conocer el ángulo de giro del volante.



Figura 3-4: Potenciómetro lineal en amortiguación

Todos ellos proporcionan una señal de tensión comprendida entre 0 y 5 V y son recogidas por la ECU mediante un sistema de adquisición de datos.

### 3.2.8 Comunicación

- La comunicación de la ECU con los controladores de bajo nivel de cada motor, con el Supervisor y la BMS se realiza mediante un bus que utiliza un protocolo de comunicaciones tipo CAN y la conexión de la misma ECU con la unidad de medición inercial se realiza mediante un puerto serie (RS-232).

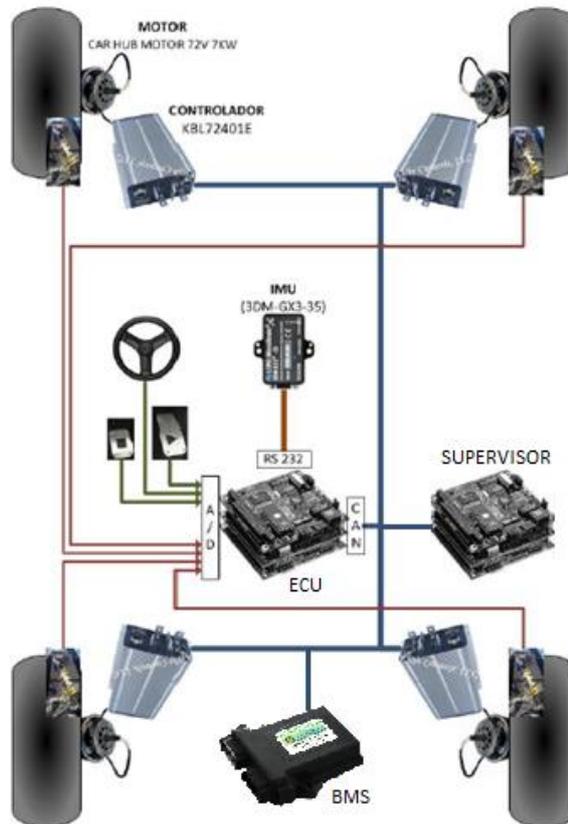


Figura 3-5: Esquema Comunicaciones FOX [15]

# 4 SUPERVISOR

---

Tal como se adelantó en el capítulo anterior, el Supervisor es un sistema que debe permitir a su usuario (en este caso el copiloto del vehículo):

- Monitorizar el estado del vehículo en tiempo real (Tensión y temperatura de las celdas de la batería, tensión de actuación en pedales, velocidad lineal y angular del coche...)
- Ajustar la estrategia de control de tracción y estabilidad y evaluar su acción

Para ello es necesario disponer de una interfaz gráfica de usuario (GUI). Una GUI no es más que un programa que permite establecer la comunicación entre un sistema (ECU) y el usuario (copiloto) proporcionando la información y acciones disponibles en la interfaz mediante el uso de objetos gráficos, consiguiendo así que la interacción humano-máquina sea sencilla e intuitiva. La interfaz del Supervisor ha sido desarrollada como archivo de ejecutable de código reubicable (.EXE) para el sistema operativo *Windows XP Professional* haciendo uso del software LABVIEW (Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench)

LABVIEW es una plataforma y entorno de desarrollo creado por National Instruments que permite diseñar sistemas de control, pruebas, monitorización... para su uso en simulaciones y/o en aplicaciones reales utilizando un lenguaje de programación visual. Los programas desarrollados en LABVIEW reciben el nombre de Instrumentos Virtuales o VIs y pueden superponerse tantos como sea necesario para alcanzar el grado de complejidad deseado para la aplicación objetivo.

Los equipos donde vayan a ser utilizadas dichas aplicaciones no necesitarán disponer de una licencia de LABVIEW cada uno ya que, al crear la aplicación, podrá adjuntarse un instalador de LABVIEW RUNTIME ENGINE suficiente por sí sola para ejecutarlas. De esta forma, la aplicación desarrollada para el FOX podría ser adaptada y utilizada en otros equipos fácilmente.

En el resto del capítulo, se hará referencia a la GUI implementada como "Supervisor". Sin embargo, es importante recordar que el Supervisor engloba todo el hardware (PC-104, Pantalla Táctil...) y software (Sistema Operativo, GUI...) que permiten el funcionamiento de la interfaz gráfica de usuario.

## 4.1 Objetivos

A continuación, se exponen más en detalle los objetivos o funcionalidades que se pretenden conseguir con el Supervisor.

### 4.1.1 Monitorización de datos

Lo más básico que puede aportar el Supervisor al copiloto es una monitorización de todos los datos relevantes que describen y permiten conocer el estado del vehículo y de sus diferentes componentes en tiempo real.

Toda la información que los componen es recogida por los distintos sensores instalados en el coche, recopilada por la ECU y transmitida al Supervisor mediante la comunicación CAN establecida. Esa información se puede distinguir en 3 bloques:

- **Información del estado general del coche.** Son los datos recogidos por la IMU referidos al coche en sí. De entre todos los disponibles, se han seleccionado los más relevantes:

Dato	Observación
Velocidad Lineal	Según GPS (en módulo)
Velocidad Angular	Según los ángulos de Euler (Roll, Pitch, Yaw)
Orientación	Según los ángulos de Euler (Roll, Pitch, Yaw)
Posición	Según coordenadas GPS (Latitud, Longitud, MSL <sup>9</sup> )
Aceleración Lineal	Según coordenadas locales del coche
Errores	Son los códigos de error generados en la Unidad de Control Electrónico (ECU) y clasificados como leves, graves o críticos.

Tabla 4-1: Información del estado general del coche

- **Información específica.** Son los datos que se refieren a componentes específicos del coche.

Dato	Observación
Actuaciones Pedales y volantes	Medidas por los potenciómetros instalados en los mismos
Actuaciones de la suspensión	Medidas por los potenciómetros instalados en los mismos
Datos de los motores	Recogidos por las controladoras asociadas a cada uno de ellos. (Revoluciones por minuto, temperatura, corrientes y tensiones de fase, zonas muertas, potencia, señal de aceleración...)
Datos de la batería	Tensiones y temperaturas de las celdas, Estado de carga...

Tabla 4-2: Información específica del coche

- **Parámetros de evaluación:** Se trata de un conjunto de parámetros que se utilizan para evaluar la estabilidad del vehículo en todo momento (ver apartado 4.1.2).

#### 4.1.2 Ajuste y evaluación de la estrategia de control de tracción y estabilidad

El otro objetivo principal del Supervisor consiste en permitir al copiloto actuar sobre el control de tracción y estabilidad implementado, en tiempo de ejecución. De esta forma, el copiloto podrá elegir entre las distintas estrategias de control disponibles y ajustar los distintos parámetros que las definen con el objetivo de mejorar la respuesta del coche. Dicha respuesta será evaluada en función de los datos disponibles (expuestos en el apartado anterior), fundamentalmente, mediante el bloque de “Parámetros de evaluación”. Estos parámetros son:

- **Ángulo deslizamiento ( $\beta$ ).** Véase apartado 2.1.3.2
- **Ángulo de deslizamiento de las ruedas:** También conocido como Ángulo de deriva. Cuantifica, de algún modo, el deslizamiento lateral de cada rueda.
- **Pseudodeslizamiento de las ruedas( $\lambda$ ).** Véase apartado 2.3.7.1.

<sup>9</sup> MSL: Metros sobre el nivel del mar

## 4.2 Estructura interna del Supervisor

Para el desarrollo de la aplicación del Supervisor ha sido utilizado como punto de partida, la estructura y división en diferentes archivos o subVIs propuesta por Carlos Montero, antiguo partícipe del proyecto FOX. La aplicación, por lo tanto, está conformada principalmente por 2 bloques diferenciados:

- **El programa principal**, que consiste en un único archivo cuyas funciones principales son: establecer la estructura secuencial de las distintas tareas a realizar para el correcto funcionamiento del Supervisor y realizar los procesos de envío de datos a la ECU. Dentro del proyecto de LabVIEW se corresponde enteramente con el archivo *"FOX\_SUPERVISOR"*
- **El bloque de lectura de datos**, que consiste en un conjunto de archivos (o subVIs) que engloban todas las tareas necesarias desde la recepción de los datos a través del protocolo CAN establecido con la ECU, hasta su interpretación y almacenamiento en variables globales del programa. Dentro del proyecto de LabVIEW se corresponden con los archivos *"FOX\_READ"*, *"FOX\_RX"*, *"FOX\_RX\_COLA"* y *"FOX\_RXTRADUCTOR"*

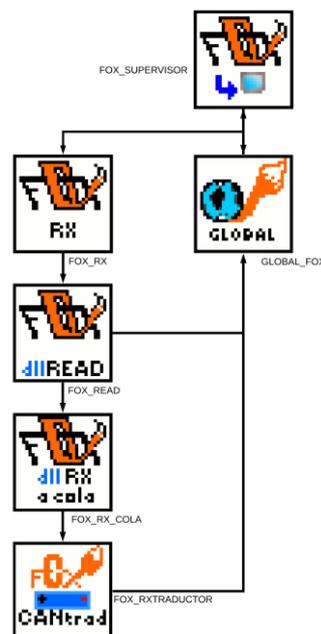


Figura 4-1: Diagrama de archivos y sus conexiones en el proyecto de LabVIEW

### 4.2.1 Lectura de datos

El primer paso para la lectura de los datos recibidos es la utilización de una dll que se encarga de resolver la comunicación a bajo nivel mediante el protocolo CAN. En este documento, se ha decidido denominarla de aquí en adelante: "Librería del protocolo".

De esta tarea se encarga el subVI *"FOX\_READ"* que es, en esencia, la invocación de la función *"CAN\_READ"* incluida en la mencionada Dll. El prototipo de la función es el siguiente:

```
uint32_t CAN_Read (uint8_t channel, void *MessageBuffer, void *TimestampBuffer)
```

Como argumento de entrada, le proporcionamos **el canal** que es utilizado en la comunicación (channel). Además, existen dos argumentos de entrada-salida : **el buffer de mensajes** donde se almacenan los datos recibidos (MessageBuffer) y **el buffer de tiempo** donde se almacenan las marcas temporales<sup>10</sup> en las que suceden los eventos de recepción (TimeStampBuffer). Ambos buffers son iniciados a 0 a la entrada de la función.

<sup>10</sup> Una Marca Temporal o TimeStamp es una secuencia de números o caracteres que indican el momento exacto (fecha y hora) en la que ocurrió un determinado evento.



El subVI FOX\_RXTRADUCTOR se encarga revertir todo ese pretratamiento realizado en la ECU. Esto lo hace en dos pasos ejecutados secuencialmente:

1. Distingue los datos recibidos según el identificador de mensajes y los guarda en distintas variables intermedias. Las variables enteras que hayan sido particionadas para ser enviadas como enteros de 8 bits se unen en este paso como enteros de 16 o 32 bits. Véase Figura 4-3
2. Las variables intermedias que proviniesen originalmente de variables reales en la ECU, son convertidas de enteros a double dividiendo por 10 o 100 según corresponda. Las variables definitivas se guardan en un clúster de datos global. Véase Figura 4-4

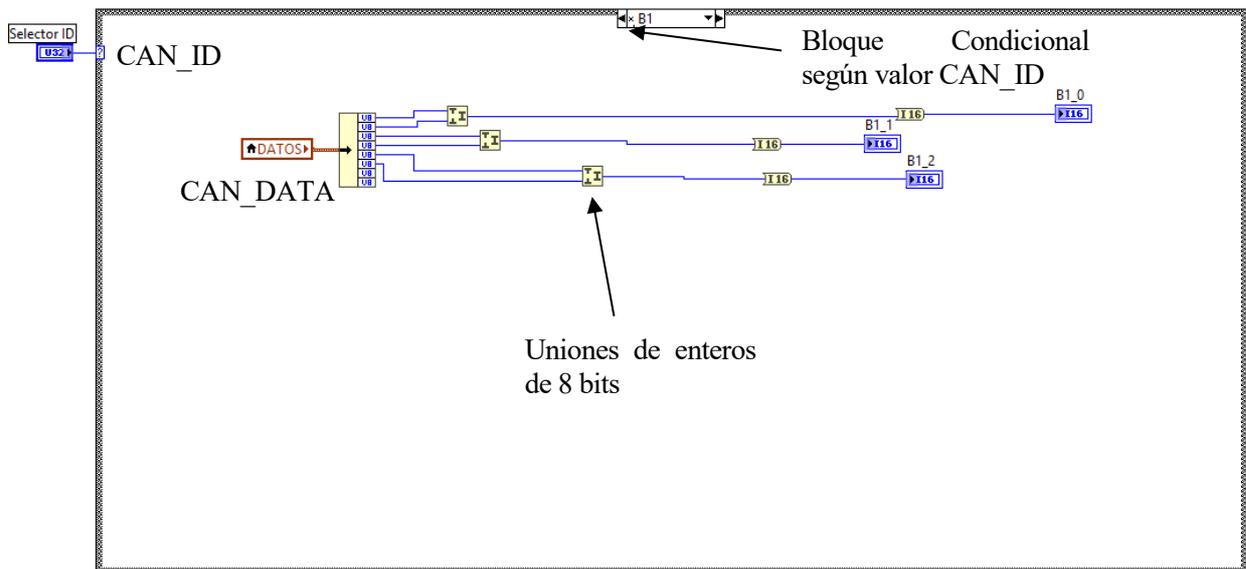


Figura 4-3:Paso 1 FOX\_RXTRADUCTOR

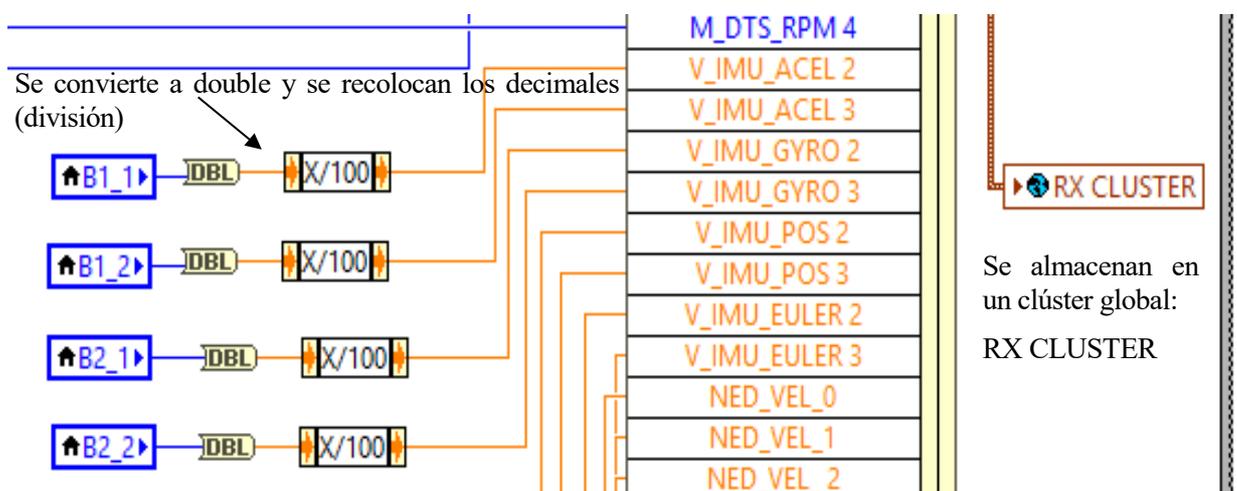


Figura 4-4: Paso 2 FOX\_RXTRADUCTOR

Para conseguir una clara secuencialidad entre distintos pasos, LABVIEW incorpora algunas estructuras para cumplir con esa función:

- **Stacked sequence structure:** Los pasos secuenciales se superponen en la pantalla de programación y se puede navegar por ellos con la barra de selección superior.
- **Flat sequence structure:** Los pasos secuenciales se disponen en la pantalla de forma seguida sin superponerse unos con otros.

La única diferencia entre ellas es a nivel organizativo del código del programa.

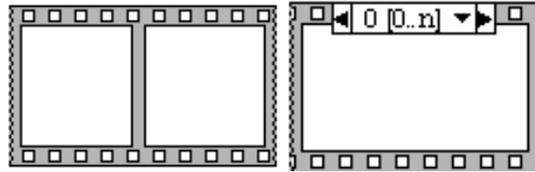


Figura 4-5: Estructuras secuenciales en LABVIEW

## 4.2.2 Programa Principal

El archivo *FOX\_SUPERVISOR* engloba la parte principal del programa. Se encarga de establecer la estructura secuencial de las distintas tareas entre las cuales se encuentran los procesos de envío de datos a la ECU. El programa principal, por tanto, podría estructurarse de la siguiente manera

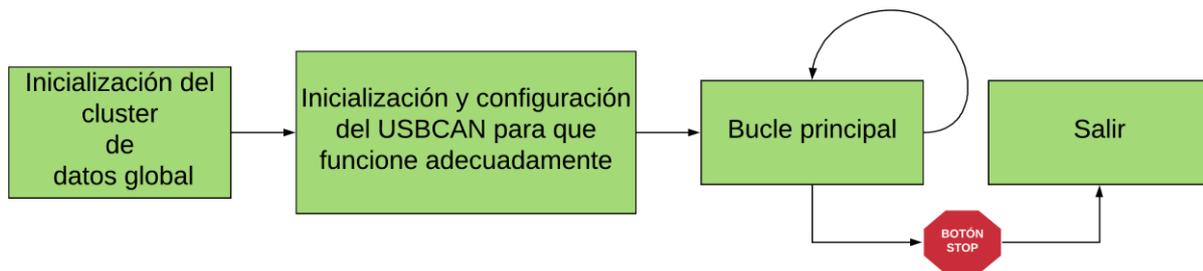


Figura 4-6: Diagrama de flujo de *FOX\_SUPERVISOR*.

Lo ilustrado en la Figura 4-6 se dispone en LABVIEW utilizando una estructura secuencial apilada (Stacked sequence structure):

1. **Iniciación del clúster de datos global.** Antes de realizar cualquier operación de lectura es necesario que el clúster donde se volcarán todos los datos recibidos de la ECU sea inicializado. Por defecto, se inicializan todas las variables del clúster a 0.

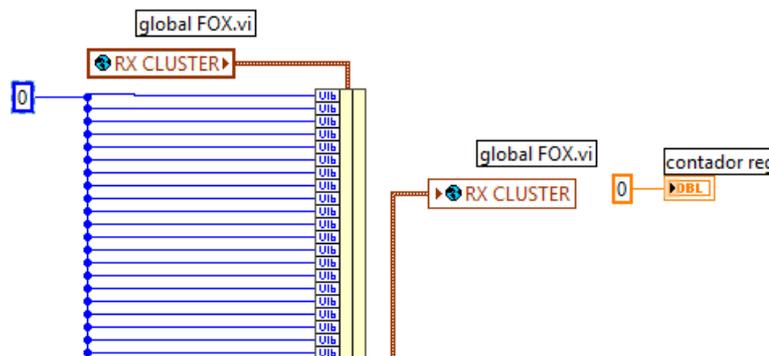


Figura 4-7: Inicialización del clúster de datos global. *FOX\_SUPERVISOR*

2. **Inicialización y configuración del USBCAN.** La librería del protocolo incluye una función, "*CAN\_INIT*", que se encarga de configurar correctamente el BUS para que este funcione adecuadamente con el protocolo CAN. El prototipo de dicha función es el siguiente:

```
uint32_t CAN_Initialize (uint8_t channel, uint16_t baudrate, uint8_t hwtype, uint32_t ioport, uint16_t interrupt);
```

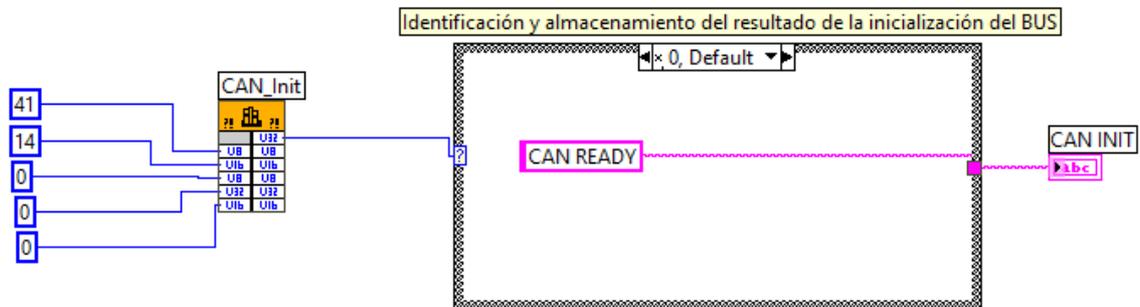


Figura 4-8: Inicialización y configuración del USBCAN. *FOX\_SUPERVISOR*.<sup>11</sup>

3. **Bucle Principal.** En este paso, se establece un bucle cuya única condición de salida es la de pulsar el botón STOP. Dentro del bucle principal se establece otra estructura secuencial no apilada (flat sequence structure) en la que se pueden distinguir 5 pasos:

- 3.1. **Lectura de datos.** En este paso, se establece una estructura condicional que atiende al valor del botón "RX" (Botón de Recepción de datos. Véase apartado 4.3) de modo y forma que si el usuario presiona dicho botón se invocará el bloque de lectura de datos (englobado en el subVI "*FOX\_RX*"). Mientras el botón permanezca activado, los datos que se reciben de la ECU serán actualizados en cada iteración del bucle principal.
- 3.2. **Envío Primario.** Tras la lectura de datos se establece una primera estructura condicional para el envío de datos desde el Supervisor a la ECU. Este envío se encarga de la transmisión del estado de los motores (si están activos o no), del controlador seleccionado (variable entera que tomara distintos valores según la estrategia de control escogida por el usuario) y del heartbeat. La condición para que se produzca este envío será que esté activo "*FLAGWRITE*" o que haya llegado un heartbeat.

El **heartbeat** es un dato booleano que es inicialmente transmitido cada cierto tiempo por la ECU para verificar que se mantiene la conexión con el Supervisor. Por lo tanto, cuando el Supervisor recibe el heartbeat deberá responder a él mandándolo de vuelta.

"*FLAGWRITE*" es una variable booleana que cambia de '0' a '1' cada vez que se produzca un flanco de subida en el botón "TX" (botón de transmisión principal. Véase apartado 4.3) y vuelve a cambiar a '0' tras realizar el envío.

Para la realización del envío se emplea la función "*CAN\_WRITE*" de la librería del protocolo. Los parámetros de entrada y entrada-salida de la función de escritura son los mismos que los de la función *CAN\_READ* (apartado 4.2.1)

```
void CAN_Write (uint8_t Channel, void *MessageBuffer, void *Timestampbuffer);
```

<sup>11</sup> Los argumentos de *CAN\_READ* que aparecen de izquierda a derecha en el prototipo de la misma se muestran aquí de arriba abajo en el mismo orden.

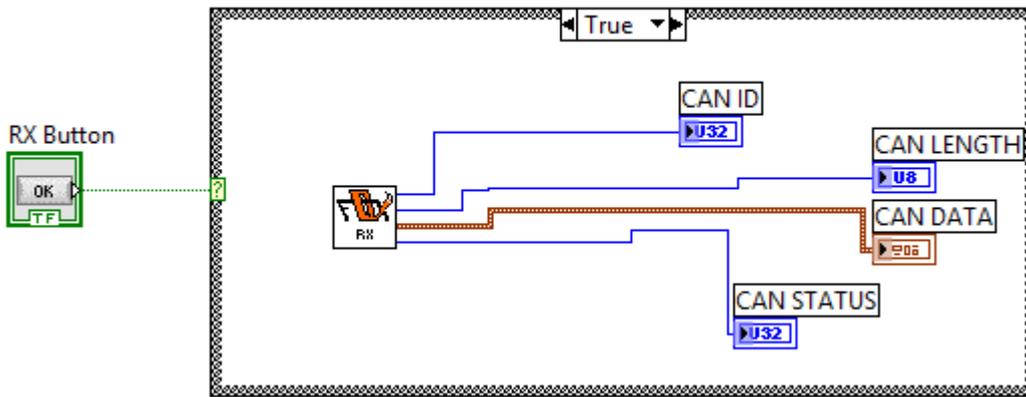


Figura 4-9: Bucle Principal. Lectura de datos.

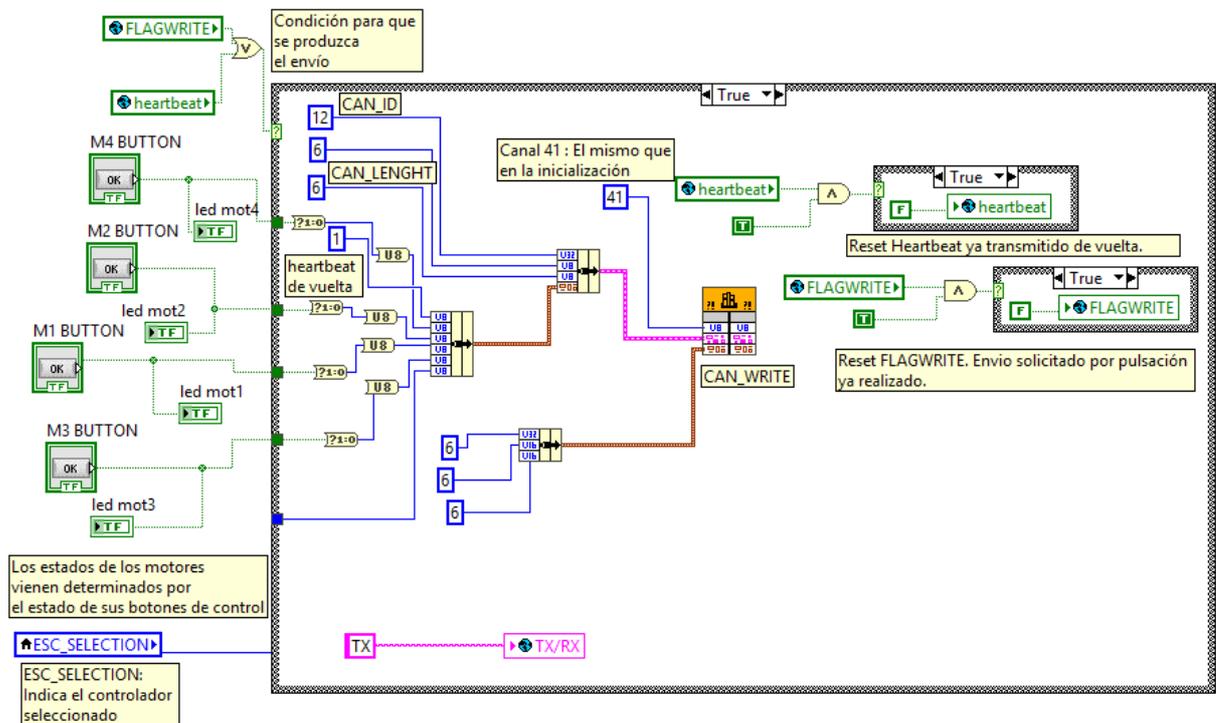


Figura 4-10: Envío Primario. Bucle Principal

3.3. **Envío Secundario.** Este envío se encarga de la transmisión de los parámetros ajustables del controlador que esté activo. Se enmarca dentro de una estructura condicional cuya única condición es que se detecte una pulsación en el botón "Modificar Parámetros" (Existe uno para cada controlador. Ver apartado 4.3) o "TX". Dentro de la estructura condicional se establece otra estructura condicional que permite seleccionar los parámetros a transmitir en función del controlador que esté activo. Esos parámetros son de tipo double por lo que necesitan ser previamente adaptados, de forma similar a como se procede en *FOX\_RXTRADUCTOR*, para poder ser transmitidos en enteros de 8 bits.

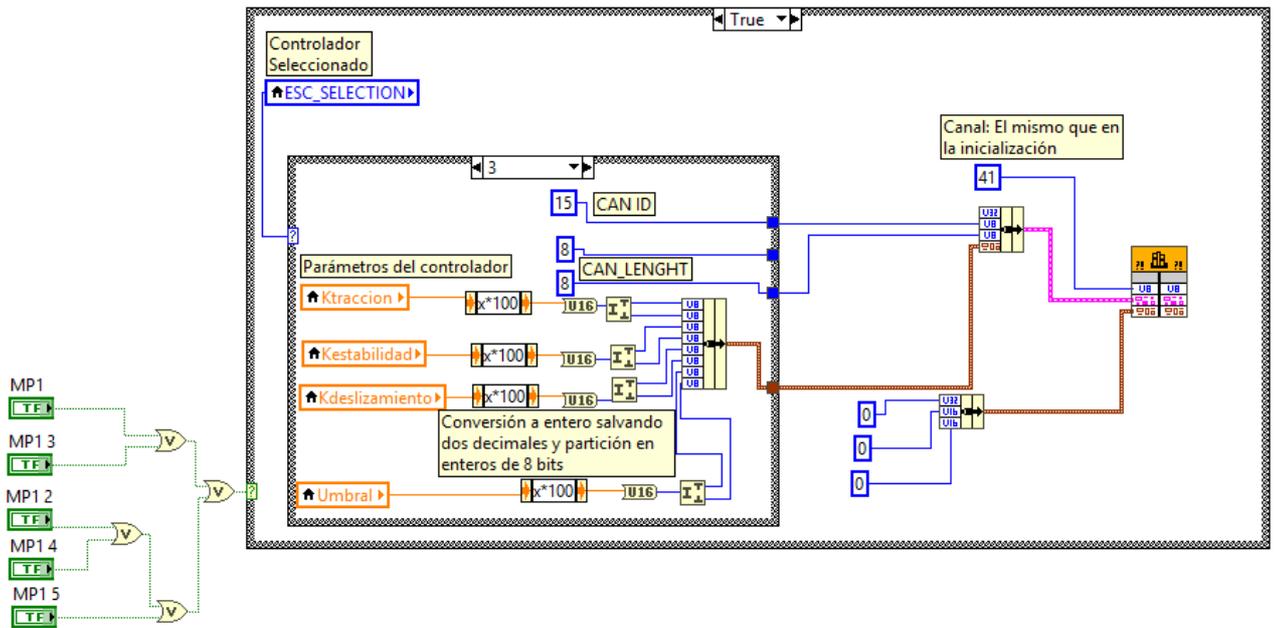


Figura 4-11: Envío Secundario. Bucle Principal

3.4. **Representación.** En este paso se realiza el volcado de los datos almacenados en el clúster global a los indicadores que aparecerán en la interfaz gráfica. Algunas de esas variables son transmitidas por la ECU y almacenadas por el clúster en unidades de voltios por lo que, previamente a su representación se realiza la conversión a las unidades de ingeniería adecuadas para esa variable. Por ejemplo, al ángulo de giro del volante se convierte de voltios a grados sexagesimales.

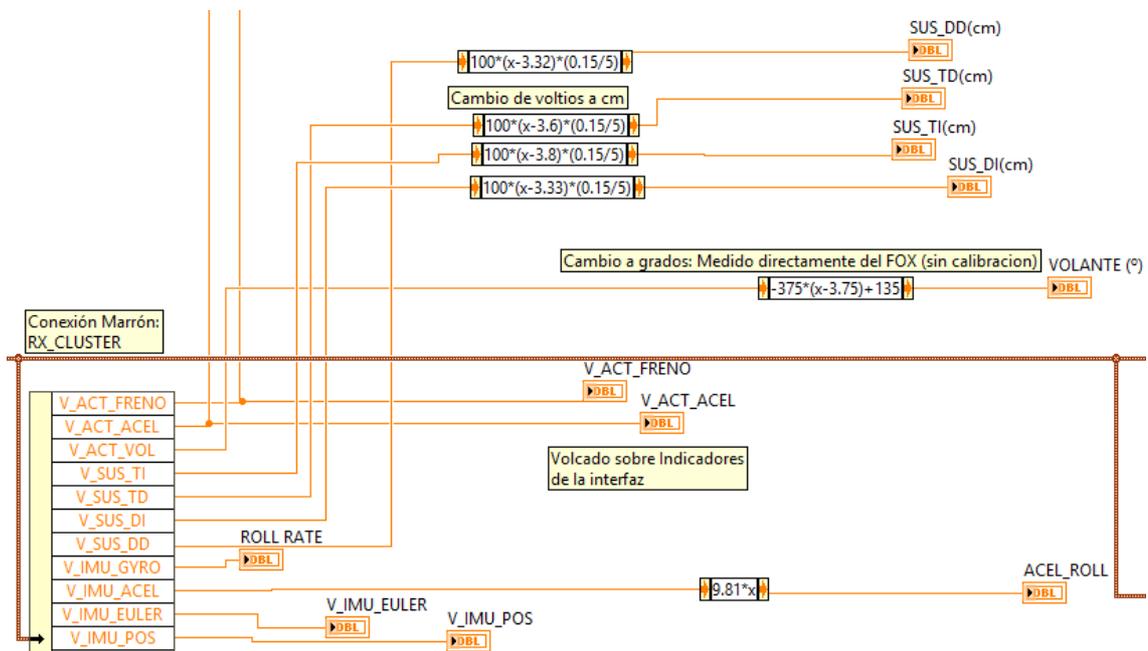


Figura 4-12: Parte de la fase de representación. Bucle Principal

4. **Salir.** Tras pulsar STOP, en el último paso de la estructura secuencial apilada, el bloque mostrado en la Figura 4-13 se encarga de cerrar automáticamente la interfaz.



Figura 4-13: Bloque *EXIT LABVIEW*.

#### 4.2.2.1 Recepción de parámetros enviados por el Supervisor en la ECU

Para almacenar correctamente los parámetros recibidos del Supervisor, se define en la ECU una estructura de datos global que permita utilizarlos en diferentes hilos del programa que se ejecuta. De igual forma, se han declarado los identificadores (ID) de cada grupo de datos mandados por el Supervisor para poder identificarlos, así como se ha programado el proceso de recepción y de conversión de los datos de enteros de 8 bits a su formato original en el hilo del programa dedicado a la comunicación con el supervisor. Todo esto se desarrolla en [16].

### 4.3 La Interfaz. Estructura externa del Supervisor

En lo que respecta a la parte externa de la aplicación del Supervisor, esta está estructurada en 6 ventanas apiladas: FOX, ESC, MOTORES, BMS, CAN y ERRORES.

Por defecto, la conmutación de estas ventanas se realiza mediante las pestañas mostradas en la Figura 4-14. Sin embargo, esta opción puede resultar algo incómoda para utilizarlas en un coche en movimiento y en una pantalla táctil de reducidas dimensiones. Por ello, se ha optado por cambiarlas por botones de mayor tamaño (Figura 4-15).



Figura 4-14: Pestañas por defecto para el cambio de ventana activa.

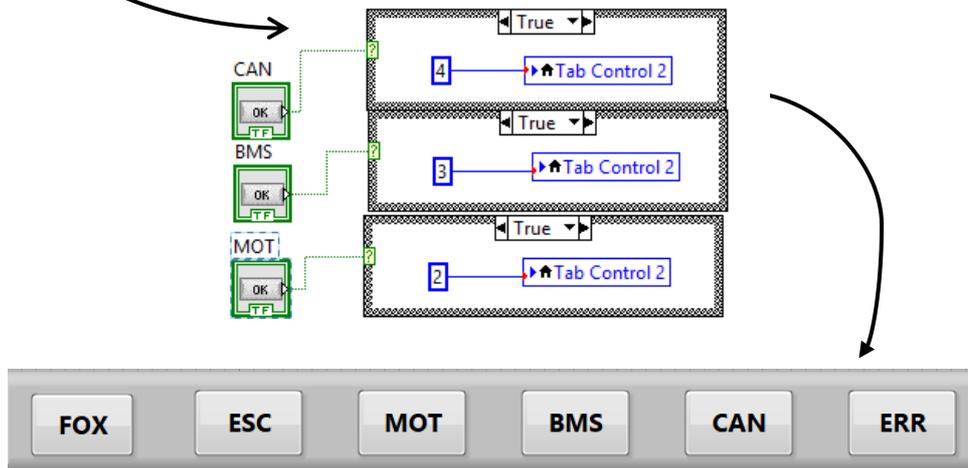


Figura 4-15: Programación (parte) para la conmutación de ventanas (Arriba)<sup>12</sup>. Botones en la interfaz (Abajo)

<sup>12</sup> La activación de los distintos botones actúan sobre la variable TAB CONTROL 2 la cual conmuta automáticamente entre las distintas ventanas. Cada ventana tiene asociado un número de TAB CONTROL 2

La ventana FOX representa los datos generales del coche (Freno, acelerador, volante, posición, velocidad, aceleración...).

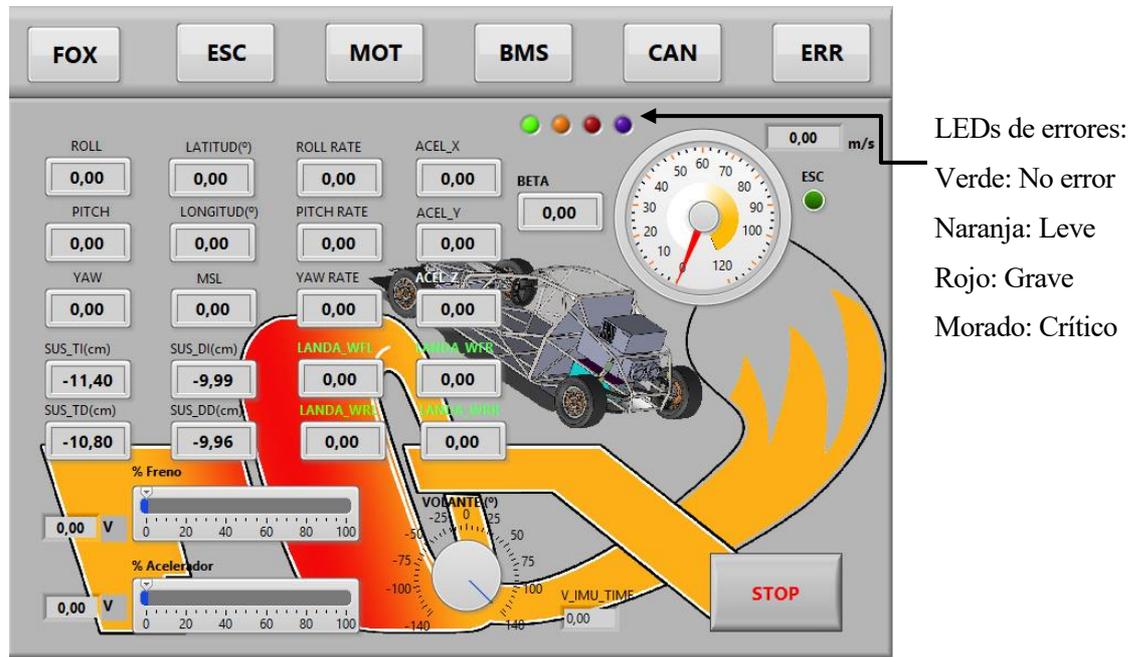


Figura 4-16: Ventana FOX. (Valores iniciales)

La ventana BMS representa todos los datos relacionados con la batería (tensión, temperatura, estado de carga...).

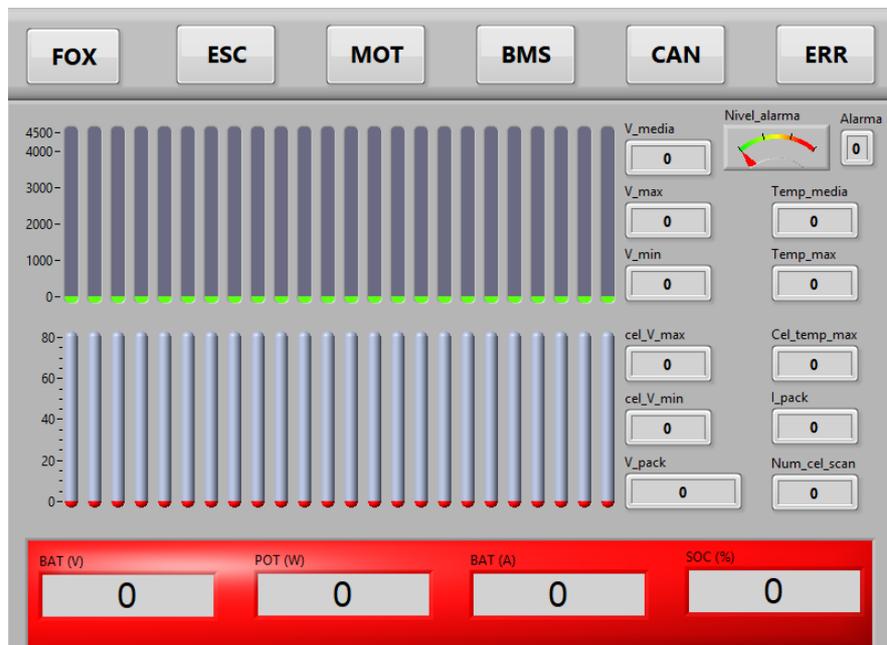


Figura 4-17: Ventana BMS. Barras en verde: Tensión celdas. Barras en rojo: Temperatura celdas

La ventana **MOTORES** representa todos los datos relacionados exclusivamente con los motores. Se organiza a su vez en 4 ventanas apiladas (Datos generales, Datos del eje delantero, Datos del eje trasero, Estabilidad<sup>13</sup>).

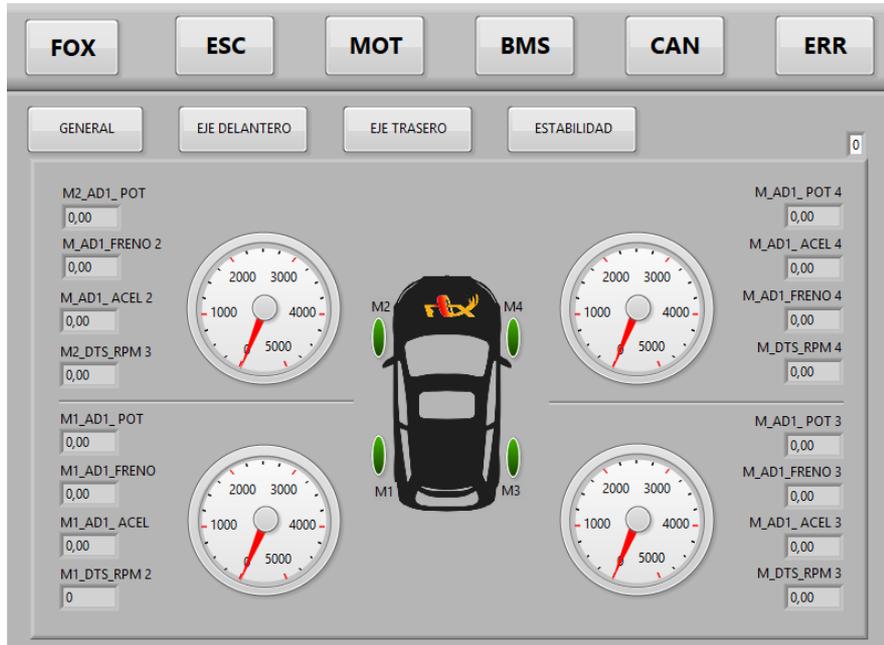


Figura 4-18: Ventana MOT. (General). Las otras ventanas solo contienen el resto de indicadores.

La ventana **ERRORES** permite monitorizar los distintos errores detectados en la ECU.

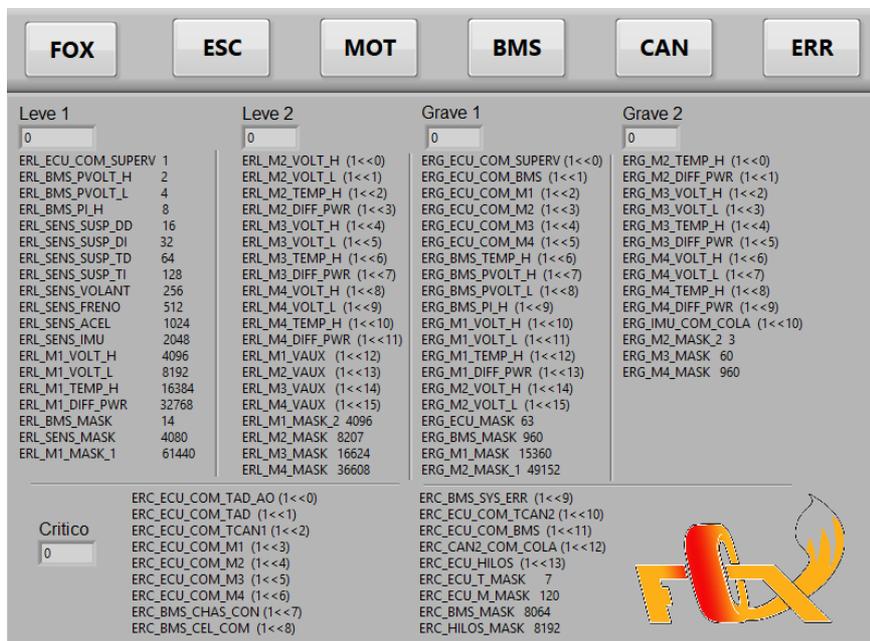


Figura 4-19: Ventana ERR. Cada indicador de error tiene asociado una leyenda para su interpretación.

La ventana **CAN** permite monitorizar el estado de la comunicación. Para ello muestra, entre otras cosas, el estado del buffer de recepción y el estado de operación del bus (Si está recibiendo o transmitiendo datos). En esta ventana se encuentra el botón **de recepción (RX)**, utilizado para habilitar la recepción de datos de la ECU.

<sup>13</sup> La Ventana "Estabilidad" son realmente datos de velocidades del coche y de las ruedas. Se sitúan en la ventana Motores para evitar el reajuste del tamaño de los indicadores en la ventana FOX y que quedaran demasiado pequeños para su fácil visualización.

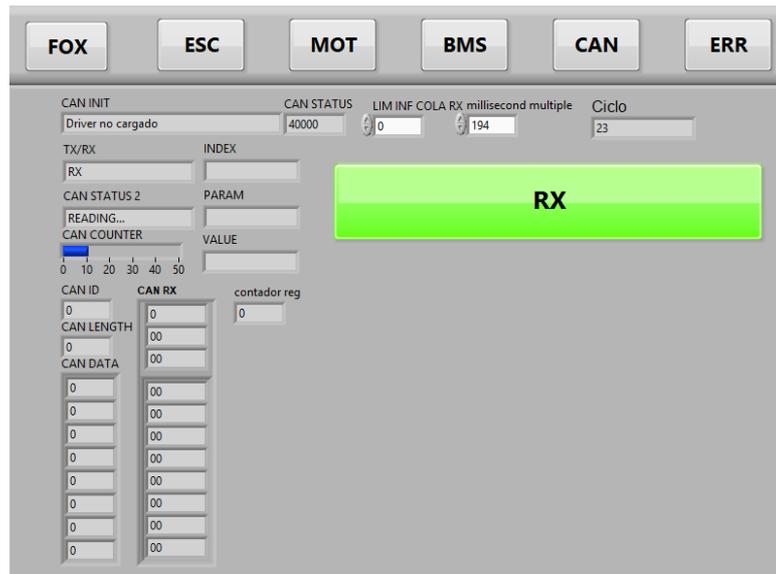


Figura 4-20: Ventana CAN.

La **ventana ESC** es la que permite al operario actuar sobre el control de tracción y estabilidad del vehículo. En ella se distinguen varios objetos:

- **Botones M1, M2, M3 y M4:** Botones que permiten conmutar el estado de los motores (ON/OFF)
- **Botón ESC OFF/ESC ON:** Permite habilitar/deshabilitar el control de tracción y estabilidad. Si está deshabilitado la ECU realizará un reparto equitativo del par demandado por el conductor.
- **Botón de transmisión principal (TX):** Utilizado para el envío del heartbeat, estado de los motores (ON/OFF) y tipo de control activo.
- **Controladores:** cada controlador tiene su propia ventana. Estas ventanas están superpuestas al igual que las del Supervisor en sí (FOX, BMS, ESC..) y las pestañas por defecto han sido sustituidas por los botones MPC, PI, GANANCIAS, FUZZY, PROPORCIONAL y ELIPSOIDE que, habilitado el control de tracción y estabilidad, permiten seleccionar las distintas estrategias de control.
- **Parámetros ajustables:** Cada parámetro puede ser ajustado utilizando los pequeños botones “Add” y “Remove” o la barra deslizante (para utilizarla deberá activarse el botón “APROX”). El botón “Modificar parámetros” permite la transmisión de los mismos a la ECU.

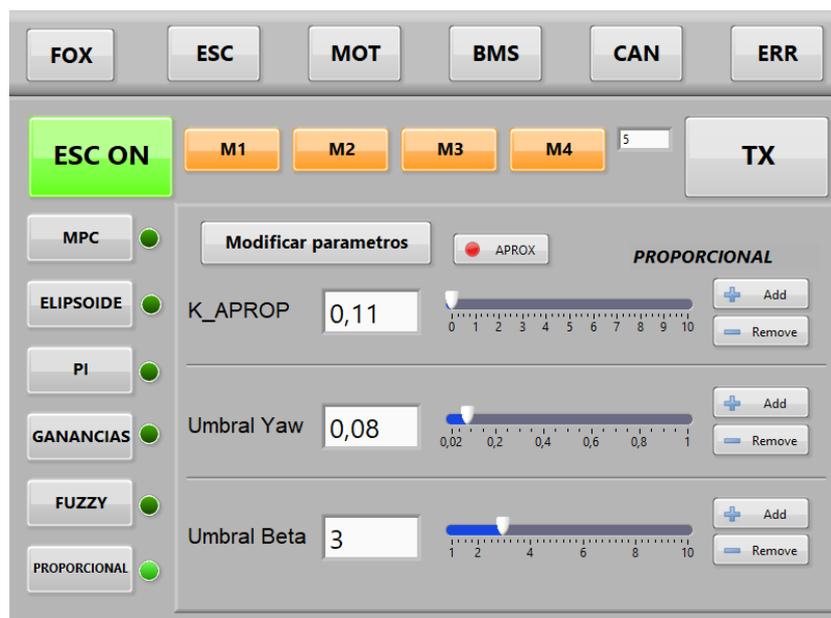


Figura 4-21: Ventana ESC. (Controlador Ganancias Activo)



# 5 PRUEBAS

En el presente capítulo, se describirá la implementación de algunos de los controladores introducidos en el apartado 2.3 sobre un modelo real del vehículo eléctrico con motores en rueda (el vehículo FOX). En concreto, se tratarán:

- Control basado en Lógica Difusa (apartado 2.3.2)
- Control Proporcional con dos modos de operación (apartado 2.3.3)
- Control PI de estabilidad, sin aplicación de capa control de tracción (apartado 2.3.6)

Tal como se mencionó en los objetivos del proyecto, la implementación del resto de estrategias de control se trata en [16].

## 5.1 Descripción de las pruebas a realizar

Para todas las pruebas de conducción realizadas con el FOX se dispone de la pista de pruebas mostrada en la Figura 5-1. Se encuentra situada en la zona de laboratorios de la Escuela Técnica Superior de Ingeniería de la Universidad de Sevilla y tiene unas dimensiones aproximadas de 16 metros de ancho y 70 metros de largo. Cabe destacar que se trata de una pista en la que los neumáticos del FOX tendrán menos agarre que en una superficie asfaltada.



Figura 5-1: Pista de pruebas disponible<sup>14</sup>

En primer lugar, se realizarán unas pruebas preliminares para evaluar la implementación de los distintos controladores con el objetivo de comprobar si necesitan alguna modificación (a nivel de programación) y así reproducir lo más fielmente posible, las estrategias de control planteadas.

Con las versiones definitivas de los controladores, se procederá a someter a cada uno de ellos a diferentes maniobras que fueren situaciones en las que sea necesaria su actuación para corregir la estabilidad del vehículo y/o evitar la pérdida de tracción de las ruedas.

<sup>14</sup> <https://www.google.com/maps/> [Consultado el 24 de junio de 2019]

Con esto, se pretende ajustar *in situ* los parámetros más relevantes de cada uno de los controladores de forma que consigan sacarle el máximo partido al mismo.

Por último, con todas las estrategias de control optimizadas por igual, se realizarán una batería de pruebas en las que se repetirán las mismas maniobras con el objetivo de comparar su acción tanto *in situ* como posteriormente mediante los datos volcados por la ECU.

A excepción de las pruebas preliminares, el resto de pruebas harán uso de las maniobras expuestas en los apartados 5.1.1 y 5.1.2.

### 5.1.1 Maniobra de doble cambio de carril. ISO 3888-2

La primera de las maniobras que utilizaremos durante las pruebas será la maniobra de doble cambio de carril (también denominada “Maniobra de esquivar”). Su versión normalizada se encuentra recogida en la norma ISO 3888-2. El trazado de la maniobra puede observarse en la Figura 5-2.<sup>15</sup>

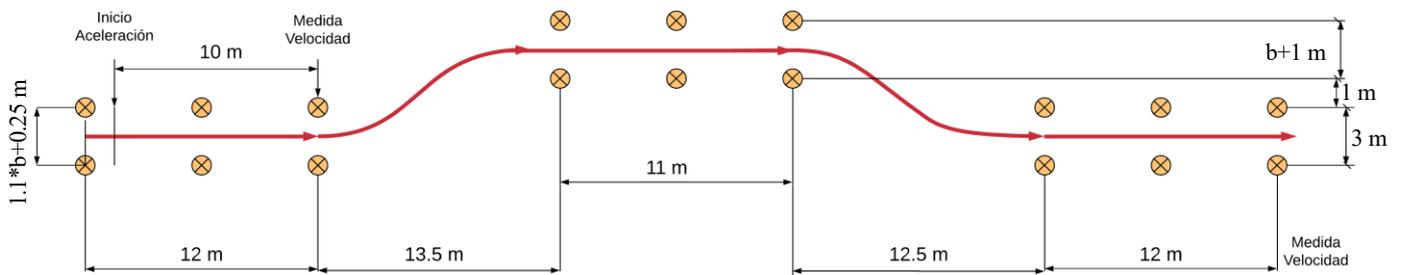


Figura 5-2: Maniobra de doble cambio de carril.

La prueba descrita en la norma, establece que el piloto debe acelerar en el punto “Inicio Aceleración” y liberar el pedal en el primer punto de “Medida Velocidad”. La trayectoria debe realizarse sin accionar ninguno de los dos pedales. La prueba se considerará satisfactoria siempre y cuando la velocidad de partida sea mayor que 60 km/h y no se derribe ningún cono durante el trazado. Este tipo de pruebas permite evaluar la acción del sistema de estabilidad ante una maniobra de emergencia como puede ser el evitar un obstáculo.

Sin embargo, durante la realización de la maniobra con el FOX, por condiciones de seguridad en la pista de pruebas disponible, no se seguirá estrictamente lo establecido en la norma. La velocidad no superará los 25 km/h y se asemejará más a un adelantamiento que a una maniobra de esquivar para que así pueda evaluarse adecuadamente la acción del controlador.

### 5.1.2 Prueba SKIDPAD de Formula Student

La Fórmula Student (o fórmula SAE) es una competición en la que participan estudiantes de ingeniería de todo el mundo utilizando unos vehículos monoplazas para competir en diseño, desarrollo, construcción y conducción del mismo. Durante la competición el vehículo es sometido a una serie de pruebas estáticas y dinámicas para su evaluación.

Una de las pruebas dinámicas desarrolladas es la denominada SKIDPAD y tiene como principal objetivo evaluar la habilidad de giro del vehículo, trazando para ello giros de radio constante sobre una superficie plana.

<sup>15</sup> En las medidas señaladas en la Figura 5-2 “b” se refiere al ancho del vehículo.

La prueba oficial debe realizarse sobre asfalto mojado y debe ser desarrollada como sigue [17]:

1. El conductor deberá entrar perpendicular al ocho y realizar una primera vuelta sobre el círculo de la derecha.
2. Tras completar la primera vuelta realizará una segunda vuelta sobre el mismo círculo la cual será temporizada.
3. A continuación, el piloto se moverá hacia el círculo de la izquierda para realizar otras dos vueltas de las cuales, la segunda, será temporizada.
4. Finalmente, el conductor deberá salir perpendicularmente al ocho por el extremo opuesto al de entrada.

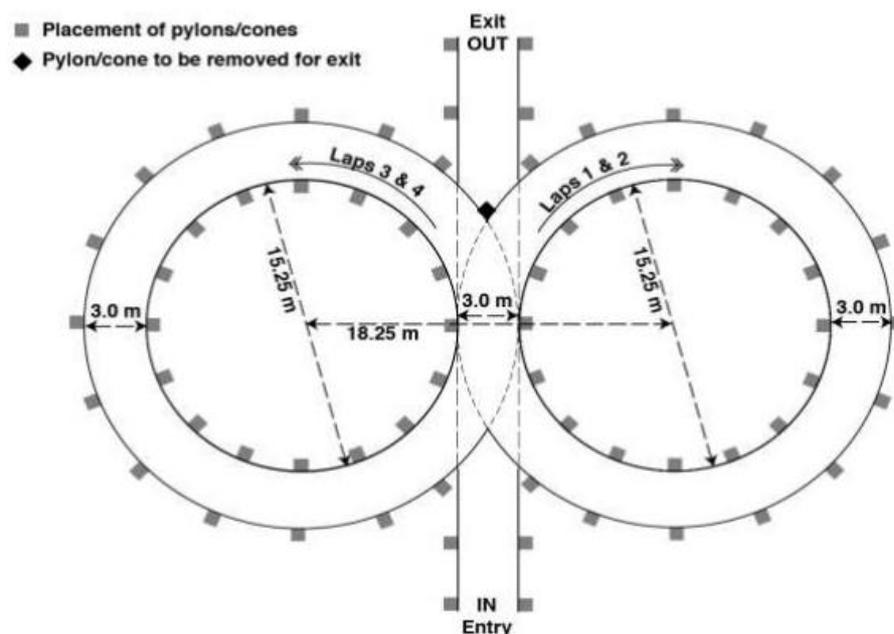


Figura 5-3: Disposición oficial de la prueba SKIDPAD.

Sin embargo, las pruebas realizadas con el FOX se llevarán a cabo con la pista de pruebas seca. Además, la condición de entrada y salida perpendicular al ocho no se considera de obligado cumplimiento ya que se prescindirá de la mayor parte del balizamiento mostrado en la Figura 5-3, resultándonos irrelevante el punto de entrada. Por cuestiones de espacio, ambos círculos se dispondrán con un radio exterior de unos 7m aproximadamente. No se considerará imprescindible el orden en el que se realicen los círculos pudiendo empezar con el trazado del derecho o izquierdo. Por último, tanto en su realización sin un control de estabilidad y tracción como usando las diferentes estrategias ya mencionadas, se tratará de mantener la velocidad en torno a unos 20 km/h.

A pesar de lo anterior, la prueba permitirá evaluar correctamente la acción del sistema de estabilidad y control en una trayectoria curvilínea mientras el piloto intenta mantener la velocidad lo más constante posible. Los resultados de la prueba dependerán en mayor medida de la respuesta del vehículo, aunque, evidentemente, el factor de experiencia del piloto también influirá en dichos resultados.

### 5.1.3 Problemática con el control del deslizamiento lateral

Durante la realización de las pruebas preliminares se obtuvieron valores incoherentes para el ángulo de deslizamiento del vehículo. Tras estudiar el problema con detenimiento se llegó a la conclusión de que el error debía estar asociado al magnetómetro de la unidad de medición inercial (IMU). El magnetómetro es utilizado por la IMU para la determinación de los ángulos de Euler del vehículo (apartado 2.1.2). La presencia del chasis metálico del FOX puede estar provocando una desvirtuación del valor de dichos ángulos.

Los ángulos de Euler son utilizados para realizar la conversión de la velocidad lineal medida por el GPS (en ejes NED<sup>16</sup>) a velocidad medida en ejes cuerpo (velocidad longitudinal y transversal). El error introducido en los ángulos de Euler se traslada a las velocidades longitudinal y transversal que son utilizadas a su vez para el cálculo del ángulo de deslizamiento.

Debido a esto, en las pruebas que se realizarán, solo se tendrá en cuenta el control de velocidad angular suponiendo, en las estrategias de control que lo necesiten, que el error del ángulo de deslizamiento ( $\beta$ ) es nulo. De igual forma, en la evaluación de los resultados no se contemplará el ángulo de deslizamiento del vehículo ni el deslizamiento individual de cada rueda (el cual también precisa indirectamente de  $\beta$ )

## 5.2 Pruebas sin control de estabilidad y tracción

En primer lugar, y con el objetivo de evaluar la acción de las diferentes estrategias de control se muestran los resultados de las pruebas realizadas sin control de estabilidad y tracción. Durante dichas pruebas, el par demandado por el conductor fue repartido de forma equitativa entre los cuatro motores.

$$Par_{rueda\ xx} = acelerador [V] \cdot relacion\ parpedal \left[ \frac{Nm}{V} \right] \quad (5.1)$$

### 5.2.1 Prueba SKIDPAD

En la Figura 5-4 puede observarse la trayectoria descrita durante la prueba. En primer lugar, se completaron las vueltas sobre el círculo representado a la izquierda en la gráfica (giro a la derecha) y posteriormente sobre el círculo derecho (giro a la izquierda). En el círculo izquierdo podemos observar más notablemente como no se consiguió mantener la misma trayectoria en ambas vueltas.

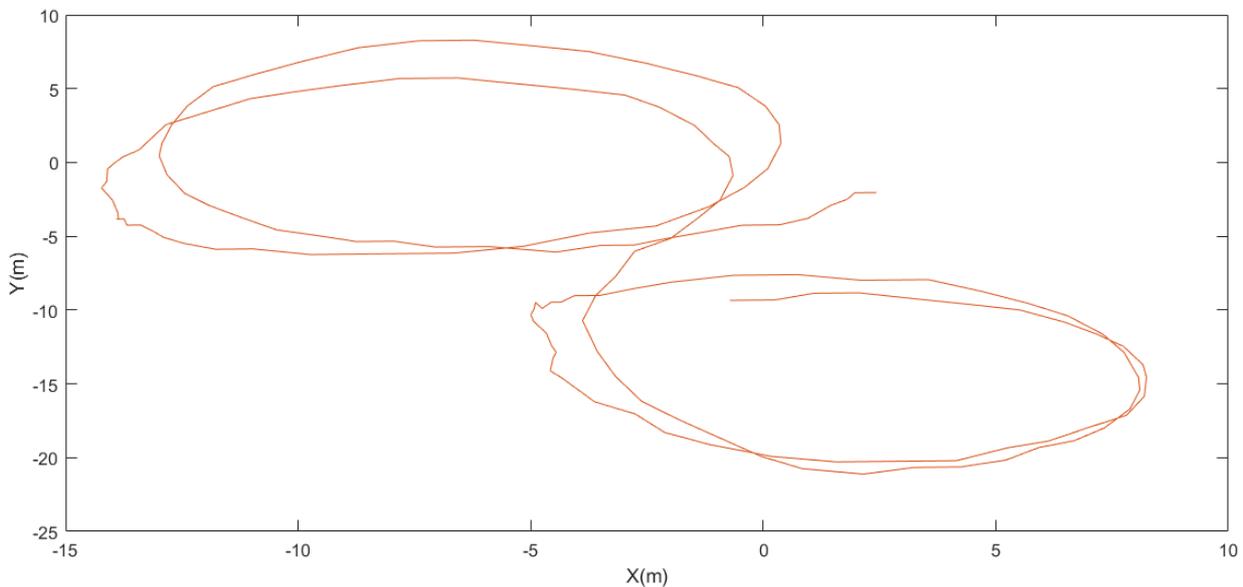


Figura 5-4: Trayectoria SKIDPAD sin control

<sup>16</sup> NED son las siglas de North, East & Down que son los ejes utilizados por el GPS para expresar la velocidad de un cuerpo.

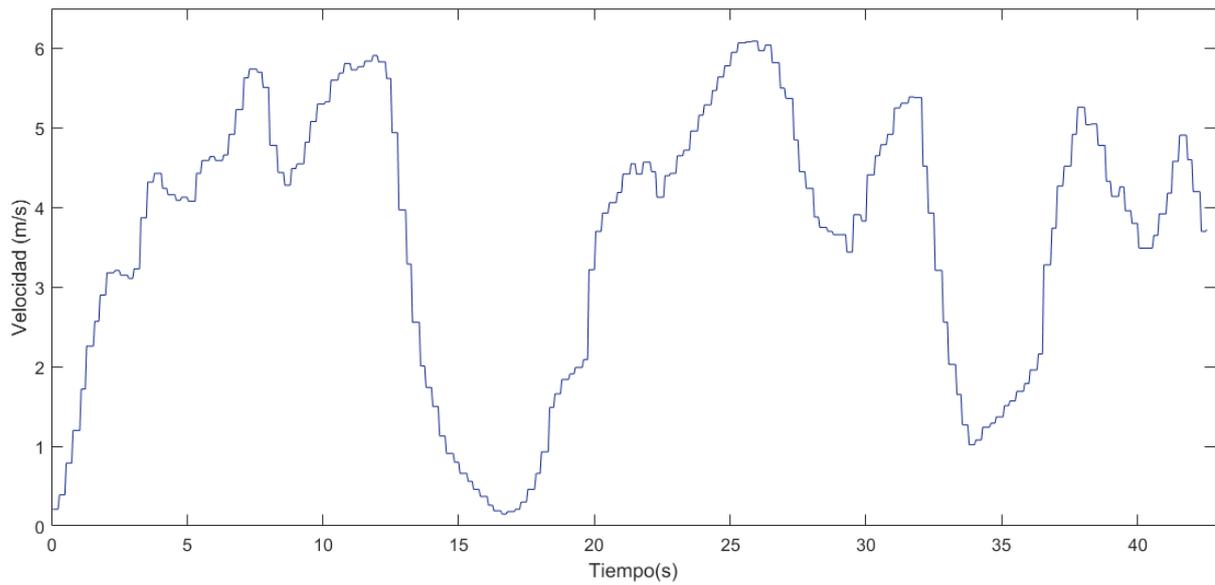


Figura 5-5: Velocidad lineal. SKIDPAD sin control

En cuanto a la velocidad, se trató de mantenerla constante en torno a los 20 km/h, sin embargo, se generaron situaciones de inestabilidad que obligaron a reducirla en un par de ocasiones para evitar colisiones tal como podemos observar en la Figura 5-5.

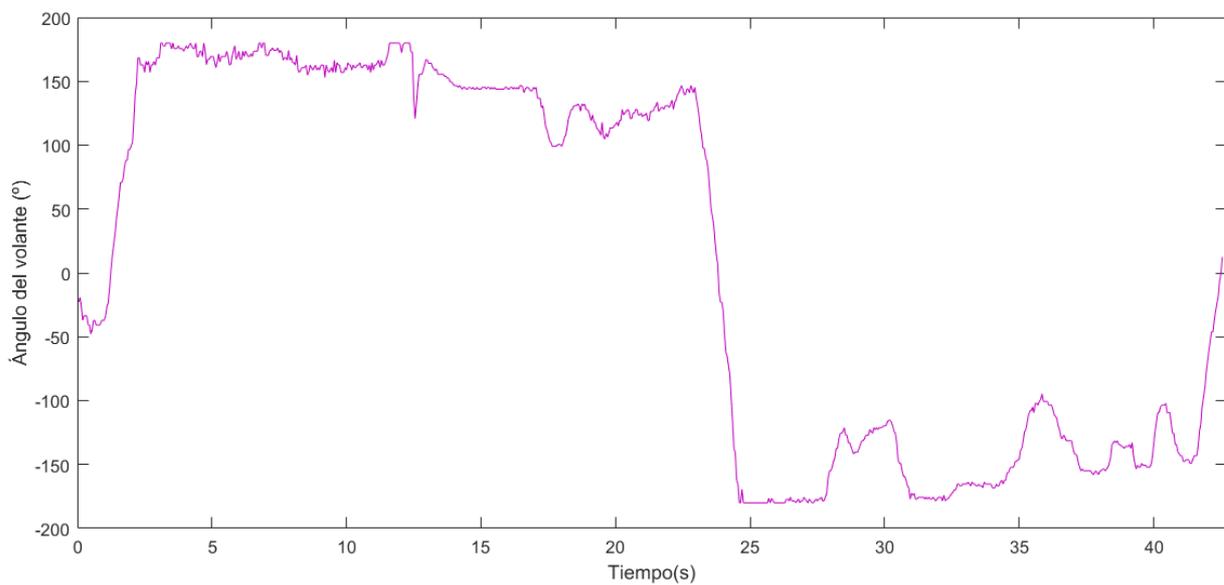


Figura 5-6: Ángulo del volante. SKIDPAD sin control

En la Figura 5-7 puede observarse la evolución del Yaw rate del vehículo junto con el Yaw rate de referencia calculado, al igual que para las estrategias de control a implementar, haciendo uso de las ecuaciones del modelo de la bicicleta. El error de Yaw rate es bastante significativo ascendiendo hasta los  $\pm 0.6$  rad/s. El error relativo a la referencia varía mayoritariamente entre el 30 y 70% aproximadamente (en algunas ocasiones asciende hasta el 100%). De igual forma, pueden observarse claras situaciones de subviraje (Yaw rate menor al deseado) y sobreviraje por igual dado que, el reparto de peso entre los ejes delantero y trasero, está bastante igualado.

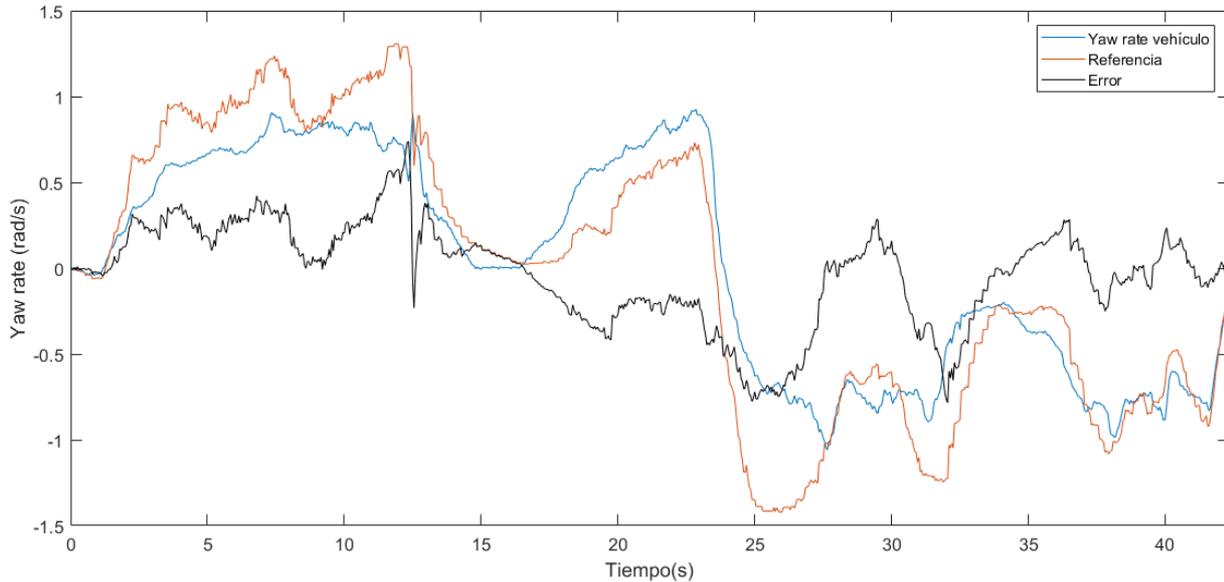


Figura 5-7: Yaw rate. SKIDPAD sin control

Finalmente, la Figura 5-8 muestra la aceleración transversal (o lateral) que sufre el vehículo la cual es del orden de los  $4 \text{ m/s}^2$  (exceptuando los dos intervalos de deceleración para evitar colisiones que han sido mencionados anteriormente)

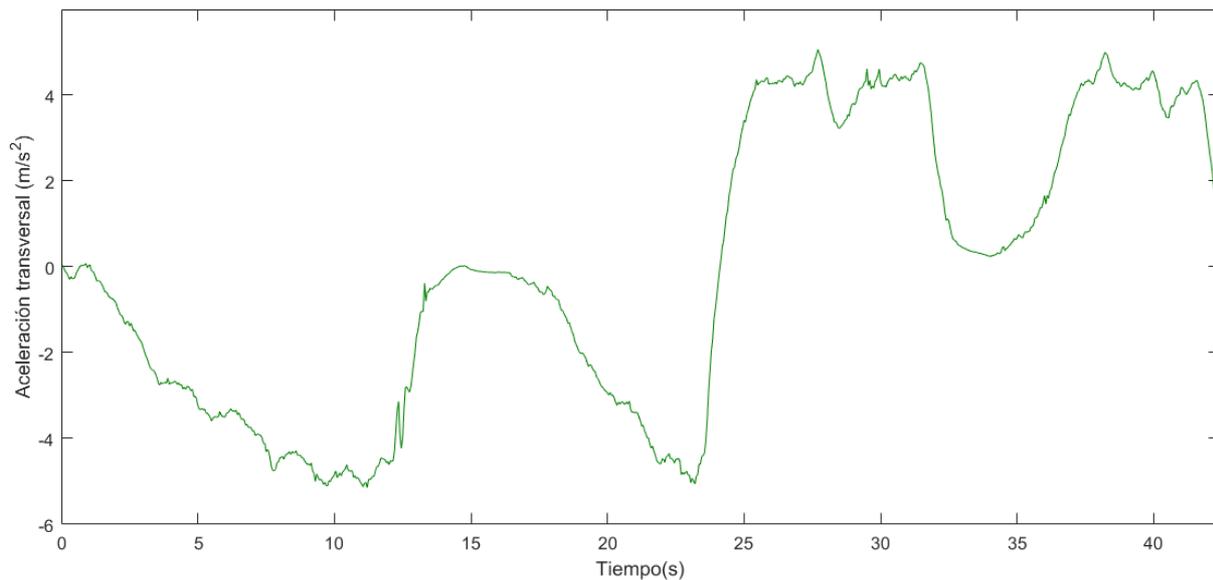


Figura 5-8: Aceleración transversal. SKIDPAD sin control

## 5.2.2 Maniobra de doble cambio de carril

En la Figura 5-9 puede observarse la trayectoria descrita por el vehículo durante esta maniobra. La forma de la maniobra, unido a que no se alcanzarán velocidades superiores a los 20 km/h hace que el seguimiento de la trayectoria marcada en la Figura 5-2 no suponga un problema incluso sin la presencia de un control de estabilidad.

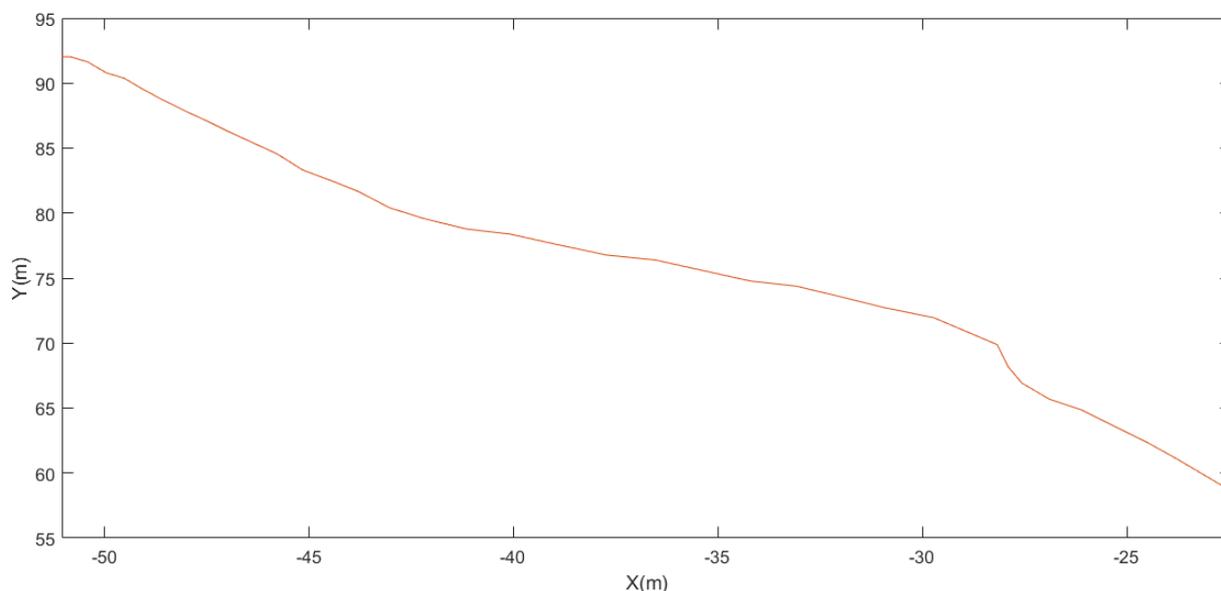


Figura 5-9: Trayectoria maniobra de doble cambio de carril. Sin control

Como ya se especificó en el apartado 5.1.1 la maniobra se asemejará más a una maniobra de adelantamiento que a la maniobra de esquiwa normalizada. Por ello se trata de mantener una aceleración constante hasta alcanzar los 20 km/h aprox tal como se manifiesta en la velocidad representada en la Figura 5-10.

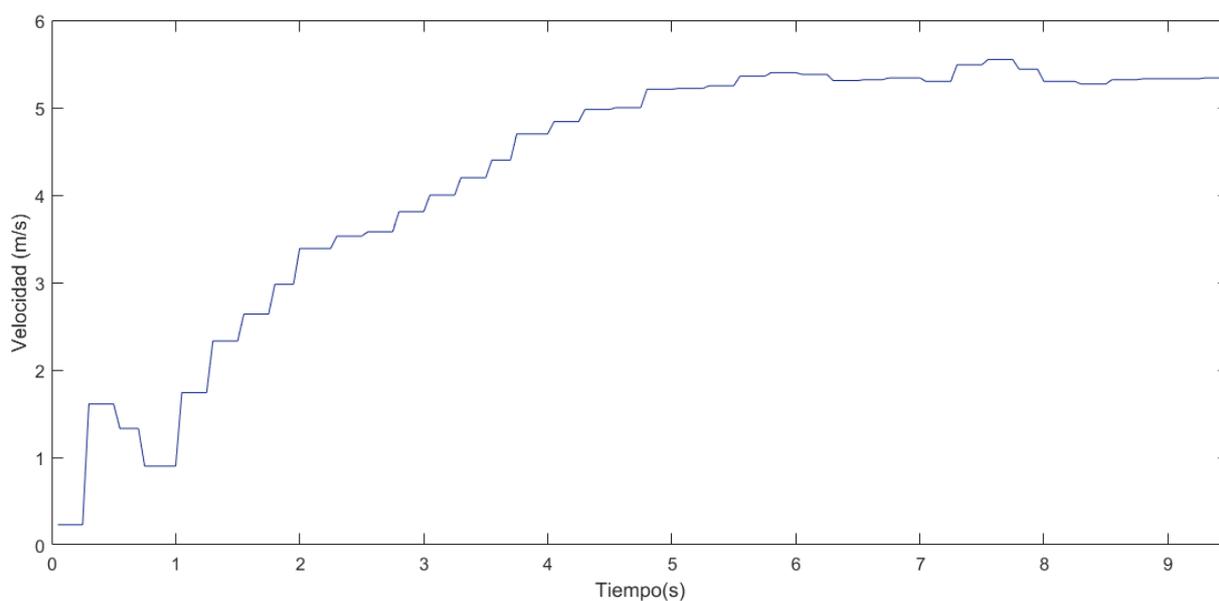


Figura 5-10: Velocidad lineal. Maniobra de doble cambio de carril sin control.

En la Figura 5-11 puede observarse la evolución del Yaw rate del vehículo. En el seguimiento de la referencia, el Yaw rate presenta un error relativo a la referencia bastante significativo que oscila mayoritariamente entre el 100 y 60 % aproximadamente (aunque se reduce en ocasiones hasta el 20%) y siendo mayor que el presentado durante la prueba de SKIDPAD. El error absoluto varía entre -0.1 y 0.4 rad/s. Dicho error, provoca una tendencia al subviraje al ser, casi en la totalidad de la maniobra, menor a la referencia marcada.

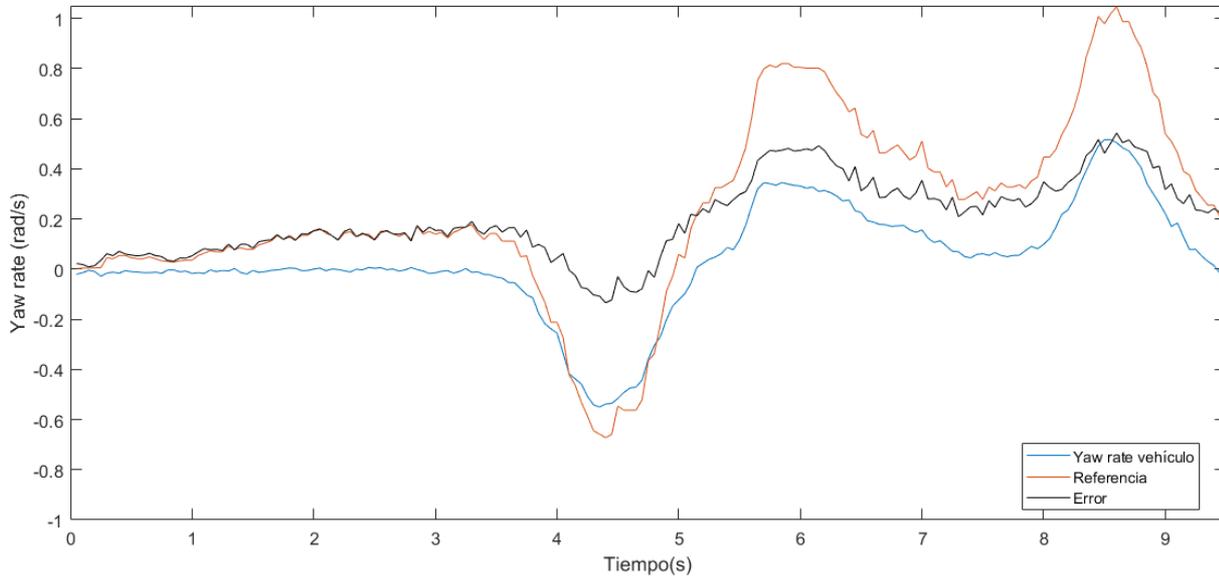


Figura 5-11: Yaw rate. Maniobra de doble cambio de carril sin control.

De cara a evaluar la actuación de las diferentes estrategias de control en la realización de esta maniobra, la Figura 5-12 representa la aceleración lateral del vehículo y en la Figura 5-13 la actuación del conductor sobre el volante.

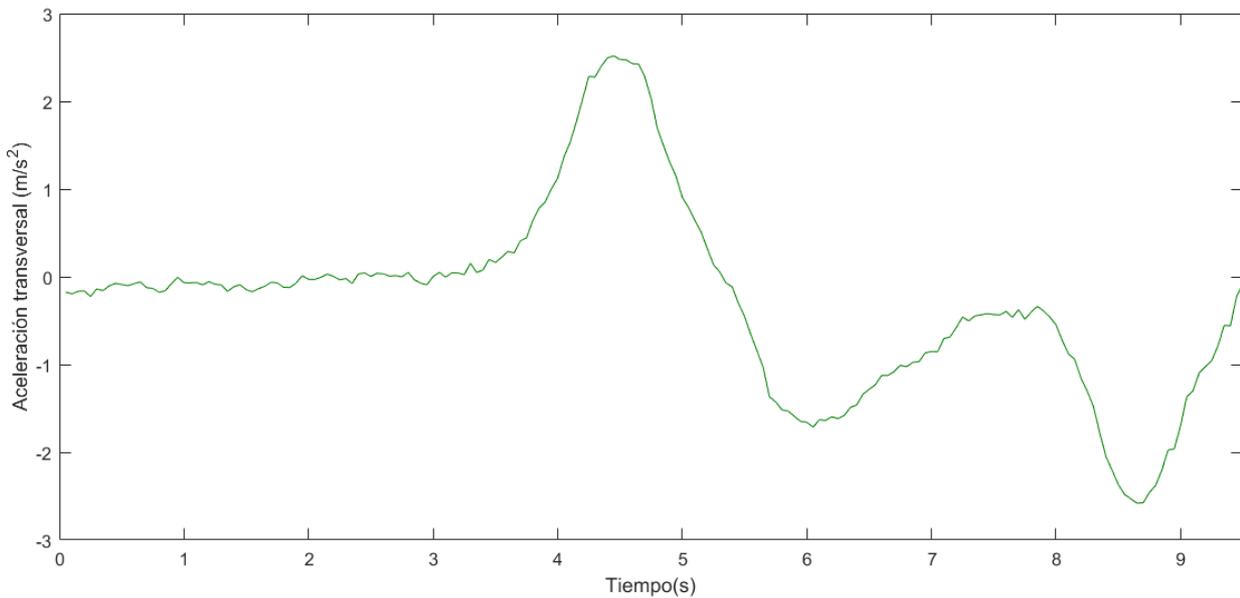


Figura 5-12: Aceleración transversal. Maniobra de doble cambio de carril sin control.

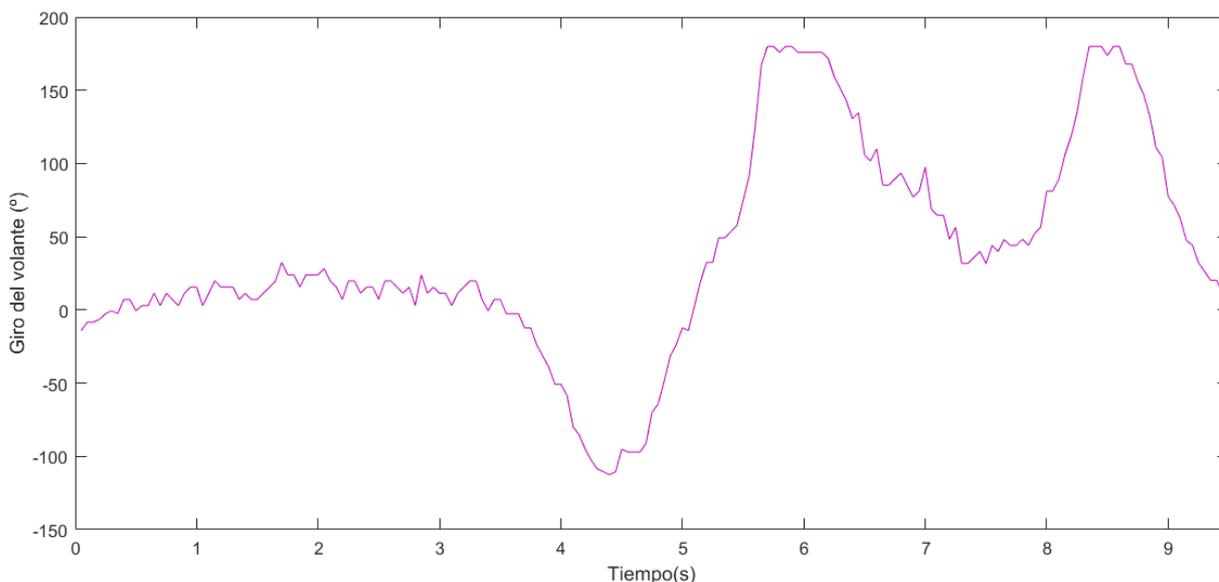


Figura 5-13: Giro del volante. Maniobra de doble cambio de carril sin control.

## 5.3 Control basado en Lógica Difusa.

### 5.3.1 Implementación del controlador

Esta estrategia de control ya disponía de un código C en el hilo de control de tracción y estabilidad de la versión 30.14 del programa que ejecuta la ECU. Sin embargo, dicha versión no reproduce fielmente el controlador descrito en [5] con lo que se ha desarrollado uno nuevo (versión 30.15) que introduce las siguientes modificaciones:

- Sustitución de los parámetros ajustables del controlador. Anteriormente estaban definidos como constantes numéricas y ahora se colocan como variables cuyo valor es recibido del Supervisor.
- Aproximación de la velocidad longitudinal del vehículo ( $v_x$ ) por el módulo (para evitar el problema descrito en el apartado 5.1.3) en el cálculo del Yaw rate de referencia
- Anulación del error en ángulo de deslizamiento ( $\beta$ ) (que es igual a la propia beta al ser la referencia  $0^\circ$ ) para no tenerlo en cuenta en el control.
- Eliminación de saturación impuesta en el momento correctivo la cual no estaba contemplada en la estrategia original de control.
- Corrección de la aplicación del par diferencial para que fuese la expuesta en [5] para este controlador.
- Corrección de un error en el cálculo de las fuerzas longitudinales sobre cada rueda que provocaba que el par máximo transmisible (MTTE) saliera muy pequeño.
- Eliminación de una condición de desactivación del controlador no contemplada en la estrategia original de control.

Esta nueva versión 30.15 fue comparada con la anterior mediante una serie de pruebas preliminares para confirmar que las modificaciones introducidas tenían un impacto positivo en la actuación del controlador.

**Código 5.1** Código para el controlador basado en lógica difusa. Las modificaciones aparecen destacadas

```

/*Referencia de Yaw Rate*/
yr_des_fuzzy=(1.00/(1.00-(MASS_FOX*(DIST_F_LX*CF
DIST_R_LX*CR)*pow(velocidad,2)))/(2.00*CF*CR*pow(DIST_F_LX*DIST_R_LX,2
))))*velocidad*(-steering_angle_filtrado[0])/(DIST_F_LX+DIST_R_LX);
//Se aproxima vx por el módulo de la velocidad.

/*Error en Yaw rate*/
error_yr_fuzzy=Yaw_rate-yr_des_fuzzy;

/*Error en el ángulo de deslizamiento (referencia=0) */

error_beta_fuzzy=0; //MODIFICACIÓN 30.15. Véase apartado 5.1.3

//Se limita el error a [-1,1]
if (fabsf(error_yr_fuzzy)>1)
    error_yr_fuzzy=sign(error_yr_fuzzy)*1;
if (fabsf(error_beta_fuzzy)>1)
    error_beta_fuzzy=sign(error_beta_fuzzy)*1;

/*Busqueda de la salida del fuzzy en la tabla*/
for (i=0;i<40401;i++)
{
    if (fabsf(error_yr_fuzzy-vec_Yaw[i])<=0.005)
    {
        ...

        if(fabsf(error_beta_fuzzy-vec_slip[i])<=0.005)
        {
            mom_norm=vec_salida[i];
            break;
        }
    }
}

/*Momento correctivo necesario (Output Scaling)*/
mom_fuzzy=K_fuzzy*mom_norm; //K_fuzzy recibida del Supervisor.
if(volante>=4.65 && mom_fuzzy>100) mom_fuzzy=100; //Saturacion mom
if(volante<=3.7 && mom_fuzzy<-100) mom_fuzzy=-100; //Saturacion mom
mom_d_fuzzy=theta_front_local*mom_fuzzy;//Momento en el eje
delantero
mom_t_fuzzy=theta_front_local*mom_fuzzy;//Momento en el eje
trasero
//theta_front_local recibida del Supervisor

/*Calculo del par correctivo a aplicar en cada rueda*/
par_di_fuzzy=mom_d_fuzzy*(DIAMETRO_WF/2.00)/DIST_F_LY+J_WF*acel_ang
_est_FL[0];
par_ti_fuzzy=mom_t_fuzzy*(DIAMETRO_WR/2.00)/DIST_R_LY;//+J_WR*acel_
ang_est_RL[0];
par_dd_fuzzy=mom_d_fuzzy*(DIAMETRO_WF/2.00)/DIST_F_LY;//+J_WF*acel_
ang_est_FR[0];

```

```

par_td_fuzzy=mom_t_fuzzy*(DIAMETRO_WR/2.00)/DIST_R_LY;//+J_WR*acel_
ang_est_RR[0];

/*Aplicación de par diferencial*/
DI=1; TI=1; DD=1; TD=1; //No Diferencial si no hay error de Yaw.
if ((Yaw_rate-yr_des_fuzzy)>0)
{
    if((Yaw_rate>0) && (yr_des_fuzzy>0))DI=-1;TI=-1;DD=1;TD=1;
    if ((Yaw_rate<0) && (yr_des_fuzzy<0))DI=-1;TI=-1;DD=1;TD=1;
    if ((Yaw_rate>0) && (yr_des_fuzzy<0))DI=1;TI=1;DD=-1;TD=-1;
    if ((Yaw_rate>0) && (yr_des_fuzzy==0))DI=-1;TI=-1;DD=1;TD=1;
}

if ((Yaw_rate-yr_des_fuzzy)<0)
{

    if((Yaw_rate>0) && (yr_des_fuzzy>0))DI=1;TI=1;DD=-1;TD=-1;
    if ((Yaw_rate<0) && (yr_des_fuzzy<0))DI=1;TI=1;DD=-1;TD=-1;
    if ((Yaw_rate<0) && (yr_des_fuzzy>0))DI=-1;TI=-1;DD=1;TD=1;
    if ((Yaw_rate<0) && (yr_des_fuzzy==0))DI=-1;TI=-1;DD=1;TD=1;
}

    /*Cálculo del par total a aplicar en cada rueda: demandado por
conductor +- correctivo*/
par_ti_fuzzy = relacion_parpedal*acelerador+TI*par_ti_fuzzy;
par_di_fuzzy = relacion_parpedal*acelerador+DI*par_di_fuzzy;
par_td_fuzzy = relacion_parpedal*acelerador+TD*par_td_fuzzy;
par_dd_fuzzy = relacion_parpedal*acelerador+TD*par_dd_fuzzy;

    /*Eliminacion de Pares Negativos*/
if (par_ti_fuzzy<=0)par_ti_fuzzy=0;
if (par_di_fuzzy<=0)par_di_fuzzy=0;
if (par_td_fuzzy<=0)par_td_fuzzy=0;
if (par_dd_fuzzy<=0)par_dd_fuzzy=0;

    /*Cálculo de las fuerzas longitudinales de cada rueda*/
/*En la versión 30.14 no se usaba el par calculado por el
controlador (correctivo+demandado)*/
fd_ti=(par_ti_fuzzy-J_WR*acel_ang_est_RL[0])/(DIAMETRO_WR/2.00);
fd_td=(par_td_fuzzy-J_WR*acel_ang_est_RR[0])/(DIAMETRO_WR/2.00);
fd_di=(par_di_fuzzy-J_WF*acel_ang_est_FL[0])/(DIAMETRO_WF/2.00);
fd_dd=(par_dd_fuzzy-J_WF*acel_ang_est_FR[0])/(DIAMETRO_WF/2.00);

    /*Cálculo del par maximo transmisible segun MTTE*/
par_ti_MTTE_fuzzy=(J_WR/(0.9*MASS_FOX*pow(DIAMETRO_WR/2.00,2))+1)*(
DIAMETRO_WR/2.00)*fd_ti;
par_di_MTTE_fuzzy=(J_WF/(0.9*MASS_FOX*pow(DIAMETRO_WF/2.00,2))+1)*(
DIAMETRO_WF/2.00)*fd_di;
par_td_MTTE_fuzzy=(J_WR/(0.9*MASS_FOX*pow(DIAMETRO_WR/2.00,2))+1)*(
DIAMETRO_WR/2.00)*fd_td;
par_dd_MTTE_fuzzy=(J_WF/(0.9*MASS_FOX*pow(DIAMETRO_WF/2.00,2))+1)*(
DIAMETRO_WF/2.00)*fd_dd;

```

```

/*Eliminación de Pares Negativos*/
if(par_ti_MTTE_fuzzy<0) par_ti_MTTE_fuzzy=0;
if(par_td_MTTE_fuzzy<0) par_td_MTTE_fuzzy=0;
if(par_di_MTTE_fuzzy<0) par_di_MTTE_fuzzy=0;
if(par_dd_MTTE_fuzzy<0) par_dd_MTTE_fuzzy=0;

/*Par a aplicar definitivo*/
par_aplicado_fuzzy[0]=minimo(fabsf(par_ti_fuzzy), fabsf(par_ti_MTTE_fuzzy), fabsf(PAR_MAX_MOT));
par_aplicado_fuzzy[1]=minimo(fabsf(par_di_fuzzy), fabsf(par_di_MTTE_fuzzy), fabsf(PAR_MAX_MOT));
par_aplicado_fuzzy[2]=minimo(fabsf(par_td_fuzzy), fabsf(par_td_MTTE_fuzzy), fabsf(PAR_MAX_MOT));
par_aplicado_fuzzy[3]=minimo(fabsf(par_dd_fuzzy), fabsf(par_dd_MTTE_fuzzy), fabsf(PAR_MAX_MOT));
if(accelerador<0.08 || fabs(error_yr_fuzzy)<0.04){
par_aplicado_fuzzy[0]=relacion_parpedal*accelerador;
par_aplicado_fuzzy[1]=relacion_parpedal*accelerador;
par_aplicado_fuzzy[2]=relacion_parpedal*accelerador;
par_aplicado_fuzzy[3]=relacion_parpedal*accelerador;
} /*Desactivacion del control*/
/*Seguridad*/
for (i=0; i<NUM_MOTORES; i++)
if (par_aplicado_fuzzy[i]>PAR_MAX_MOT)
par_aplicado_fuzzy[i]=PAR_MAX_MOT;
else if (par_aplicado_fuzzy[i]<0)
par_aplicado_fuzzy[i]=0;

/*Senhal a enviar a los motores*/
for (i=0; i<NUM_MOTORES; i++) {
senal_motores[i]=par_aplicado_fuzzy[i]/relacion_parpedal;
if (senal_motores[i]>V_MAX_MOT)
senal_motores[i]=V_MAX_MOT;}

```

Tras las pruebas preliminares para confirmar la validez de la implementación mostrada en el Código 5.1 se realizaron otra serie de pruebas para ajustar los parámetros del controlador a sus valores óptimos.

Parámetro	Valor óptimo hallado
K fuzzy (Ganancia para el escalado del momento normalizado)	275
Theta front (parámetro para el reparto del momento correctivo entre los ejes trasero y delantero)	0.5

Tabla 5-1: Parámetros ajustados del controlador basado en lógica difusa

### 5.3.2 Prueba SKIDPAD

Con los parámetros establecidos según la Tabla 5-1 se realizó una prueba de SKIDPAD para evaluar la acción del controlador frente a la ausencia del mismo (apartado 5.2.1) y poder compararlo correctamente con los otros controladores propuestos.

En la Figura 5-14 puede observarse la trayectoria descrita durante la prueba. En primer lugar, se completaron las vueltas sobre el círculo representado a la derecha en la gráfica (giro a la izquierda) y posteriormente sobre el círculo izquierdo (giro a la derecha). Con el controlador, el conductor es capaz de reproducir más fielmente las primeras vueltas durante las segundas.

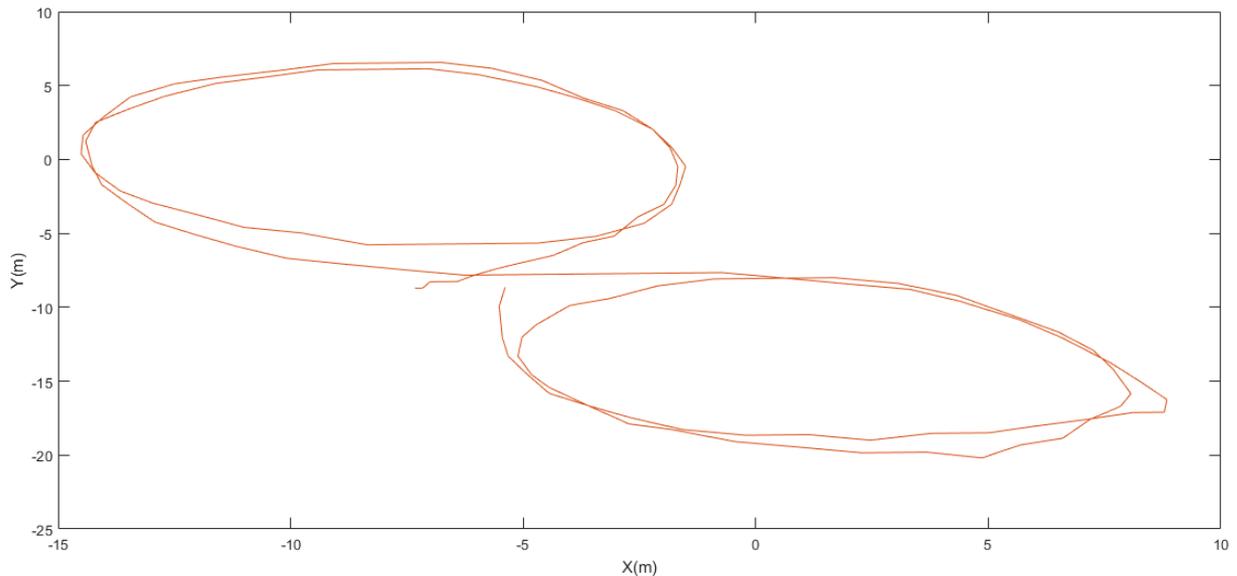


Figura 5-14: Trayectoria SKIDPAD. Control basado en lógica difusa.

En cuanto a la velocidad, se consigue mantener aproximadamente en torno a los 20km/h (Figura 5-15). Frente al caso de no emplear el controlador, también se reduce la necesidad de saturar el giro del volante ( $170^\circ$  aprox) para mantener el vehículo dentro de la trayectoria (Figura 5-16).

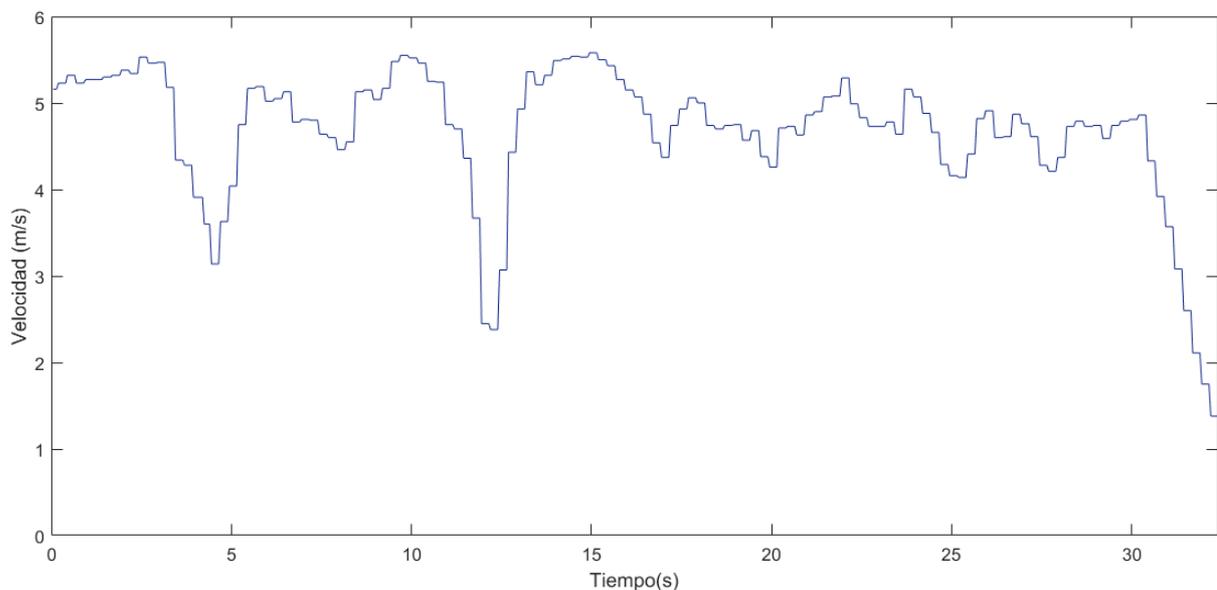


Figura 5-15: Velocidad lineal. SKIDPAD con control basado en lógica difusa

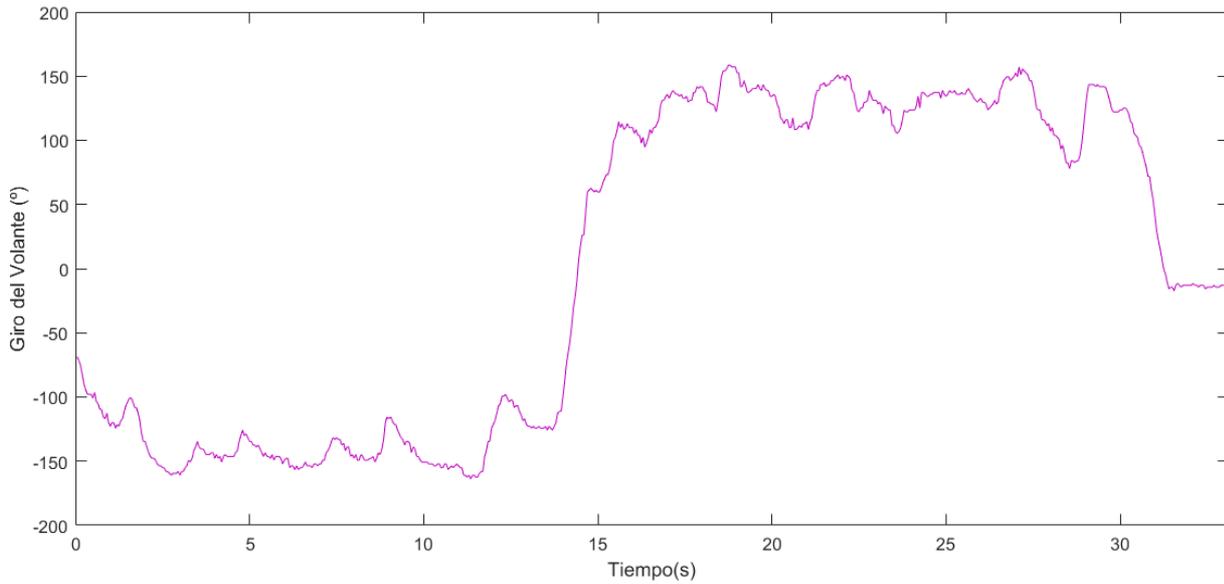


Figura 5-16: Ángulo del volante. SKIDPAD con control basado en lógica difusa

El resultado del control en Yaw rate implementado por este controlador puede verse en la Figura 5-17. En ella puede observarse que el vehículo consigue seguir razonablemente la referencia de velocidad angular impuesta, suponiendo una reducción significativa del error de Yaw rate. El error absoluto, frente al caso sin control, se reduce hasta en 0.4 rad/s (estableciéndose entre  $\pm 0.2$  rad/s). En cuanto al error relativo a la referencia se establece alrededor del 20% aproximadamente. En general, no se mantiene ninguna situación de subviraje o sobreviraje evitando pérdidas de control direccional.

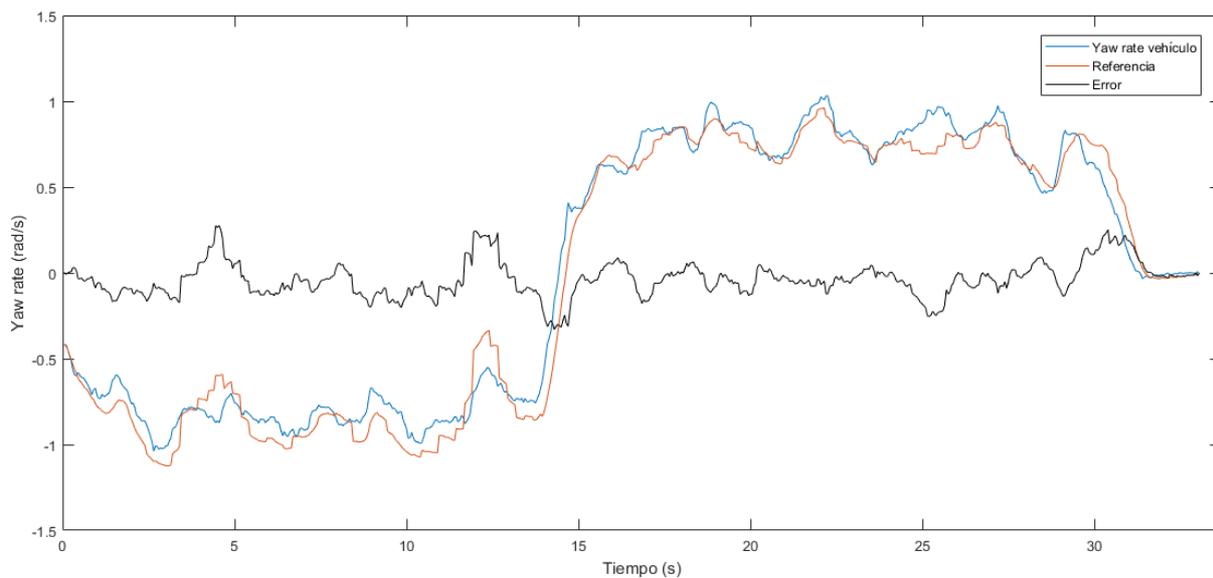


Figura 5-17: Yaw rate. SKIDPAD con control basado en lógica difusa

En cuanto a la aceleración lateral del vehículo, una acción positiva del controlador consistiría en conseguir la reducción de la misma ya que beneficiaría a la sensación de seguridad del conductor. Tal como se muestra en la Figura 5-18, no se consigue una clara reducción de dicha aceleración empleando únicamente el control en velocidad angular de este controlador, pero se mantiene en torno a los  $4 \text{ m/s}^2$ .

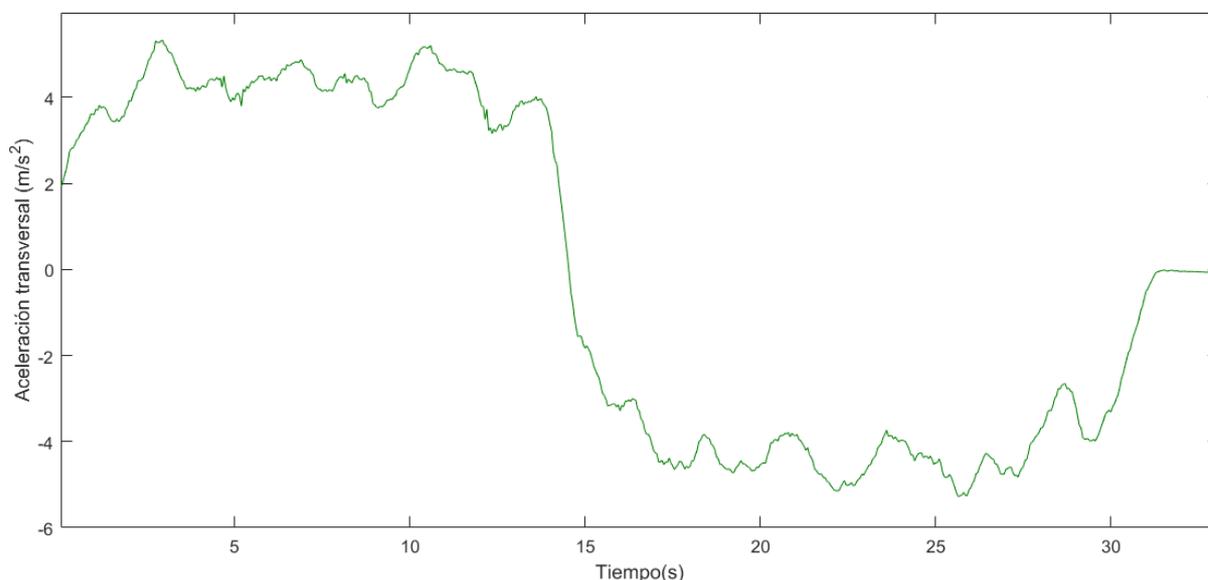


Figura 5-18: Aceleración transversal. SKIDPAD con control basado en lógica difusa

En la Figura 5-19 se muestran los distintos pares sobre la rueda delantera izquierda. En azul se representa el par corregido por el controlador, es decir, el par demandado por el conductor más el par correctivo calculado. En rojo se representa el par máximo transmisible para dicha rueda calculado por MTTE. En verde se representa el par aplicado al final, que será en cada instante, el mínimo de los dos anteriores. De esta forma, los puntos donde podemos ver solo la gráfica verde y roja se están aplicando el par corregido por el controlador y en aquellos puntos donde podemos ver solo la gráfica verde y azul el par máximo transmisible es menor que el corregido por el controlador por lo que se aplica este valor en vez del corregido. En negro se representa el par demandado por el conductor que sería el que se aplicaría sobre la rueda en el caso sin control.

Después se muestran los distintos pares para las ruedas delantera derecha (Figura 5-20), trasera izquierda (Figura 5-21) y trasera derecha (Figura 5-22). Como puede observarse, la aplicación del par diferencial propuesta en esta estrategia hace que el par aplicado sobre las izquierdas sea mayor al demandado y el de las derechas menor. Sin embargo, hay situaciones donde sería más conveniente que la aplicación del par diferencial fuera la opuesta. Por ejemplo, en torno al segundo 25 de la prueba, el vehículo está describiendo un giro a la derecha presentando una tendencia al sobreviraje (Yaw rate mayor que el de referencia) con lo que para corregir dicho sobreviraje sería más adecuado aplicar más par a las derechas que a las izquierdas lo que se traduce en que el par correctivo calculado por el controlador debería ser restado a las ruedas izquierdas y sumado a las derechas.

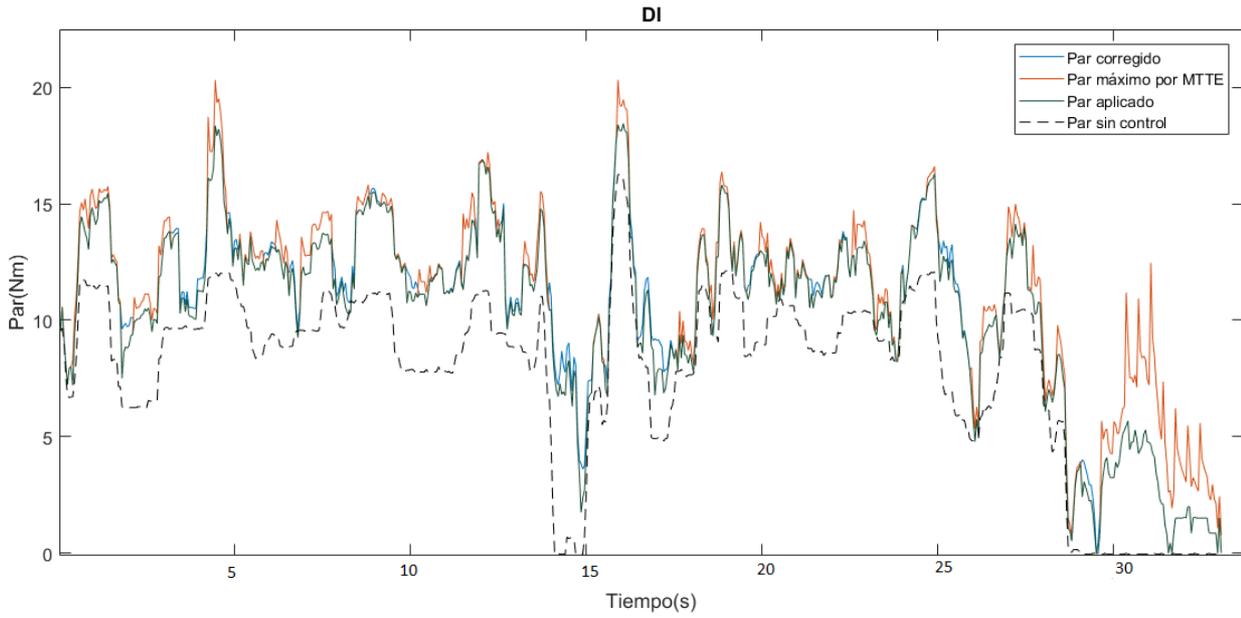


Figura 5-19: Pares sobre la rueda DI. SKIDPAD con control basado en lógica difusa

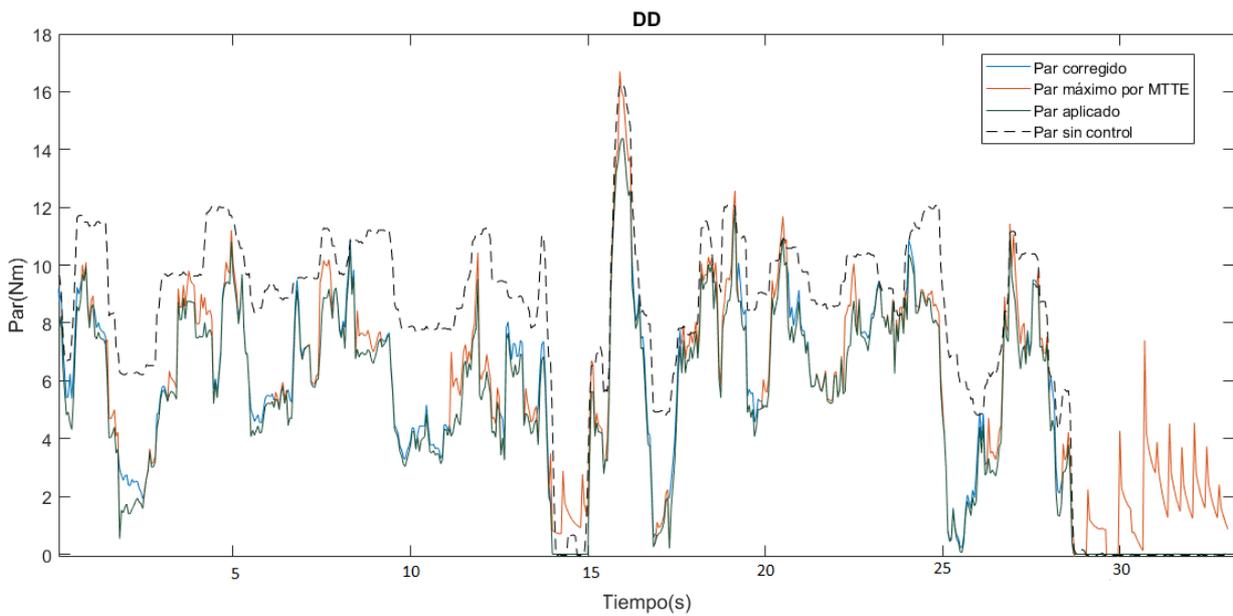


Figura 5-20: Pares sobre la rueda DD. SKIDPAD con control basado en lógica difusa

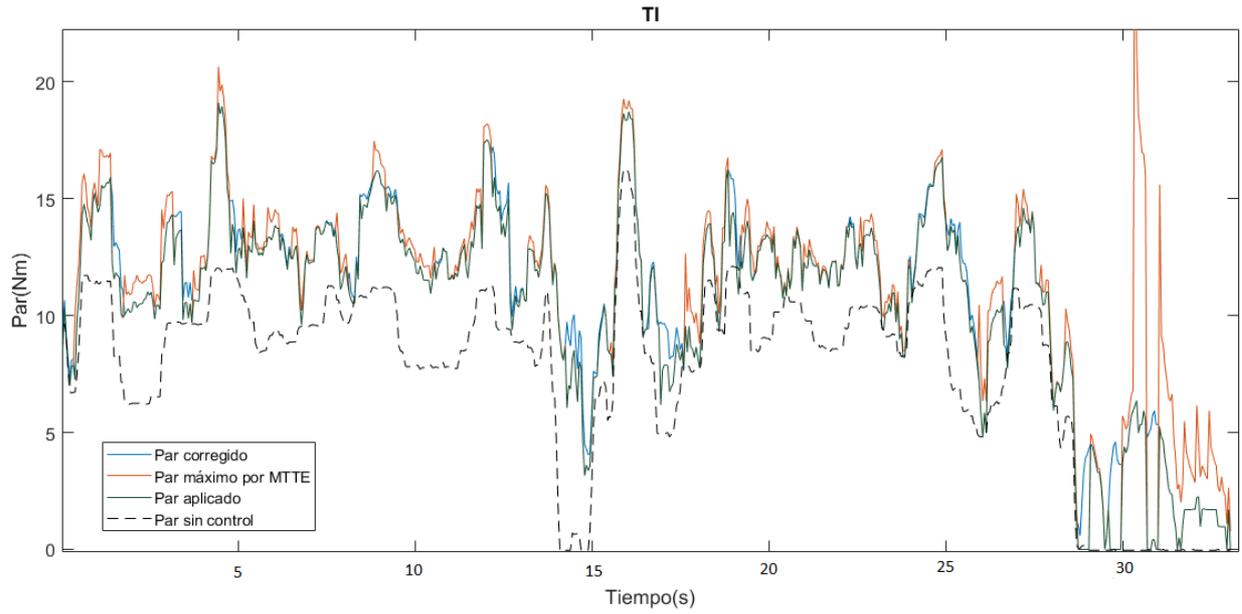


Figura 5-21: Pares sobre la rueda TI. SKIDPAD con control basado en lógica difusa

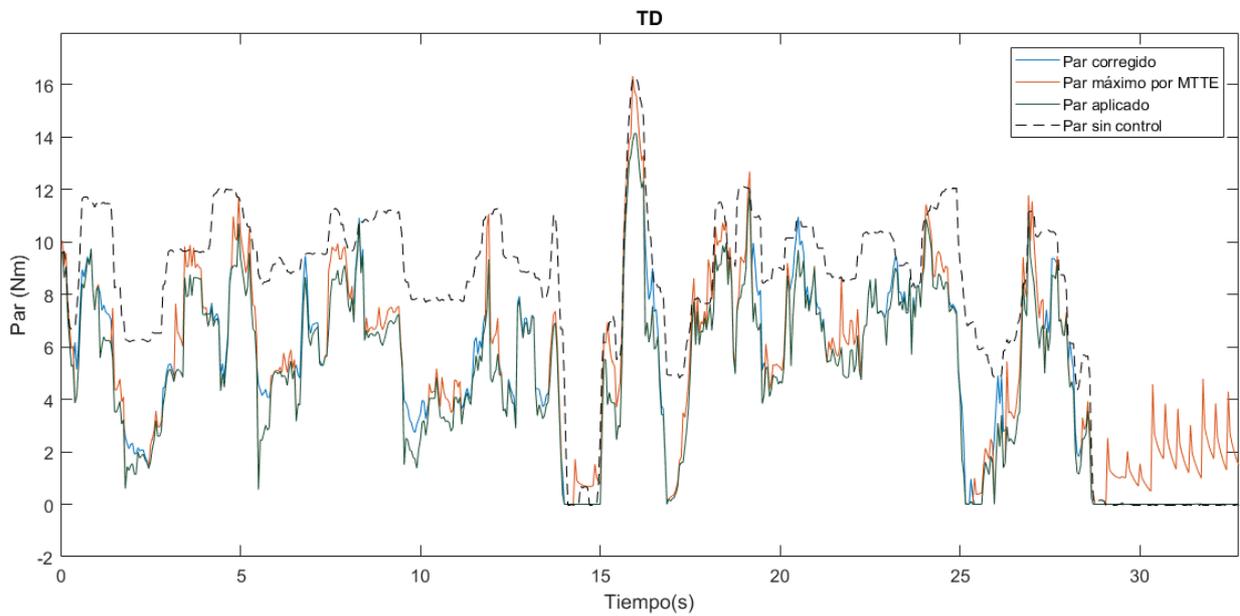


Figura 5-22: Pares sobre la rueda TD. SKIDPAD con control basado en lógica difusa

### 5.3.3 Maniobra de doble cambio de carril

Para la realización de esta maniobra de doble cambio de carril se utilizan igualmente los valores de los parámetros establecidos según la Tabla 5-1.

La Figura 5-24 junto con la Figura 5-25 muestran que la maniobra se realiza de forma similar a la realizada sin control (apartado 5.2.2). La velocidad crece prácticamente de forma lineal hasta los 20 km/h y la actuación del conductor sobre el volante sigue el perfil mostrado en la Figura 5-13 pero con giros menos pronunciados.

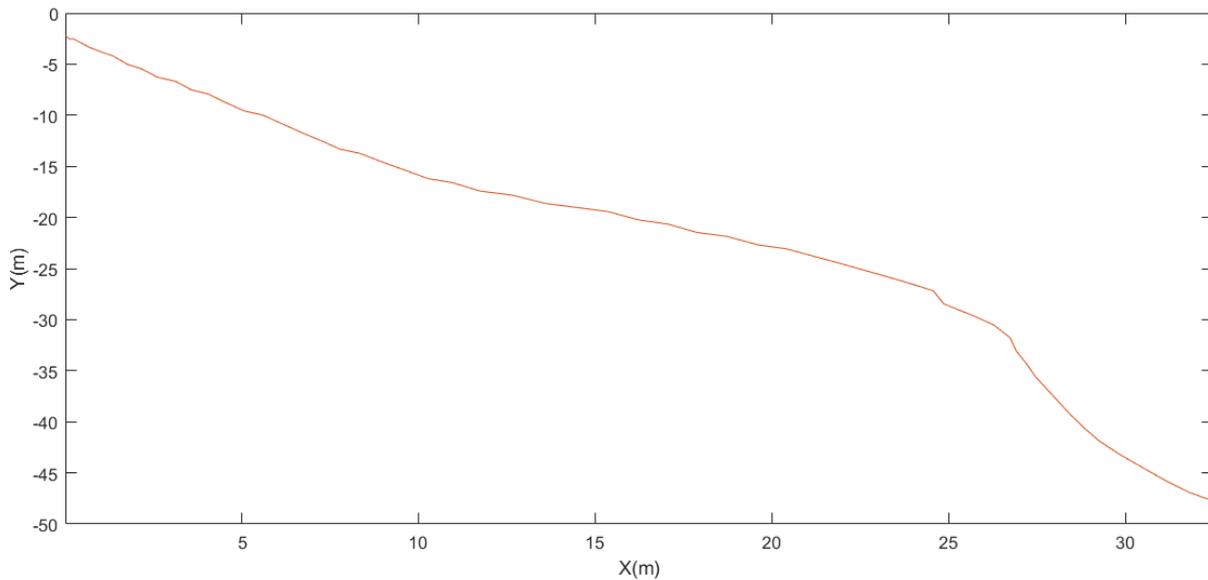


Figura 5-23: Trayectoria. Maniobra de doble cambio de carril con control basado en lógica difusa.

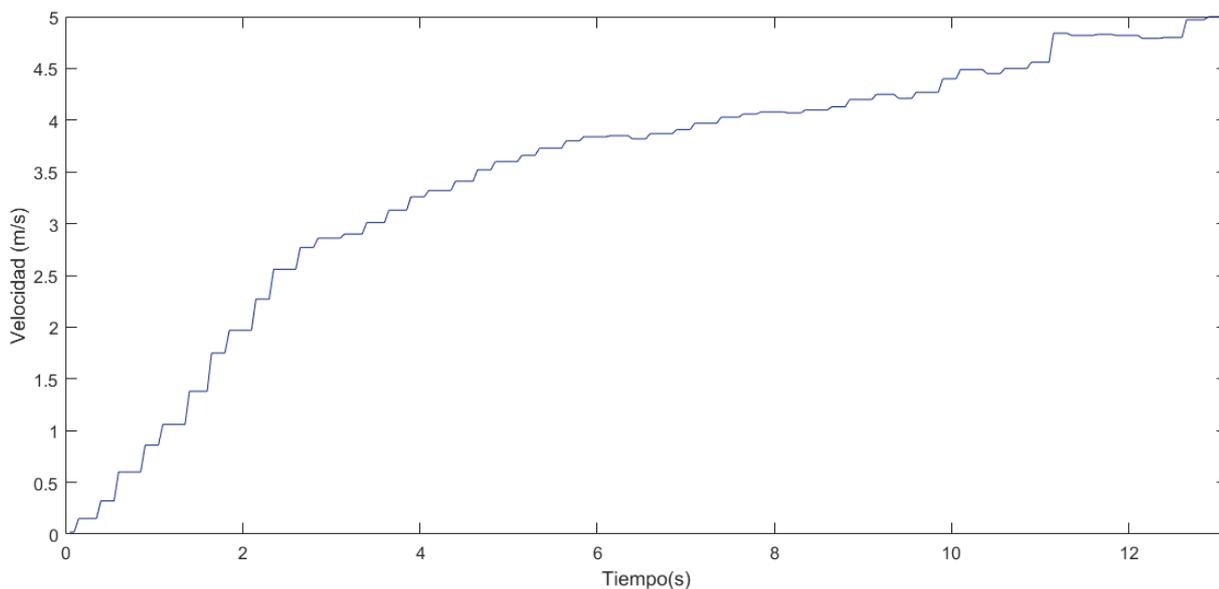


Figura 5-24: Velocidad lineal. Maniobra de doble cambio de carril con control basado en lógica difusa.

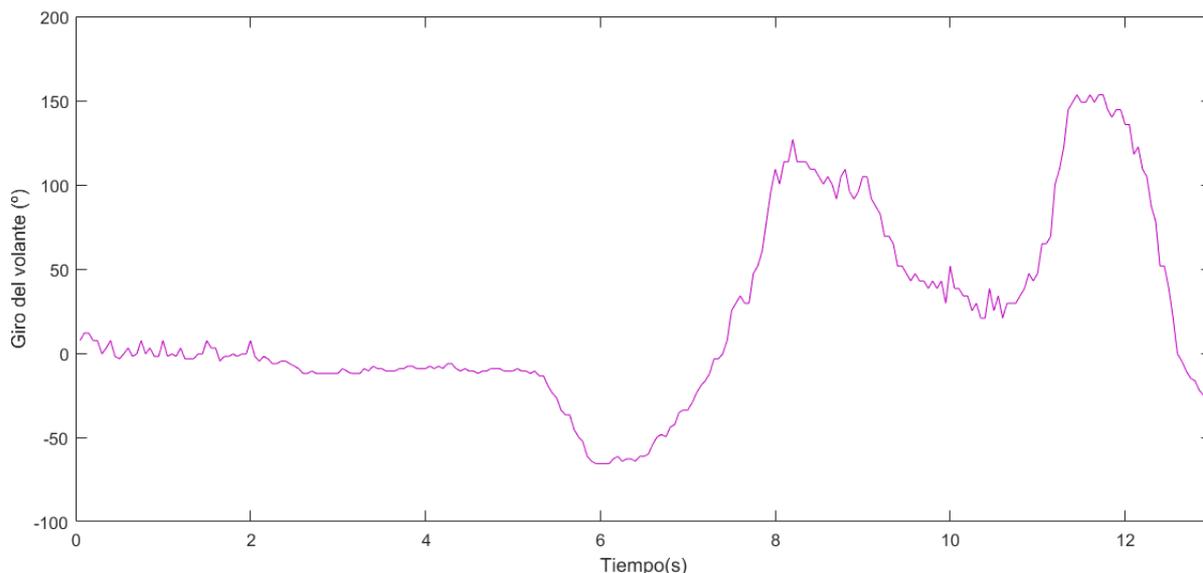


Figura 5-25: Giro del volante. Maniobra de doble cambio de carril con control basado en lógica difusa.

En cuanto al control en velocidad angular, el controlador consigue seguir más fielmente el perfil de evolución del Yaw rate de referencia que en su actuación en la maniobra de SKIDPAD, aunque el error en Yaw rate presentado es mayor en esta. El controlador consigue disminuir ligeramente el error absoluto, que se establece en torno a 0.2-0.3 rad/s. En cuanto al error relativo, varía entre el 100 y el 60% aproximadamente, con lo que no supone una mejora respecto a la situación sin control. Durante el giro a la izquierda se mantiene una situación de sobreviraje mientras que en el giro a la derecha se presenta una situación de subviraje.

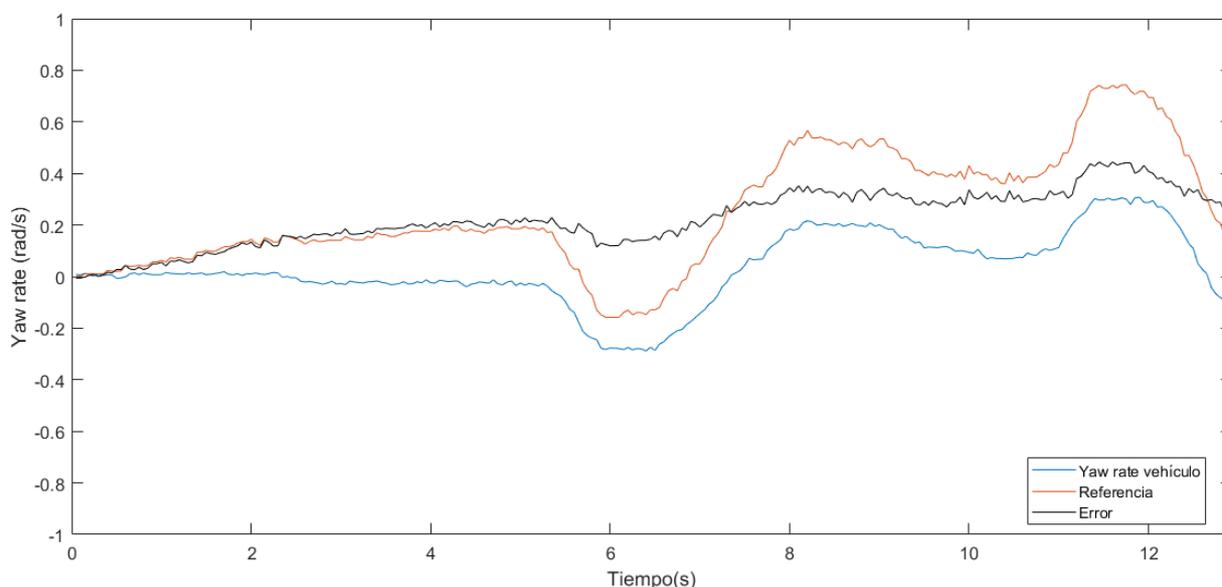


Figura 5-26: Yaw rate. Maniobra de doble cambio de carril con control basado en lógica difusa.

Un aspecto positivo de la acción del controlador es la reducción que este consigue sobre la aceleración lateral del vehículo. Tal como puede verse en la Figura 5-27, dicha aceleración se reduce significativamente con respecto a la presentada en la situación sin control Figura 5-12 produciendo una mayor sensación de seguridad en el conductor.

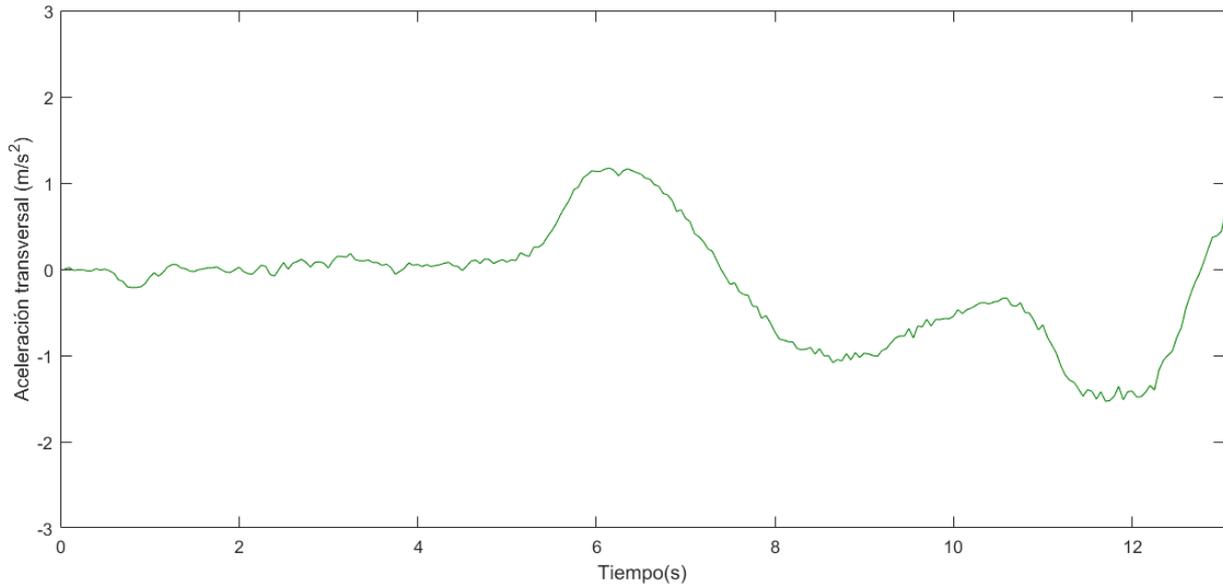


Figura 5-27: Aceleración transversal. Maniobra de doble cambio de carril con control basado en lógica difusa.

En cuanto a la Figura 5-28, al igual que en la maniobra de SKIDPAD se pone de manifiesto como la aplicación del par diferencial proporciona más par a las ruedas izquierdas que a las derechas. También cabe recordar que los pares aplicados representados son resultado de la acción conjunta del control de estabilidad (Par corregido) y del control de tracción (Par máximo por MTTE)

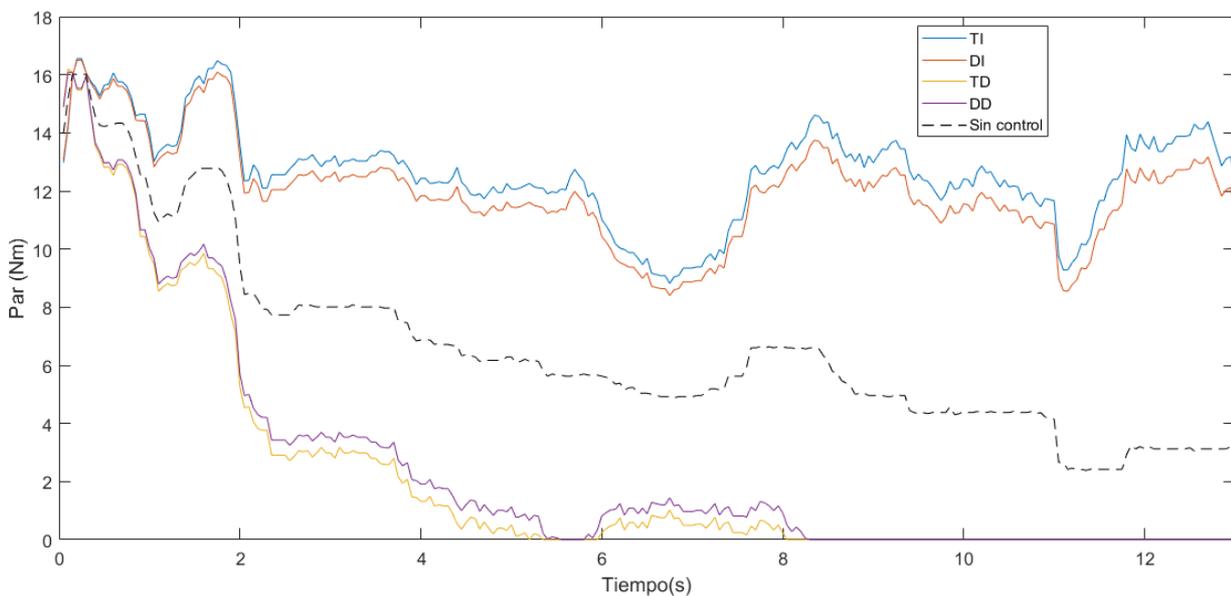


Figura 5-28: Pares aplicados sobre cada rueda. Maniobra de doble cambio de carril con control basado en lógica difusa.

## 5.4 Control Proporcional con dos modos de operación.

### 5.4.1 Implementación del controlador.

Esta estrategia de control ya disponía de un código C en el hilo de control de tracción y estabilidad de la versión 30.14 del programa que ejecuta la ECU. Sin embargo, dicha versión no reproduce fielmente el controlador descrito en [5] con lo que se ha desarrollado uno nuevo (versión 30.15) que introduce las siguientes modificaciones:

- Sustitución de los parámetros ajustables del controlador. Anteriormente estaban definidos como constantes numéricas y ahora se colocan como variables cuyo valor es recibido del Supervisor.
- Aproximación de la velocidad longitudinal del vehículo ( $v_x$ ) por el módulo (para evitar el problema descrito en el apartado 5.1.3) en el cálculo del Yaw rate de referencia para el modo de maniobrabilidad (ESC- $\gamma$ )
- Eliminación de saturación impuesta en el momento correctivo no contemplada en la estrategia original de control.
- Se ha completado el código correspondiente a la capa del Supervisor que se encarga de la elección de los modos de operación.
- Anulación del error en ángulo de deslizamiento( $\beta$ ) (que es igual a la propia beta al ser la referencia  $0^\circ$ ) para no tenerlo en cuenta en el control.
- Corrección de un error en el cálculo de las fuerzas longitudinales sobre cada rueda que provocaba que el par máximo transmisible (MTTE) saliera muy pequeño.
- Eliminación de una condición de desactivación del controlador no contemplada en la estrategia original de control.

Esta nueva versión 30.15 fue comparada con la anterior mediante una serie de pruebas preliminares para confirmar que las modificaciones introducidas tenían un impacto positivo en la actuación del controlador.

**Código 5.2** Código para el controlador proporcional con dos modos de operación. Las modificaciones aparecen destacadas

```

beta=0; //Se fuerza el valor de beta a 0 para no tenerla en cuenta en el control.

/*Referencia de Yaw Rate*/
yr_des_maniobra=(1.00/(1.00-(MASS_FOX*(DIST_F_LX*CF-
DIST_R_LX*CR))*pow(velocidad,2))/(2.00*CF*CR*pow(DIST_F_LX*DIST_R_LX,2
)))*velocidad*(-steering_angle_filtrado[0])/(DIST_F_LX+DIST_R_LX);
//Se aproxima vx por el módulo de la velocidad.
yr_des_aprop=yr_des_maniobra;
/*CONTROL SUPERVISOR*/
if(umbral_beta_local==0) control_activo=0; //Para los primeros
periodos en los que aun no han llegado los valores de umbrales.
//umbral_beta recibida del Supervisor.

/*ESC-BETA*/
else if(fabsf(beta) >umbral_beta_local) control_activo=2;

/*ESC-YAW*/
else if(fabsf(yr_des_maniobra-Yaw_rate)>umbral_Yaw_local &&
control_activo==0) control_activo=1; //umbral_Yaw_local recibida del Supervisor.

```

```

else if (fabsf(beta)<(PI/180.00) && control_activo==2){
  control_activo=1;
  if (fabsf(yr_des_maniobra-Yaw_rate)<0.02) control_activo=0;
}

/*ESC-OFF: NO CONTROL*/
else if((fabsf(yr_des_maniobra-Yaw_rate)<0.02 && control_activo==1)
control_activo=0;

if (control_activo==2){ //Cambio de referencia para ESC-BETA
/*Yaw rate de referencia filtrado*/
yr_des_aprop_aux=yr_des_aprop;

  yr_des_aprop=yr_des_aprop_aux*0.75+0.15*(3*beta+((2*Fyd*cos(-
steering_angle_filtrado[0])+2*Fyt)/(MASS_FOX*velocidad)));
  //Se aproxima vx por el modulo de la velocidad.
}

  /*Sistema Control Inferior*/
/*Momento correctivo necesario*/
Momento_aprop=K_local*J_FOX_ZZ*(yr_des_aprop-Yaw_rate); //K_local
recibida del Supervisor.

if(volante>=4.65 && Momento_aprop>100)Momento_aprop=100;//Saturación
if(volante<=-3.7 && Momento_aprop<-100)Momento_aprop=-100;
//Saturación
if (fabsf(Momento_aprop)>150) Momento_aprop=sign(Momento_aprop)*150;

  Momento_aprop_d=theta_front_local*Momento_aprop; //Eje delantero
  Momento_aprop_t=theta_front_local*Momento_aprop;//Eje trasero
//theta_front_local recibida del Supervisor.

  /*Calculo del par correctivo a aplicar en cada rueda*/
  if (control_activo!=0){
    par_di_aprop=Momento_aprop_d*(DIAMETRO_WF/2)/DIST_F_LY
+J_WF*acel_ang_est_FL[0];
    par_ti_aprop=Momento_aprop_t*(DIAMETRO_WR/2)/DIST_R_LY
+J_WR*acel_ang_est_RL[0];
    par_td_aprop=Momento_aprop_d*(DIAMETRO_WF/2)/DIST_F_LY
+J_WF*acel_ang_est_FR[0];
    par_dd_aprop=Momento_aprop_t*(DIAMETRO_WR/2)/DIST_R_LY
+J_WR*acel_ang_est_RR[0];

  /*Aplicación del par diferencial*/
  DI=1;TI=1;DD=1;TD=1; //Si el momento correctivo es 0 no hay par dif
  if ((Momento_aprop)>0)DI=-1;TI=-1;DD=1;TD=1;
  if ((Momento_aprop<0))DI=1;TI=1;DD=-1;TD=-1;

```

```

/*Cálculo del par total a aplicar en cada rueda : demandado por
conductor +- correctivo*/
par_ti_aprop = relacion_parpedal*acelerador+TI*par_ti_aprop;
par_di_aprop = relacion_parpedal*acelerador+DI*par_di_aprop;
par_td_aprop = relacion_parpedal*acelerador+TD*par_td_aprop;
par_dd_aprop = relacion_parpedal*acelerador+TD*par_dd_aprop;

/*Eliminación de Pares Negativos*/
if (par_ti_aprop<=0)par_ti_aprop=0;
if (par_di_aprop<=0)par_di_aprop=0;
if (par_td_aprop<=0)par_td_aprop=0;
if (par_dd_aprop<=0)par_dd_aprop=0;

/*Cálculo de las fuerzas longitudinales de cada rueda*/
fd_ti=(par_ti_aprop-J_WR*acel_ang_est_RL[0])/(DIAMETRO_WR/2);
fd_td=(par_td_aprop-J_WR*acel_ang_est_RR[0])/(DIAMETRO_WR/2);
fd_di=(par_di_aprop-J_WF*acel_ang_est_FL[0])/(DIAMETRO_WF/2);
fd_dd=(par_dd_aprop-J_WF*acel_ang_est_FR[0])/(DIAMETRO_WF/2);

/*Cálculo del par maximo transmisible segun MTTE*/
par_ti_MTTE_aprop=(J_WR/(0.9*MASS_FOX*pow(DIAMETRO_WR/2,2))+1)*(DIA
METRO_WR/2)*fd_ti;
par_di_MTTE_aprop=(J_WF/(0.9*MASS_FOX*pow(DIAMETRO_WF/2,2))+1)*(DIA
METRO_WF/2)*fd_di;
par_td_MTTE_aprop=(J_WR/(0.9*MASS_FOX*pow(DIAMETRO_WR/2,2))+1)*(DIA
METRO_WR/2)*fd_td;
par_dd_MTTE_aprop=(J_WF/(0.9*MASS_FOX*pow(DIAMETRO_WF/2,2))+1)*(DIA
METRO_WF/2)*fd_dd;

/*Eliminación de Pares Negativos*/
if (par_ti_MTTE_aprop<=0)par_ti_MTTE_aprop=0;
if (par_di_MTTE_aprop<=0)par_di_MTTE_aprop=0;
if (par_td_MTTE_aprop<=0)par_td_MTTE_aprop=0;
if (par_dd_MTTE_aprop<=0)par_dd_MTTE_aprop=0;

/*Par a aplicar definitivo*/
par_aplicado_aprop[0]=minimo(fabsf(par_ti_aprop),fabsf(par_ti_MTTE
aprop),fabsf(PAR_MAX_MOT));
par_aplicado_aprop[1]=minimo(fabsf(par_di_aprop),fabsf(par_di_MTTE
aprop),fabsf(PAR_MAX_MOT));
par_aplicado_aprop[2]=minimo(fabsf(par_td_aprop),fabsf(par_td_MTTE
aprop),fabsf(PAR_MAX_MOT));
par_aplicado_aprop[3]=minimo(fabsf(par_dd_aprop),fabsf(par_dd_MTTE
aprop),fabsf(PAR_MAX_MOT));
}
else{ //Si control_activo=0
par_aplicado_aprop[0]=relación_parpedal*acelerador;
par_aplicado_aprop[1]=relación_parpedal*acelerador;
par_aplicado_aprop[2]=relación_parpedal*acelerador;
par_aplicado_aprop[3]=relación_parpedal*acelerador;
}
if(acelerador<0.08 || fabs(error_yr_fuzzy)<0.04){
// Desactivacion Control
par_aplicado_aprop[0]=relacion_parpedal*acelerador;
par_aplicado_aprop[1]=relacion_parpedal*acelerador;
par_aplicado_aprop[2]=relacion_parpedal*acelerador;
par_aplicado_aprop[3]=relacion_parpedal*acelerador;
}

```

```

†
/*Seguridad*/
for (i=0; i<NUM_MOTORES; i++)
if (par_aplicado_aprop[i]>PAR_MAX_MOT)
par_aplicado_aprop[i]=PAR_MAX_MOT;
else if (par_aplicado_aprop[i]<0)
par_aplicado_aprop[i]=0;

/*Senhal a enviar a los motores*/
for (i=0; i<NUM_MOTORES; i++) {
senal_motores[i]=par_aplicado_aprop[i]/relacion_parpedal;
if (senal_motores[i]>V_MAX_MOT) senhal_motores[i]=V_MAX_MOT;}

```

Tras las pruebas preliminares para confirmar la validez de la implementación mostrada en el Código 5.2 se realizaron otra serie de pruebas para ajustar los parámetros del controlador a sus valores óptimos.

Parámetro	Valor óptimo hallado
K local (Ganancia del controlador)	0.18
Umbral de activación de ESC- $\gamma$	0.08 rad/s
Umbral de activación de ESC- $\beta$	3°
Theta front (parámetro para el reparto del momento correctivo entre los ejes trasero y delantero)	0.5

Tabla 5-2: Parámetros ajustados del controlador proporcional con dos modos de operación.

### 5.4.2 Prueba SKIDPAD

Con los parámetros establecidos según la Tabla 5-2, se realizó una prueba de SKIDPAD para evaluar la acción del controlador frente a la ausencia del mismo (apartado 5.2.1) y poder compararlo correctamente con los otros controladores propuestos.

En la Figura 5-29 puede observarse la trayectoria descrita durante la prueba. En primer lugar, se completaron las vueltas sobre el círculo representado a la izquierda en la gráfica (giro a la derecha) y posteriormente sobre el círculo derecho (giro a la izquierda).

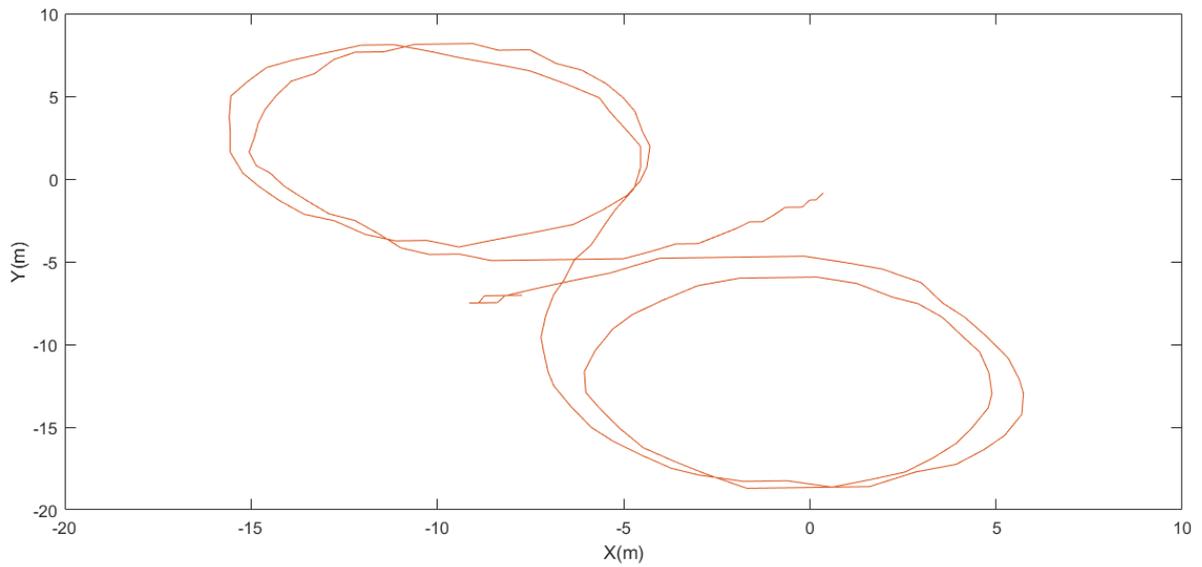


Figura 5-29: Trayectoria. SKIDPAD con control proporcional.

La velocidad lineal se intenta mantener en torno a los 15 km/h aunque no tan bien como en las pruebas de SKIDPAD realizadas con los otros controladores (Figura 5-30). La actuación del conductor sobre el volante se representa en la Figura 5-31 que manifiesta la menor necesidad del conductor de saturar el giro del volante para mantenerse en la trayectoria.

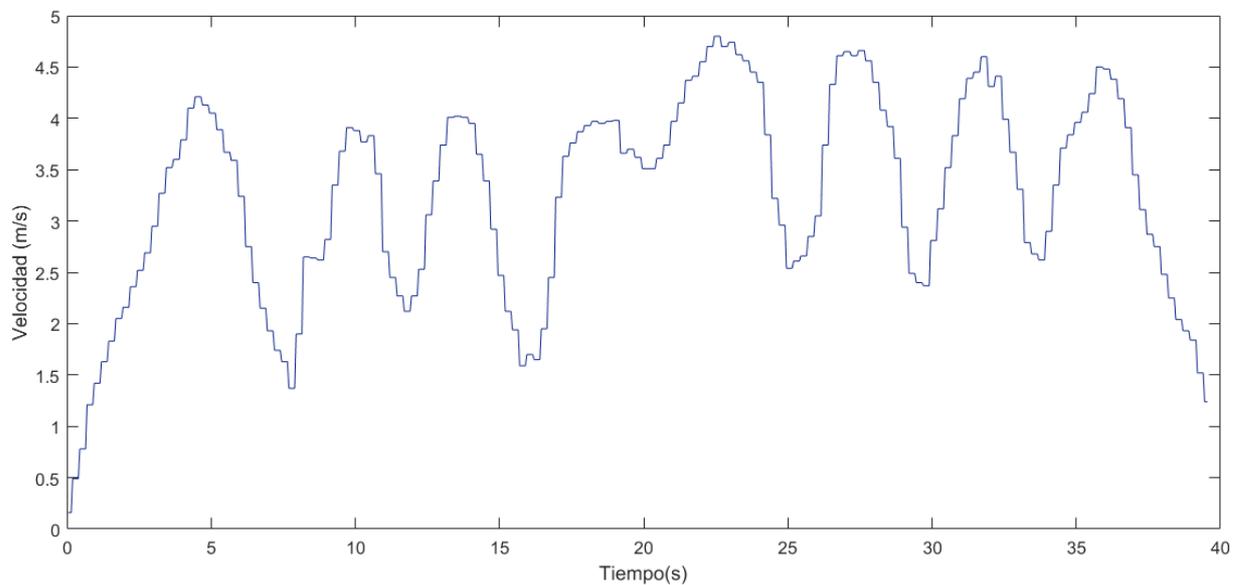


Figura 5-30: Velocidad lineal. SKIDPAD con control proporcional

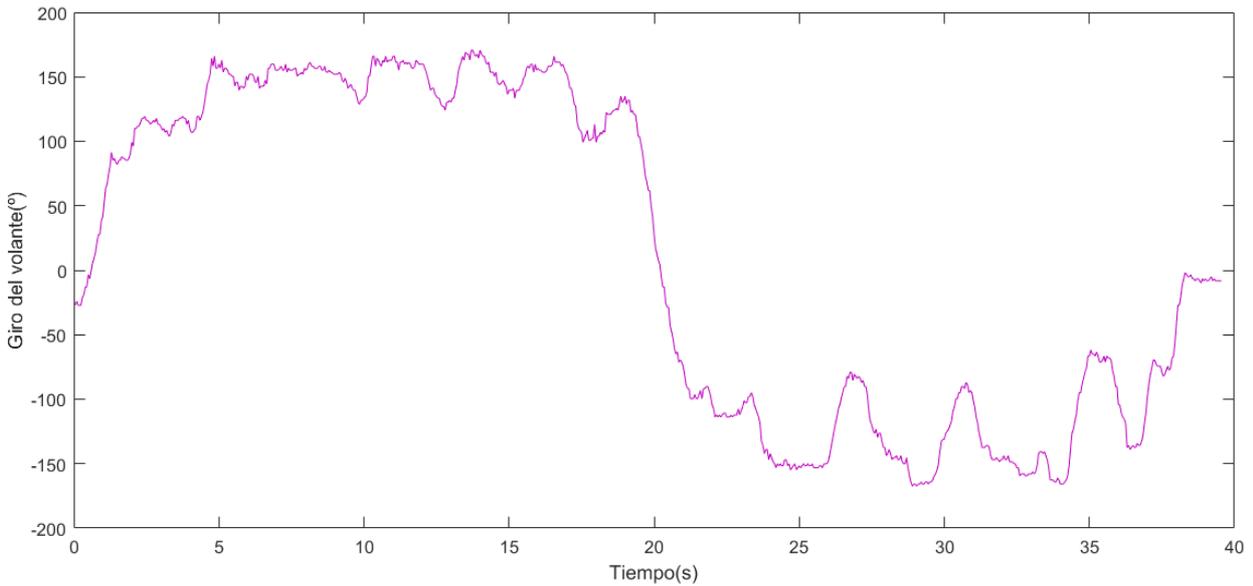


Figura 5-31: Giro del volante. SKIDPAD con control proporcional.

El resultado del control en Yaw rate implementado por este controlador puede verse en la Figura 5-32. El controlador consigue que el Yaw rate siga aproximadamente a la referencia marcada pero no supone una reducción muy significativa del error de Yaw rate. Se presenta un error absoluto que oscila en torno a los  $\pm 0.4$  rad/s. En cuanto al error relativo este varía mayoritariamente entre el 80 y el 10% aproximadamente (en algunas ocasiones asciende hasta el 100%). En general se mantiene una tendencia al sobreviraje durante toda la trayectoria.

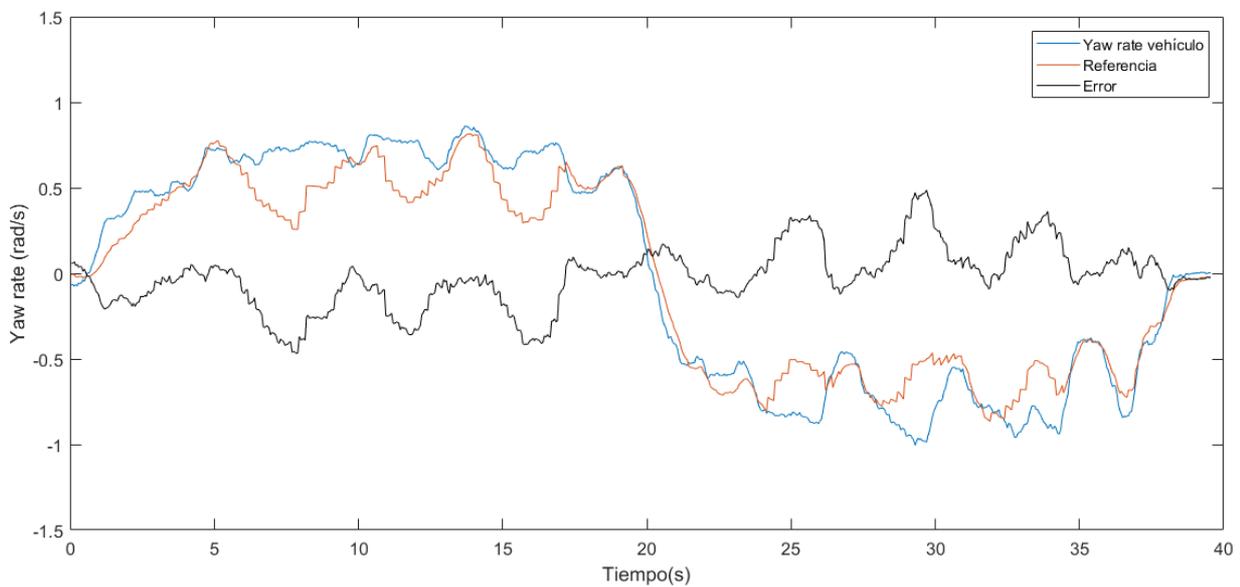


Figura 5-32: Yaw rate. SKIDPAD con control proporcional.

A pesar de que ha sido definido un umbral de desactivación distinto al de activación para evitar sucesivas conmutaciones, siguen produciéndose bastantes, lo cual puede afectar negativamente al control.

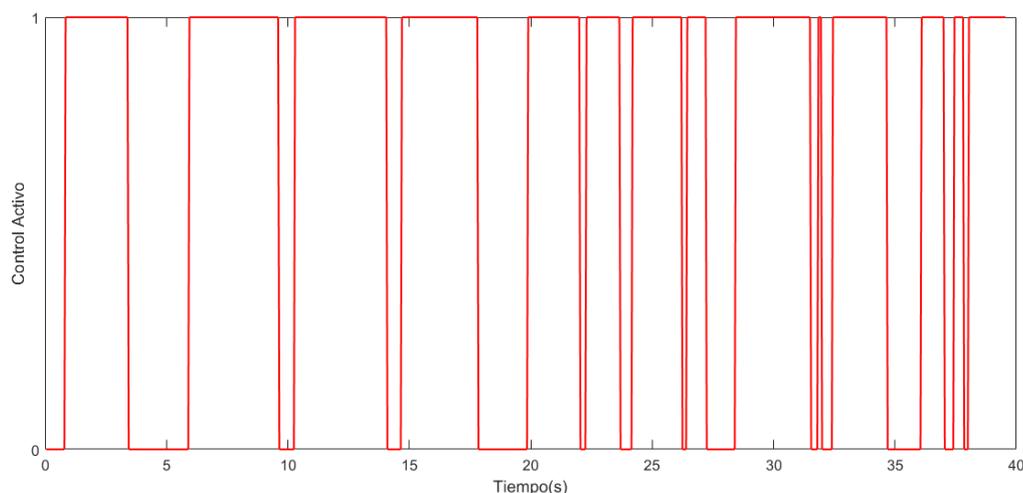


Figura 5-33: Control Activo. SKIDPAD con control proporcional.

En cuanto a la aceleración lateral del vehículo, una acción positiva del controlador consistiría en conseguir la reducción de la misma ya que beneficiaría a la sensación de seguridad del conductor durante la conducción. La Figura 5-34 representa la aceleración lateral que sufre el vehículo durante la prueba. Teniendo en cuenta que esta prueba se ha realizado con menos de velocidad, no se puede asegurar que el control proporcional tenga un efecto significativo sobre dicha aceleración.

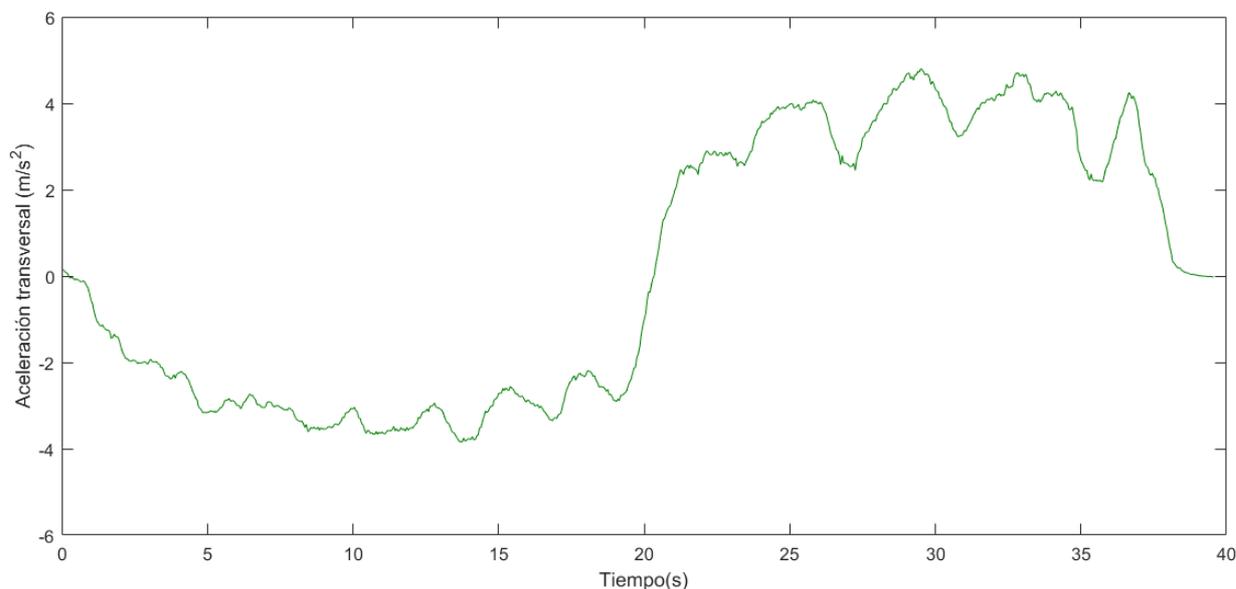


Figura 5-34: Aceleración transversal. SKIDPAD con control proporcional

En la Figura 5-35 se muestran los distintos pares sobre la rueda delantera izquierda. En azul se representa el par corregido por el controlador, es decir, el par demandado por el conductor más el par correctivo calculado. En rojo se representa el par máximo transmisible para dicha rueda calculado por MTTE. En verde se representa el par aplicado al final, que será en cada instante, el mínimo de los dos anteriores.

De esta forma, los puntos donde podemos ver solo la gráfica verde y roja se están aplicando el par corregido por el controlador y en aquellos puntos donde podemos ver solo la gráfica verde y azul el par máximo transmisible es menor que el corregido por el controlador por lo que se aplica este valor en vez del corregido. En negro se representa el par demandado por el conductor que sería el que se aplicaría sobre la rueda en el caso sin control.

Después se muestran los distintos pares para las ruedas delantera derecha(Figura 5-36), trasera izquierda(Figura 5-37) y trasera derecha(Figura 5-38). Como puede observarse, la aplicación del par diferencial propuesta en esta estrategia hace que el par aplicado sobre las izquierdas sea menor que el aplicado sobre las derechas. Durante el giro a la izquierda, sería más conveniente aplicar un mayor par sobre las ruedas izquierdas que sobre las derechas para tratar de corregir el sobreviraje presentado.

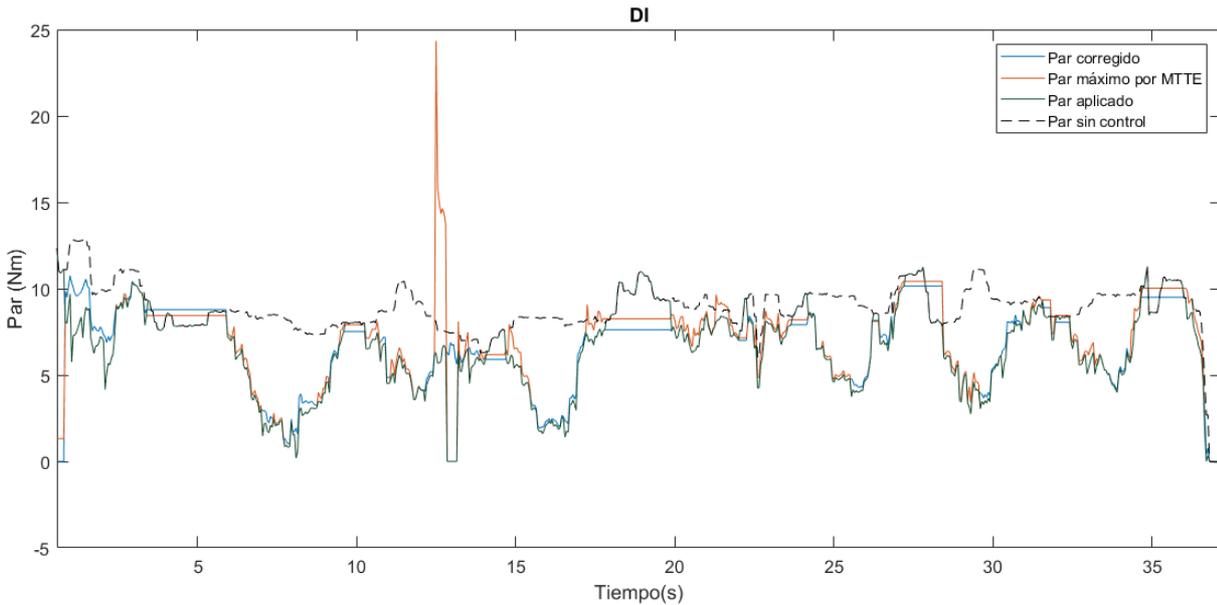


Figura 5-35: Pares sobre la rueda DI. SKIDPAD con control proporcional

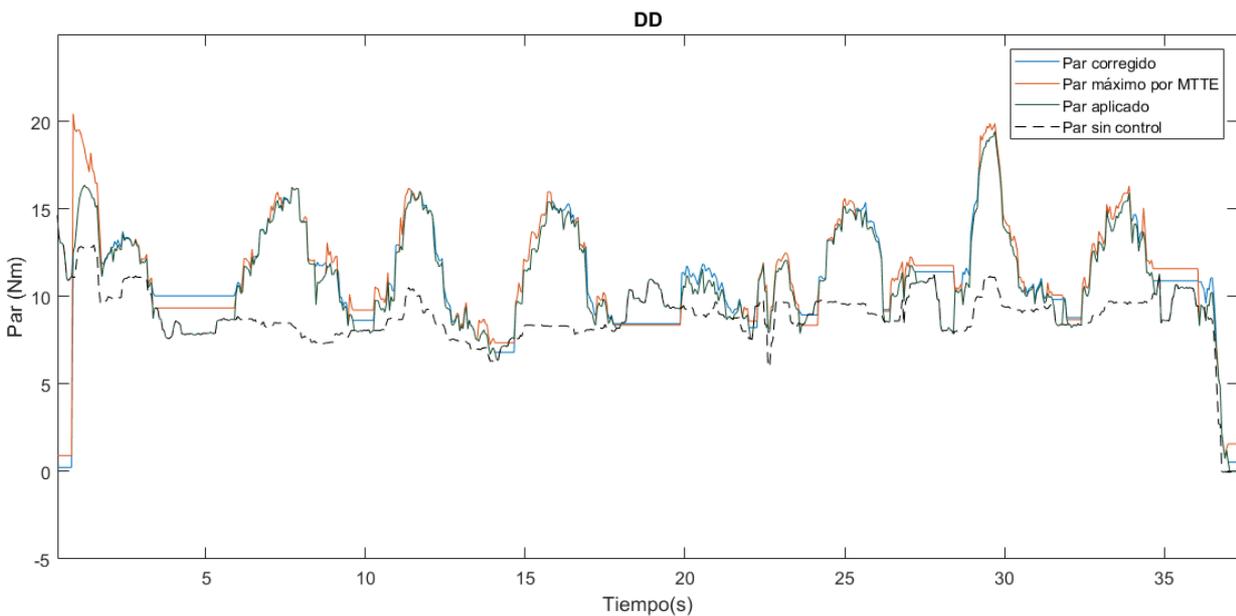


Figura 5-36: Pares sobre la rueda DD SKIDPAD con control proporcional

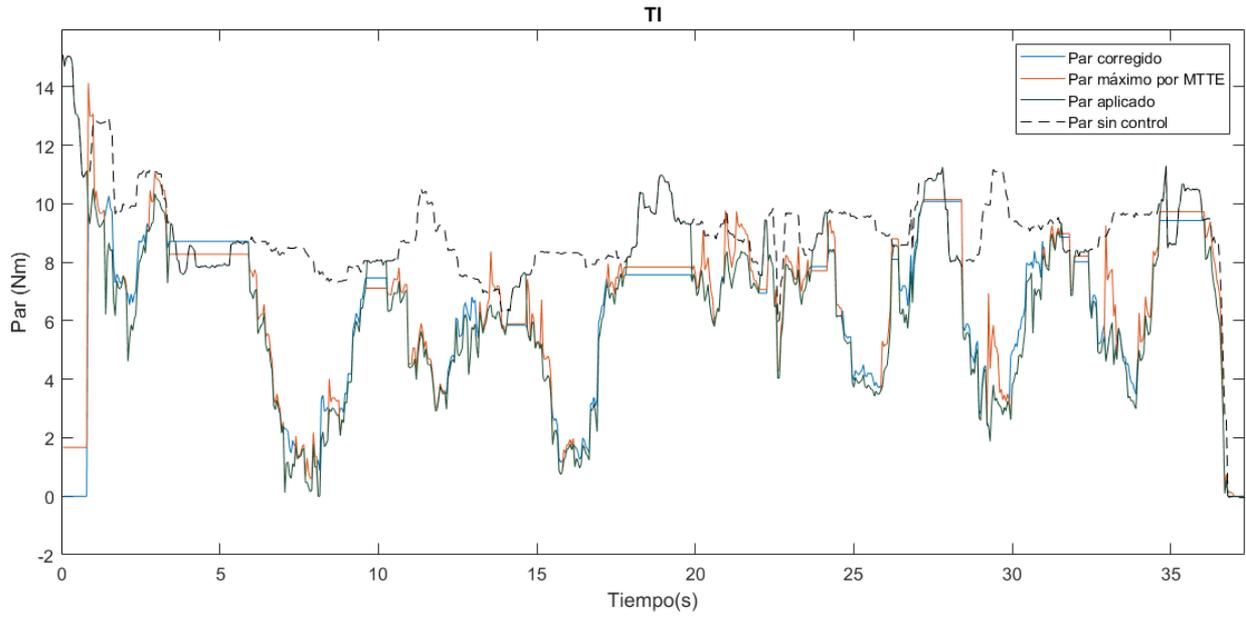


Figura 5-37: Pares sobre la rueda TI SKIDPAD con control proporcional

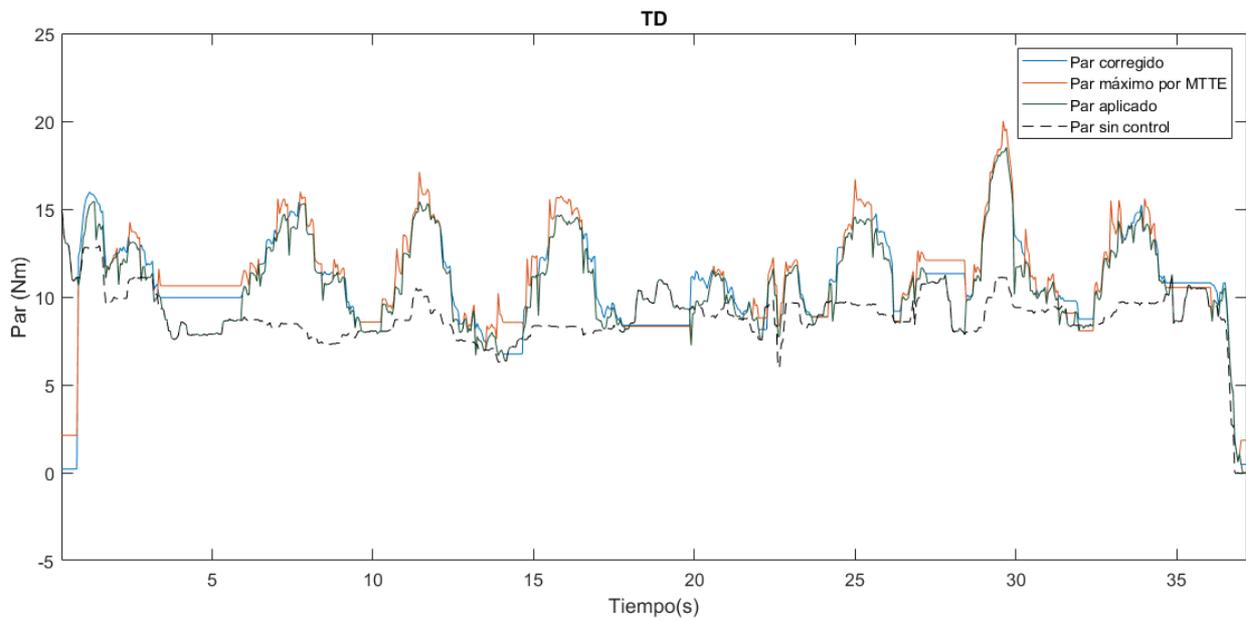


Figura 5-38: Pares sobre la rueda TD SKIDPAD con control proporcional

### 5.4.3 Maniobra de doble cambio de carril

Para la realización de esta maniobra de doble cambio de carril se utilizan igualmente los valores de los parámetros establecidos según la Tabla 5-2.

Al igual que con el controlador basado en lógica difusa, la Figura 5-39 junto con la Figura 5-40 y la Figura 5-41 verifican que la maniobra realizada con el control proporcional es similar a la realizada sin control en cuanto a trayectoria, velocidad y actuación del conductor sobre el volante. Aunque cabe destacar que los giros que el conductor provoca en el volante son menos pronunciados que en caso sin control.

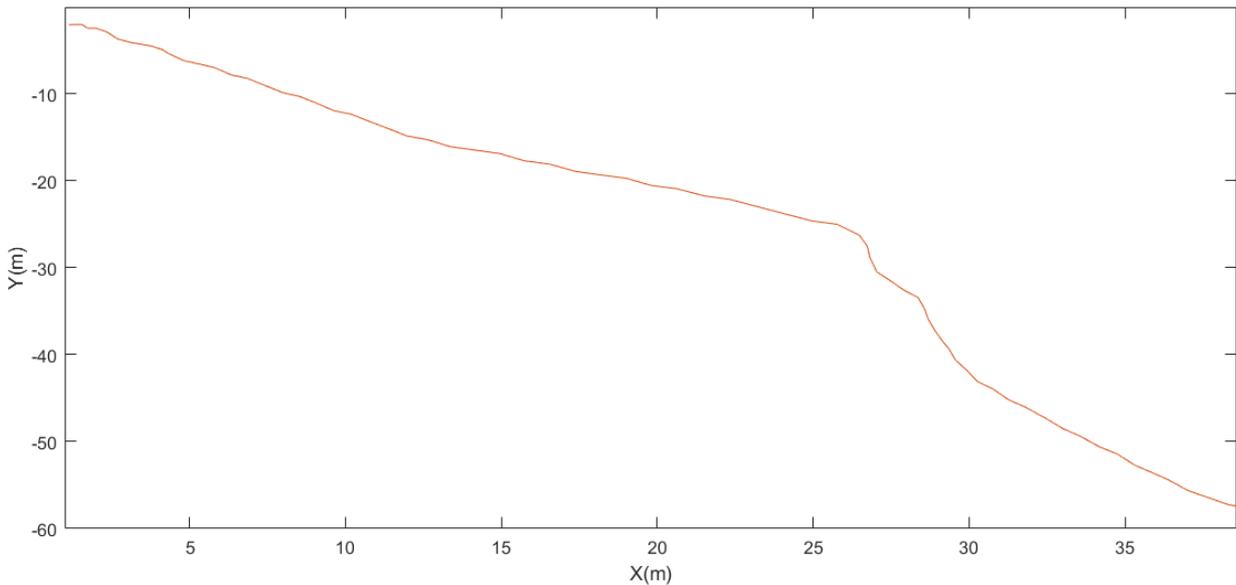


Figura 5-39: Trayectoria. Maniobra de doble cambio de carril con control proporcional.

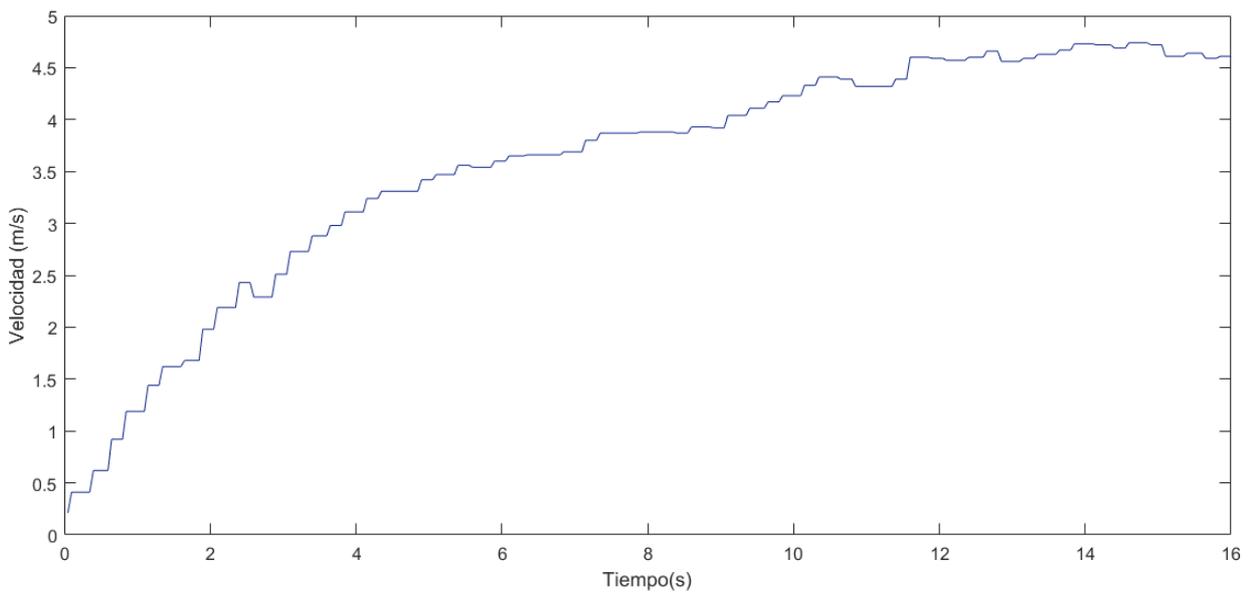


Figura 5-40: Velocidad lineal. Maniobra de doble cambio de carril con control proporcional.

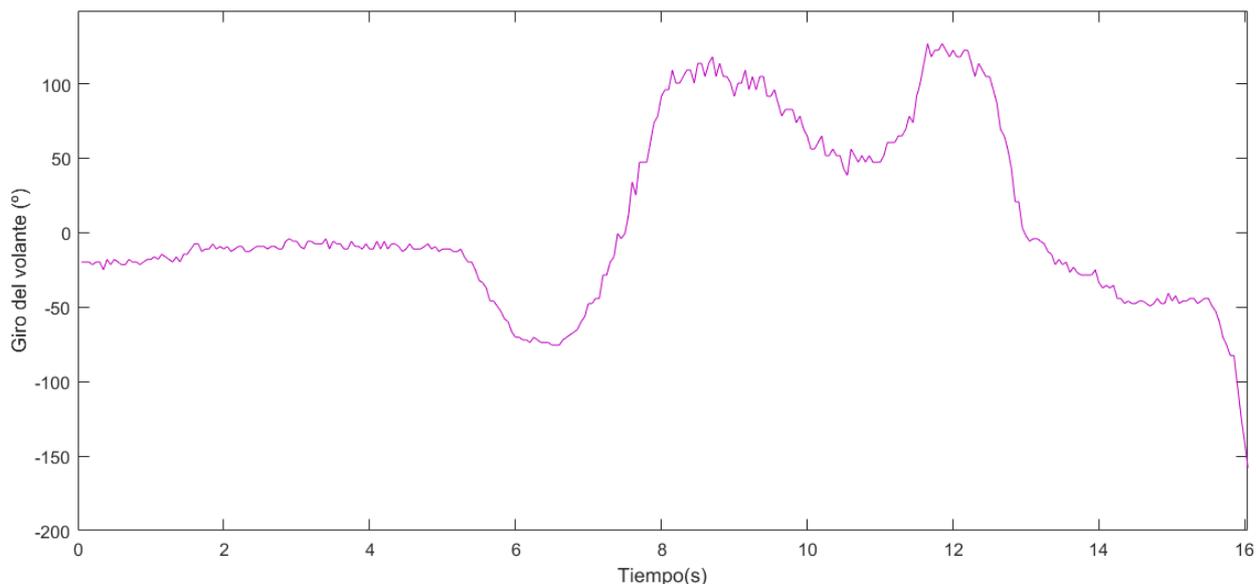


Figura 5-41: Giro del volante. Maniobra de doble cambio de carril con control proporcional.

En cuanto al control en velocidad angular, este tiene un efecto similar al producido por el control basado en lógica difusa para la misma maniobra. Consigue seguir más fielmente el perfil de evolución del Yaw rate de referencia que en su actuación en la maniobra de SKIDPAD y aunque presenta un menor error absoluto (que se establece en 0.2-0.3 rad/s) que en la situación sin control, no consigue reducir el error relativo (que varía en este caso entre el 60 y el 100% aproximadamente), no suponiendo una mejora respecto a la situación sin control. Durante el giro a la izquierda, se mantiene una situación de sobreviraje mientras que en el giro a la derecha se presenta una situación de subviraje.

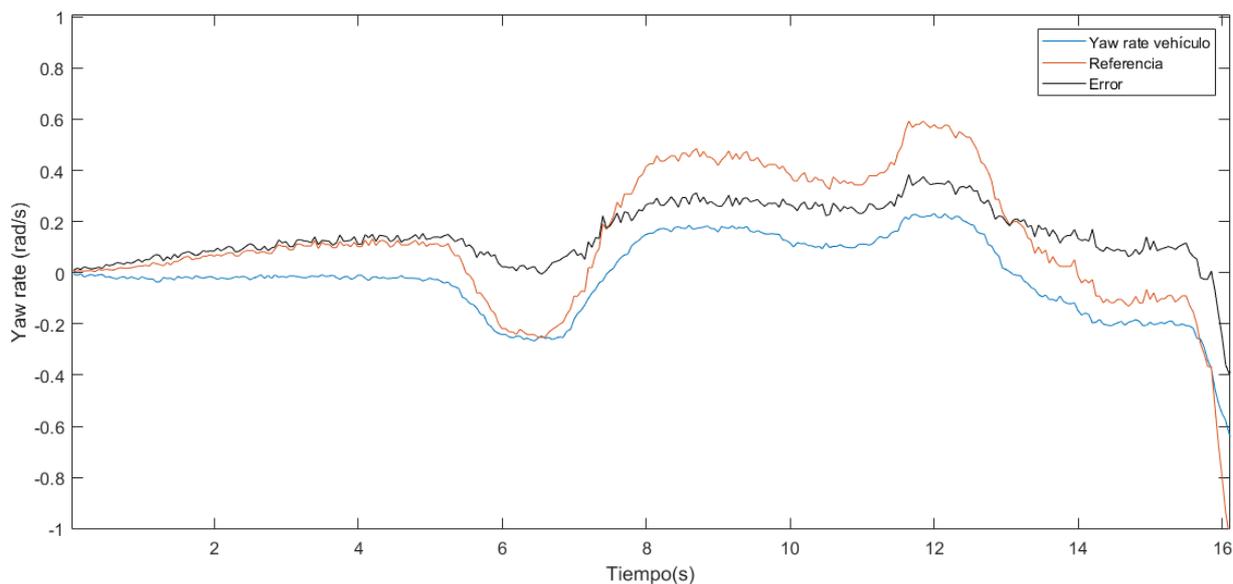


Figura 5-42: Yaw rate. Maniobra de doble cambio de carril con control proporcional.

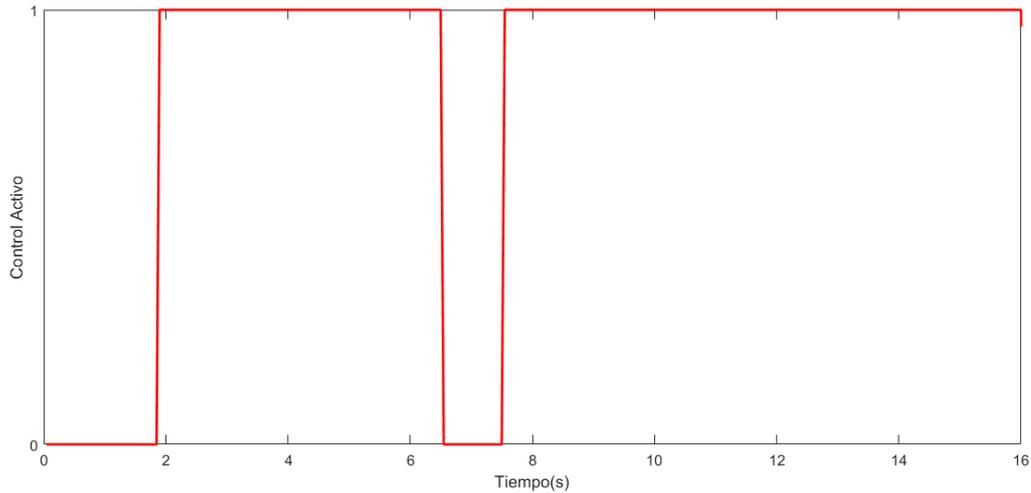


Figura 5-43: Control activo. Maniobra de doble cambio de carril con control proporcional.

Por otro lado, el controlador tiene un impacto positivo sobre la aceleración lateral del vehículo puesto que consigue reducirla significativamente aumentando la sensación de seguridad en el conductor (Figura 5-44).

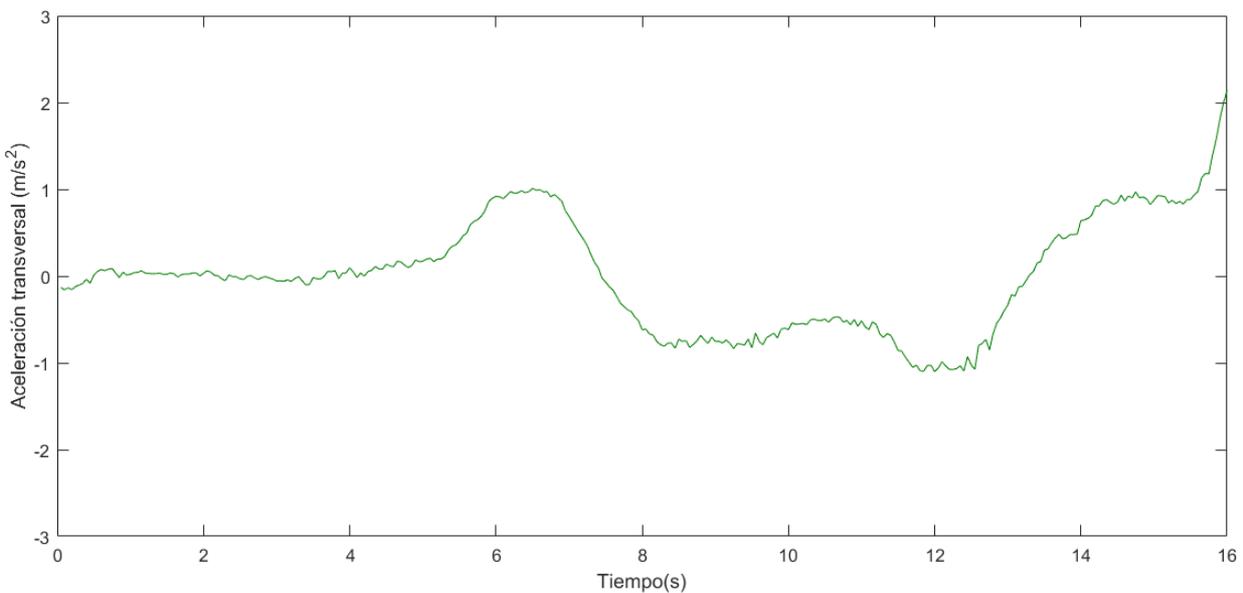


Figura 5-44: Aceleración transversal. Maniobra de doble cambio de carril con control proporcional.

En la Figura 5-45 se representan los pares aplicados a cada rueda. Tal como vimos en el apartado anterior, la forma de aplicar el par diferencial de este controlador resulta en una adicción del par correctivo a las ruedas derechas y una sustracción del mismo a las izquierdas. Durante la realización de esta maniobra, en el primer giro realizado a la izquierda, sería más conveniente aplicar mayor par a las ruedas izquierdas que a las derechas para corregir el sobreviraje presentado. En cuanto al segundo giro producido hacia la derecha, también sería más conveniente que el par de las ruedas izquierdas fuera mayor que el de las ruedas derechas para corregir la situación de subviraje que se presenta.

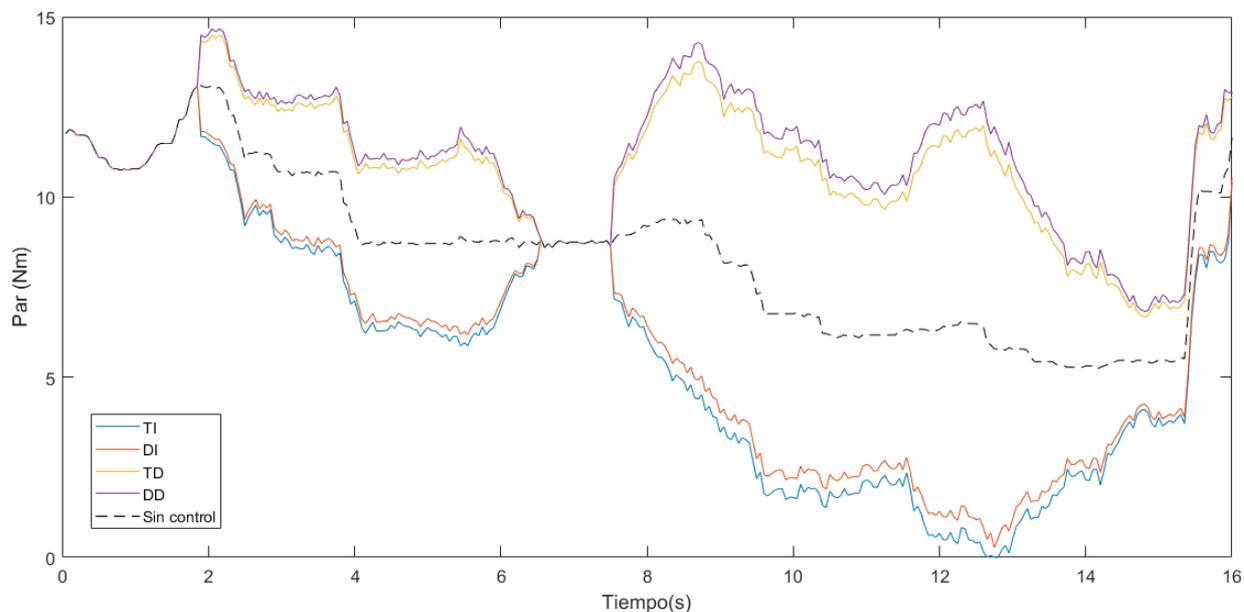


Figura 5-45: Pares aplicados sobre cada rueda. Maniobra de doble cambio de carril con control proporcional.

## 5.5 Control PI de estabilidad, sin aplicación de capa control de tracción.

### 5.5.1 Implementación del controlador.

Esta estrategia de control ya disponía de un código C en el hilo de control de tracción y estabilidad de la versión 30.14 del programa que ejecuta la ECU. Dicha versión reproduce fielmente el controlador descrito en [14] con lo que la nueva versión (versión 30.15) incluirá íntegramente la anterior con un par de modificaciones:

- Aproximación de la velocidad longitudinal del vehículo ( $v_x$ ) por el módulo (para evitar el problema descrito en el apartado 5.1.3) en el cálculo del Yaw rate de referencia
- Sustitución de los parámetros ajustables del controlador. Anteriormente estaban definidos como constantes numéricas y ahora se colocan como variables cuyo valor es recibido del Supervisor.

Con la nueva versión 30.15 se realizaron una serie de pruebas para ajustar los parámetros del controlador a sus valores óptimos.

Parámetro	Valor óptimo hallado
Kp (Ganancia proporcional del controlador)	1.6
Ki (Ganancia Integral del controlador)	7.5

Tabla 5-3: Parámetros ajustados del controlador PI de estabilidad.

### 5.5.2 Prueba SKIDPAD

Con los parámetros establecidos según la Tabla 5-3 se realizó una prueba de SKIDPAD para evaluar la acción del controlador frente a la ausencia del mismo (apartado 5.2.1) y poder compararlo correctamente con los otros controladores propuestos.

En la Figura 5-46 puede observarse la trayectoria descrita durante la prueba. En primer lugar, se completaron las vueltas sobre el círculo representado a la izquierda en la gráfica (giro a la derecha) y posteriormente sobre el círculo derecho (giro a la izquierda).

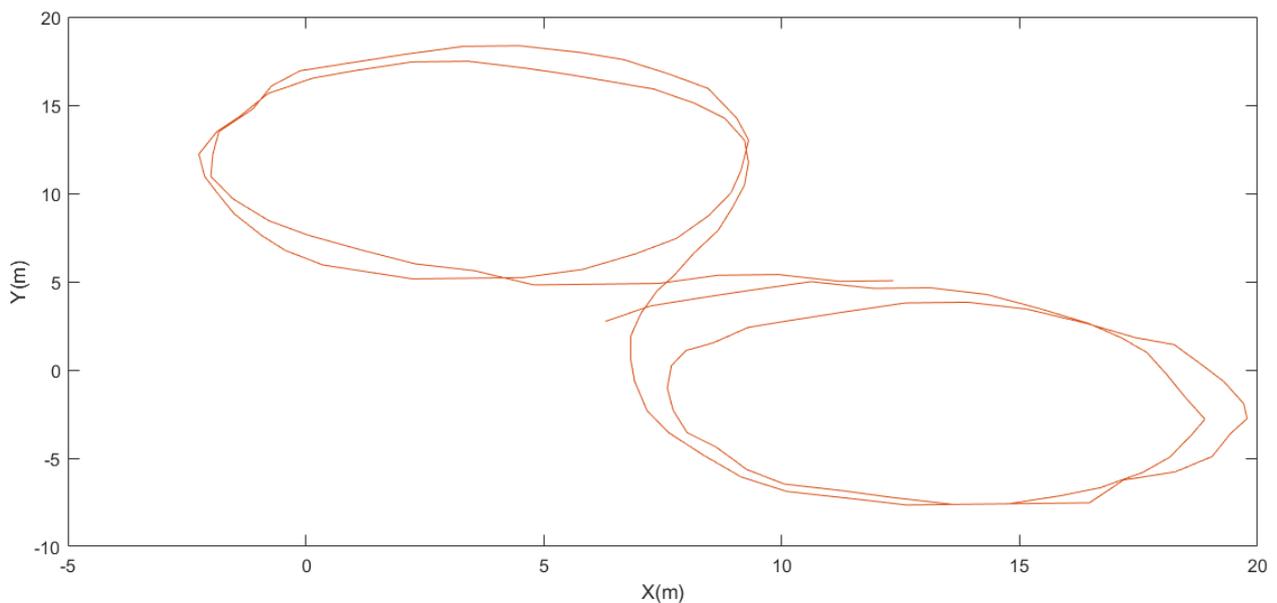


Figura 5-46: Trayectoria SKIDPAD. Control PI de estabilidad

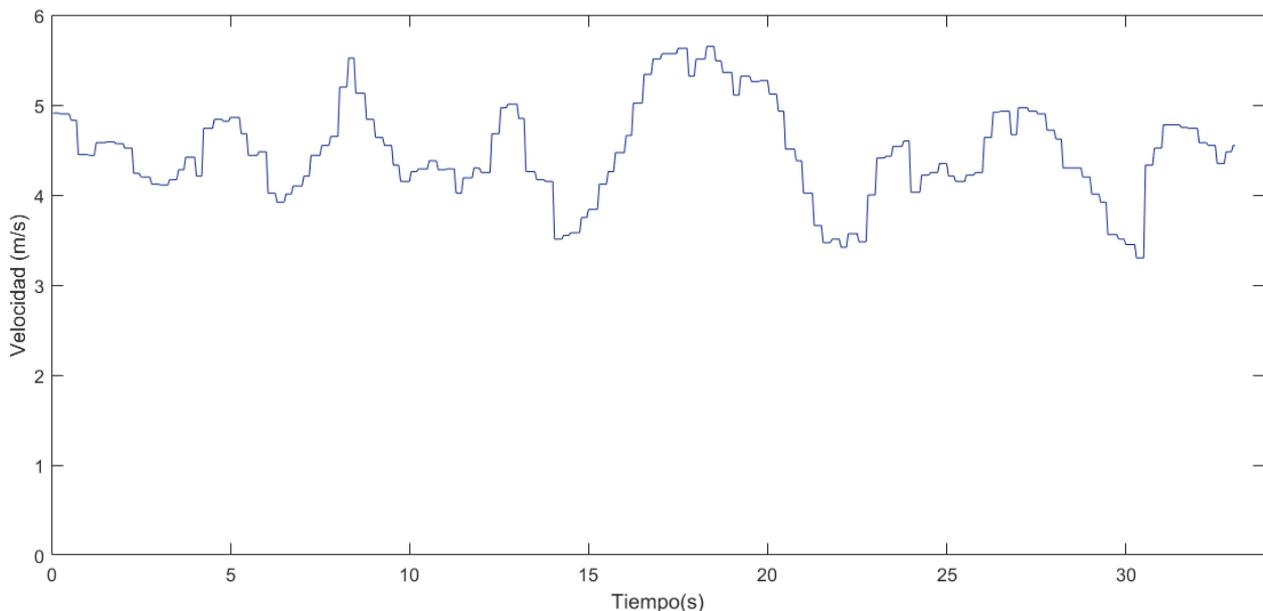


Figura 5-47: Velocidad lineal. SKIDPAD con control PI de estabilidad

En cuanto a la velocidad, se consigue mantener aproximadamente en torno a los 20km/h como se había establecido en el apartado 5.1.2 (Figura 5-47). Frente al caso de no emplear el controlador, también se reduce la necesidad de saturar el giro del volante ( $170^\circ$  aprox) para conseguir la trayectoria deseada (Figura 5-48).

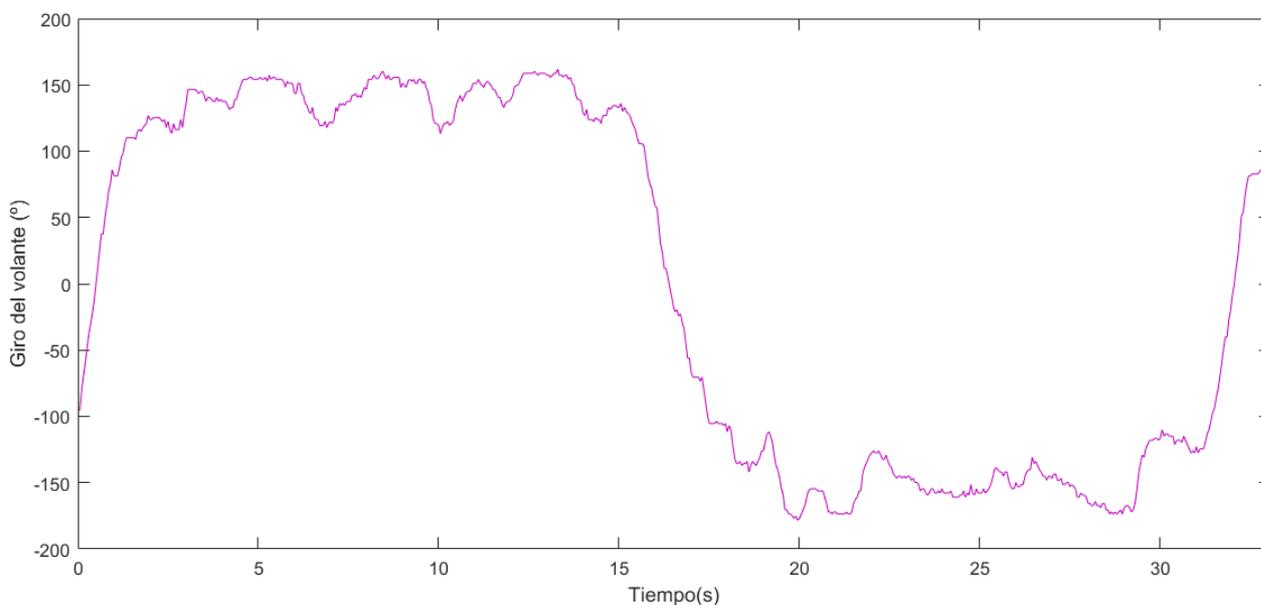


Figura 5-48: Ángulo del volante. SKIDPAD con control PI de estabilidad

El resultado del control en Yaw rate implementado por este controlador puede verse en la Figura 5-49. En ella puede observarse que el vehículo consigue seguir razonablemente la referencia de velocidad angular impuesta, suponiendo una reducción significativa del error de Yaw rate frente al caso sin control. El error absoluto se reduce hasta en 0.5 rad/s (estableciéndose entre  $\pm 0.1$  rad/s) y en cuanto al error relativo, este se establece en torno al 15% aproximadamente. En general, no se mantiene ninguna situación de subviraje o sobreviraje evitando pérdidas de control direccional.

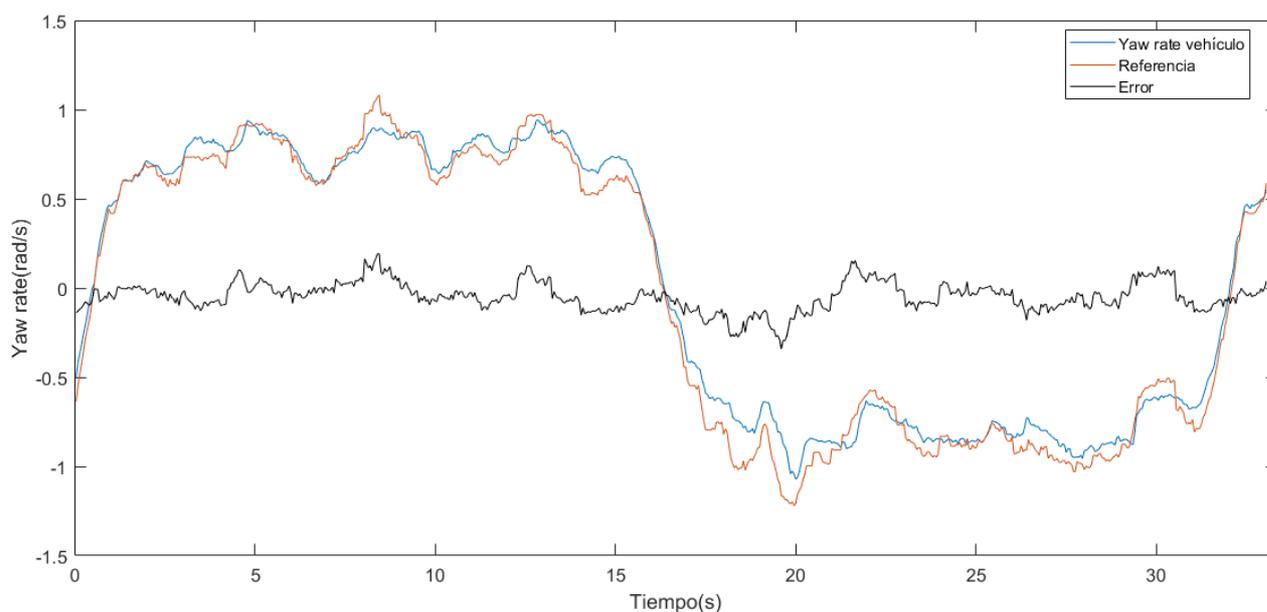


Figura 5-49: Yaw rate. SKIDPAD con control basado en lógica difusa

En cuanto a la aceleración lateral del vehículo, una acción positiva del controlador consistiría en conseguir la reducción de la misma ya que beneficiaría a la sensación de seguridad del conductor durante la conducción. Tal como se muestra en la Figura 5-50, se consigue una pequeña reducción de dicha aceleración, estableciéndose en torno a los  $3.8 \text{ m/s}^2$ .

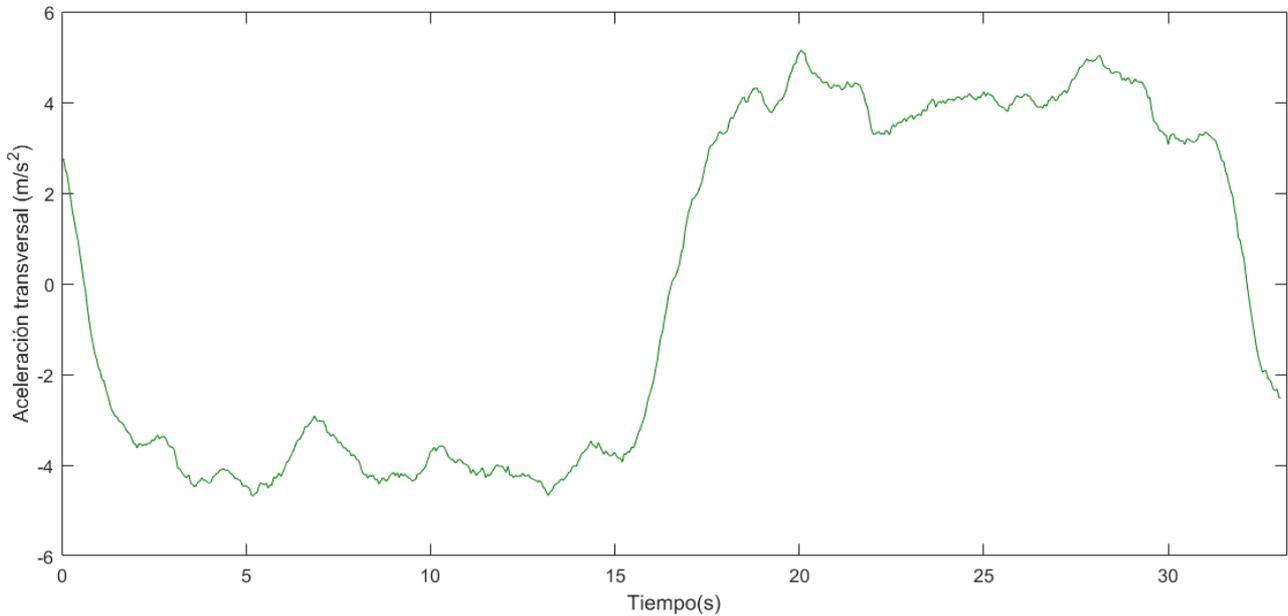


Figura 5-50: Aceleración transversal. SKIDPAD con control PI de estabilidad.

A continuación, se muestran los distintos pares aplicados a las ruedas delantera izquierda (Figura 5-51), delantera derecha (Figura 5-52), trasera izquierda (Figura 5-53) y trasera derecha (Figura 5-54). Este par aplicado es directamente el par demandado por el conductor al que se le suma o resta el par correctivo calculado por el controlador ya que no existe una capa de control de tracción que calcule el par máximo transmisible. En este controlador si se aplica correctamente la idea de par diferencial.

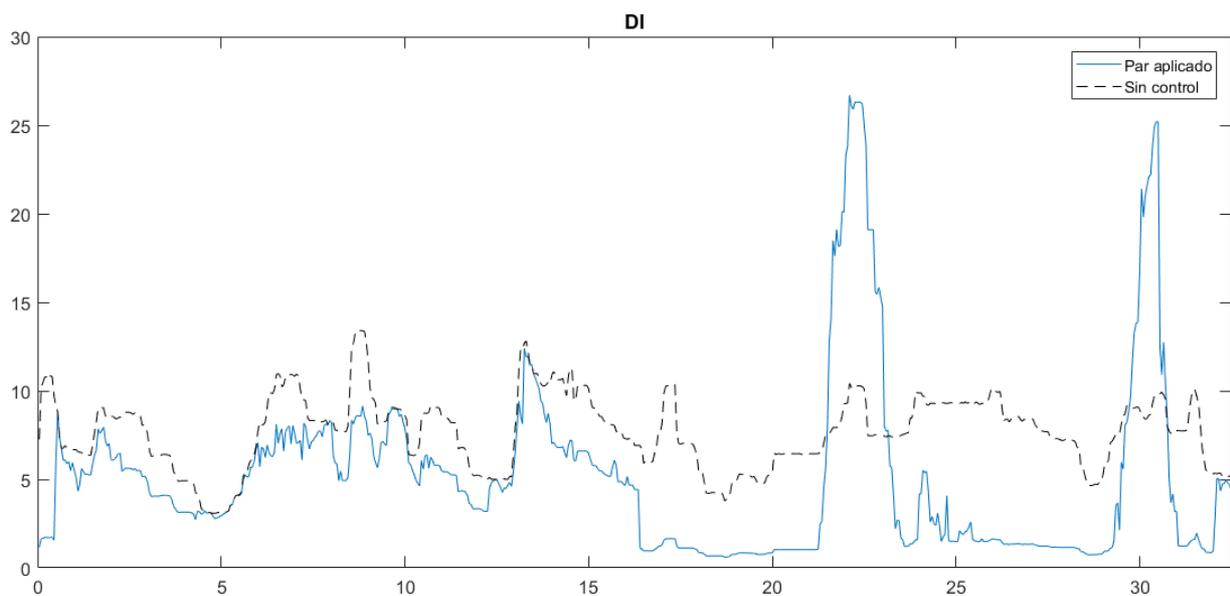


Figura 5-51: Pares aplicado sobre la rueda DI. SKIDPAD con control PI de estabilidad

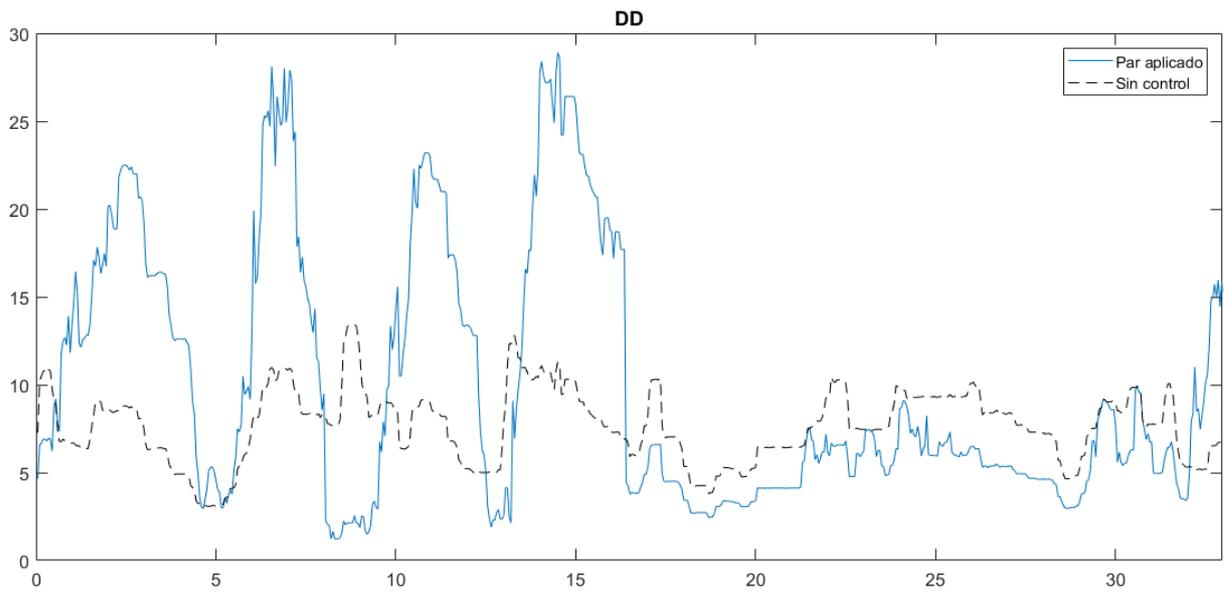


Figura 5-52: Pares aplicado sobre la rueda DD. SKIDPAD con control PI de estabilidad

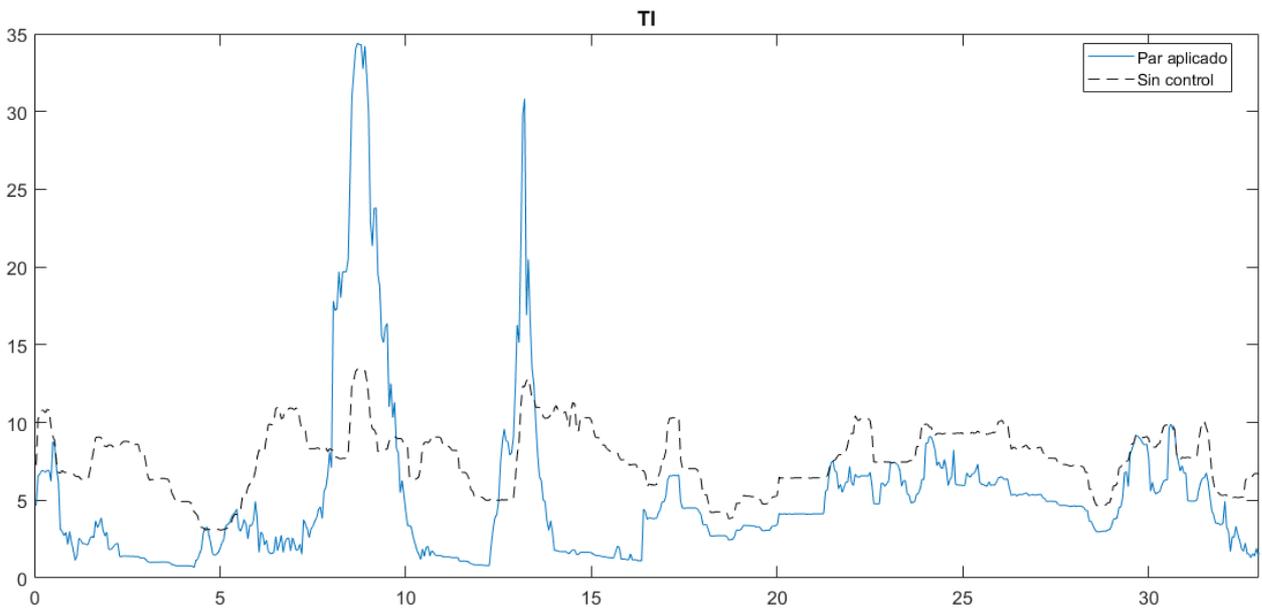


Figura 5-53: Pares aplicado sobre la rueda TI. SKIDPAD con control PI de estabilidad

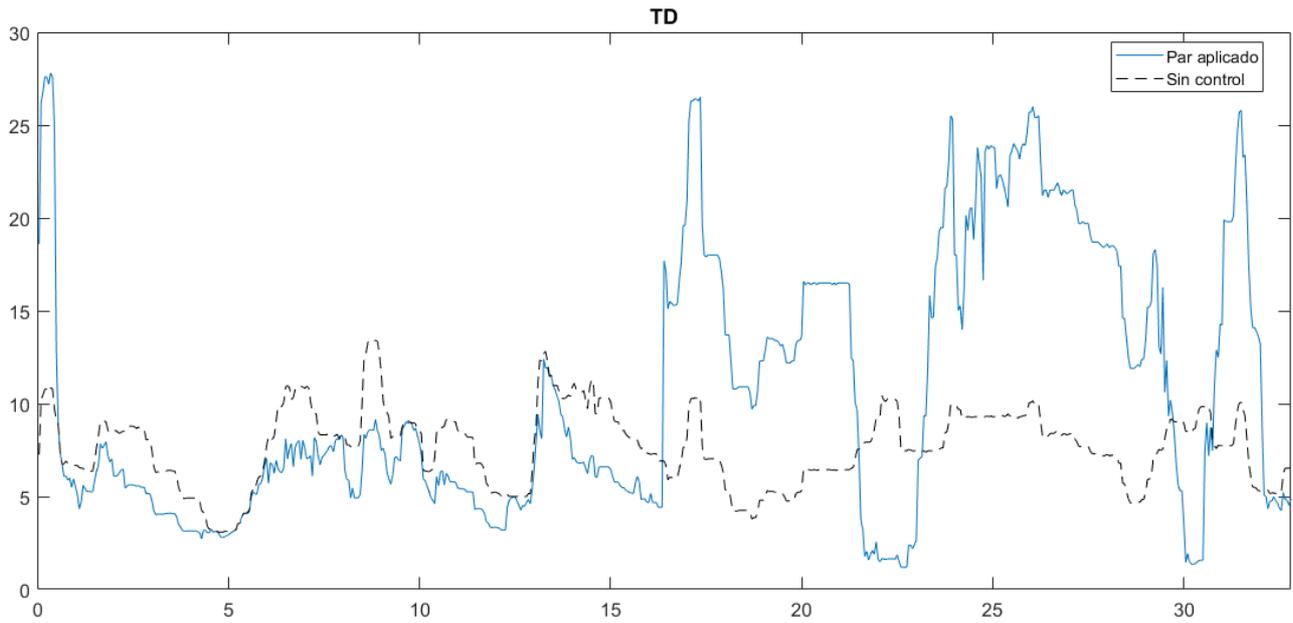


Figura 5-54 Pares aplicado sobre la rueda TD. SKIDPAD con control PI de estabilidad

### 5.5.3 Maniobra de doble cambio de carril

Para la realización de esta maniobra de doble cambio de carril se utilizan igualmente los valores de los parámetros establecidos según la Tabla 5-3.

Al igual que con los controladores anteriores, la Figura 5-55 junto con la Figura 5-56 verifican que la maniobra realizada con el control PI es similar a la realizada sin control en cuanto a trayectoria y velocidad.

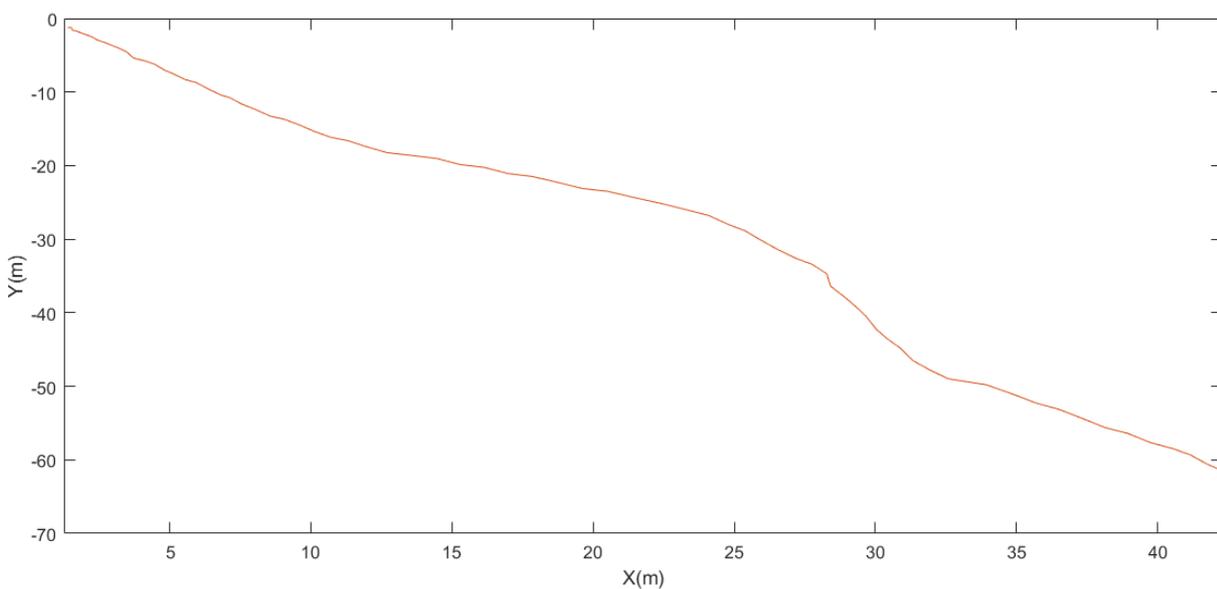


Figura 5-55: Trayectoria. Maniobra de doble cambio de carril con control PI

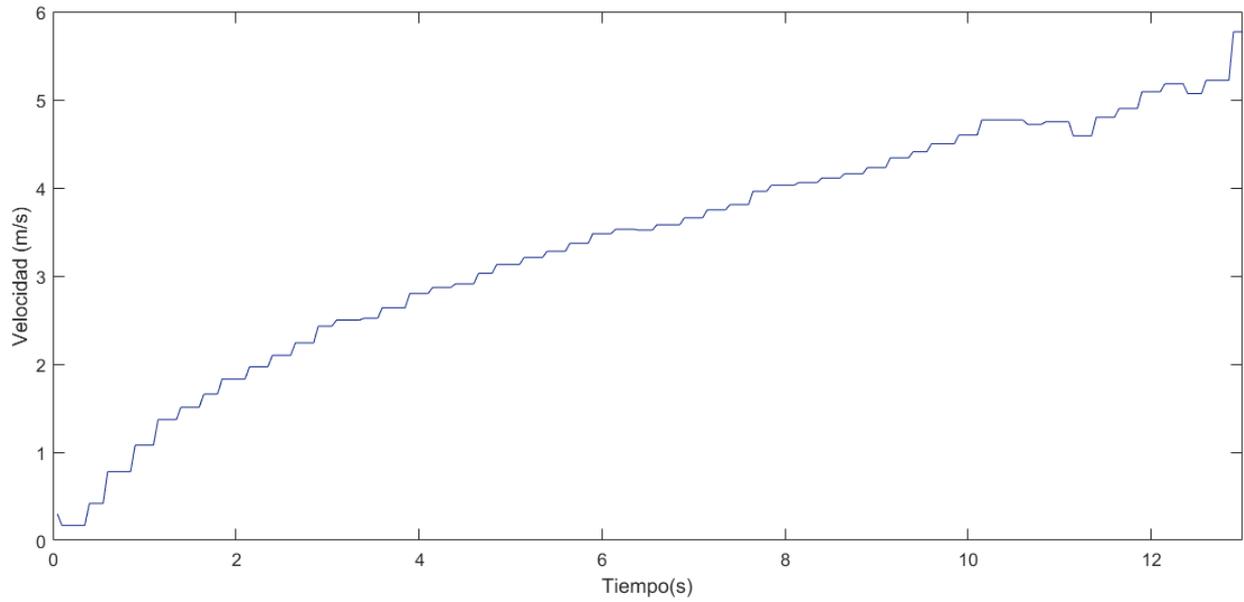


Figura 5-56: Velocidad lineal. Maniobra de doble cambio de carril con control PI

En cuanto a la actuación sobre el volante (Figura 5-57) el conductor opera de la misma forma, sin embargo, no necesita girarlo tanto como en la maniobra realizada sin control.

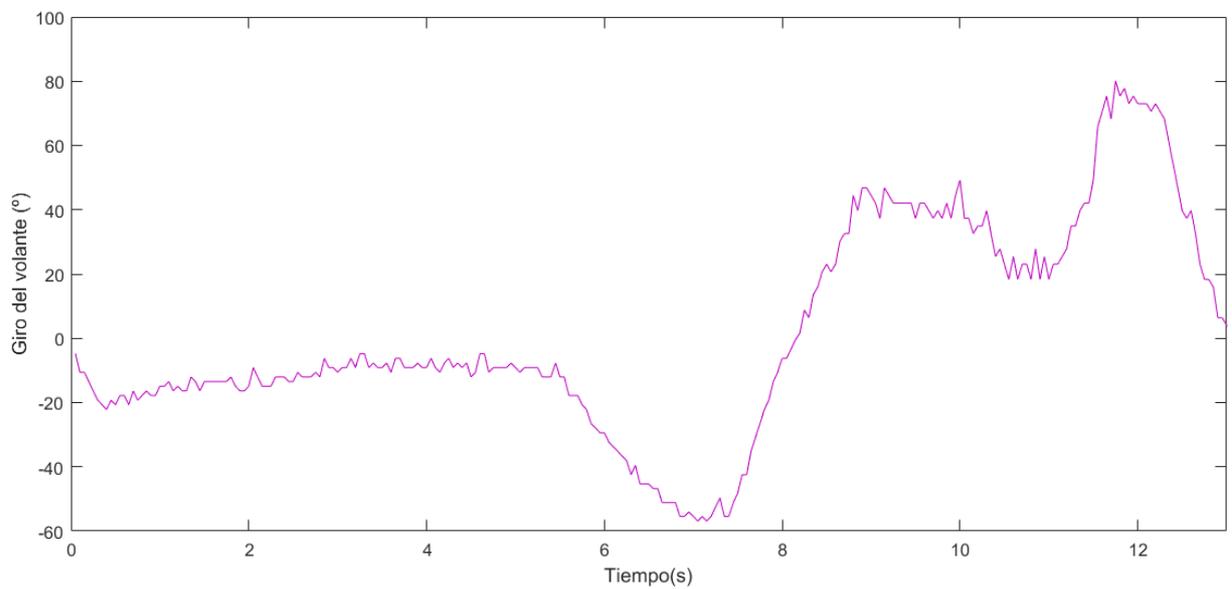


Figura 5-57: Giro del volante. Maniobra de doble cambio de carril con control proporcional.

En cuanto al control en velocidad angular, presenta un efecto similar al de los otros controladores. Presenta un menor error absoluto (que se establece alrededor de 0.2 rad/s) que en la situación sin control. No consigue reducir prácticamente el error relativo (este varía entre el 60 y el 100% aproximadamente). Durante el giro a la izquierda, se mantiene una situación de sobreviraje mientras que en el giro a la derecha se presenta una situación de subviraje.

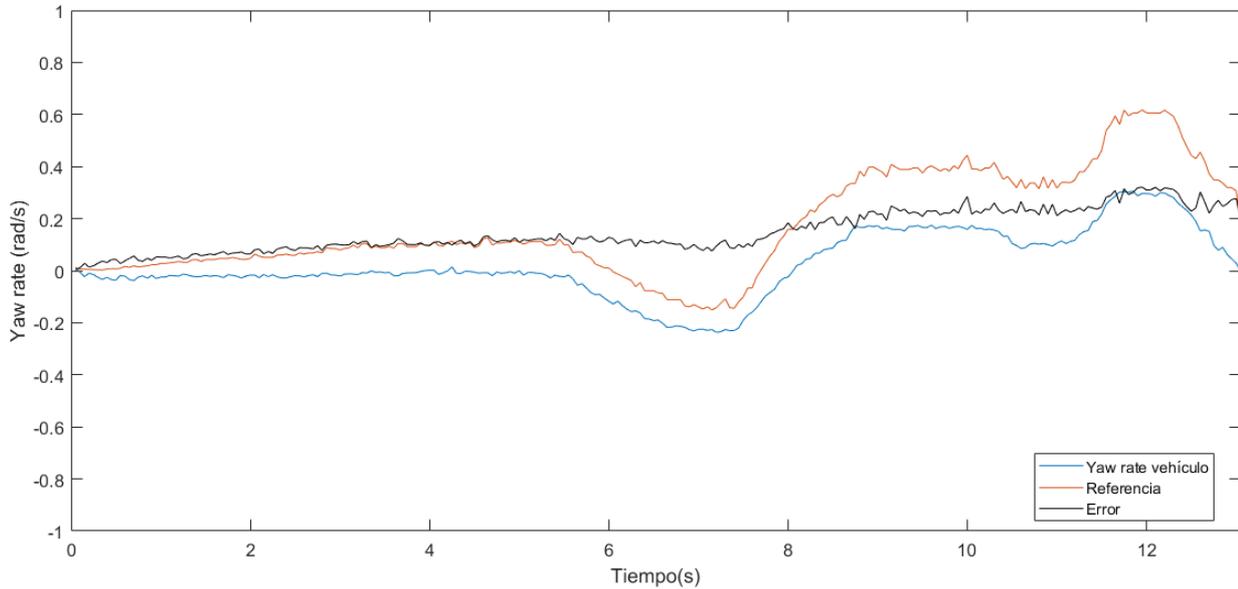


Figura 5-58: Yaw rate. Maniobra de doble cambio de carril con control PI

Como impacto positivo, presenta una reducción de la aceleración lateral del vehículo con respecto a la situación sin control lo que aumenta la sensación de seguridad en el conductor.

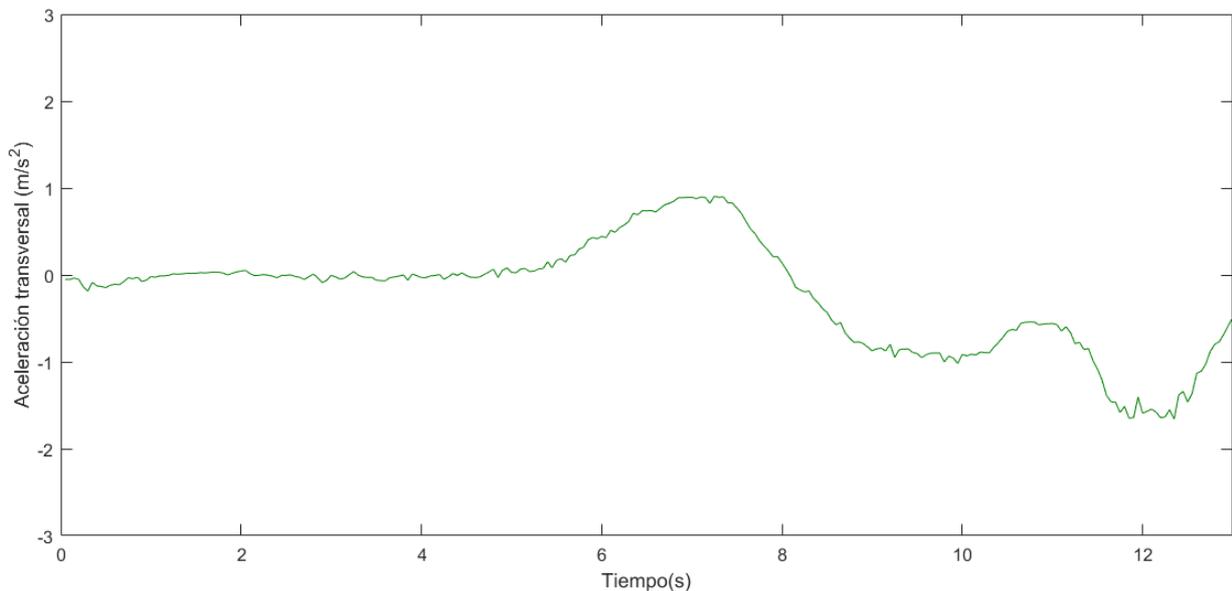


Figura 5-59: Aceleración transversal. Maniobra de doble cambio de carril con control PI

Por último, en cuanto a los pares aplicados a las ruedas (Figura 5-60) el control PI aplica correctamente la idea del par diferencial. Durante el giro a la izquierda, el sobreviraje hace que gire más el eje trasero que el delantero. Para corregir esta situación se aplica más par en el eje delantero ( $DI > TI$  y  $DD > TD$ ) y en las ruedas interiores ( $DI > DD$  y  $TI > TD$ ).

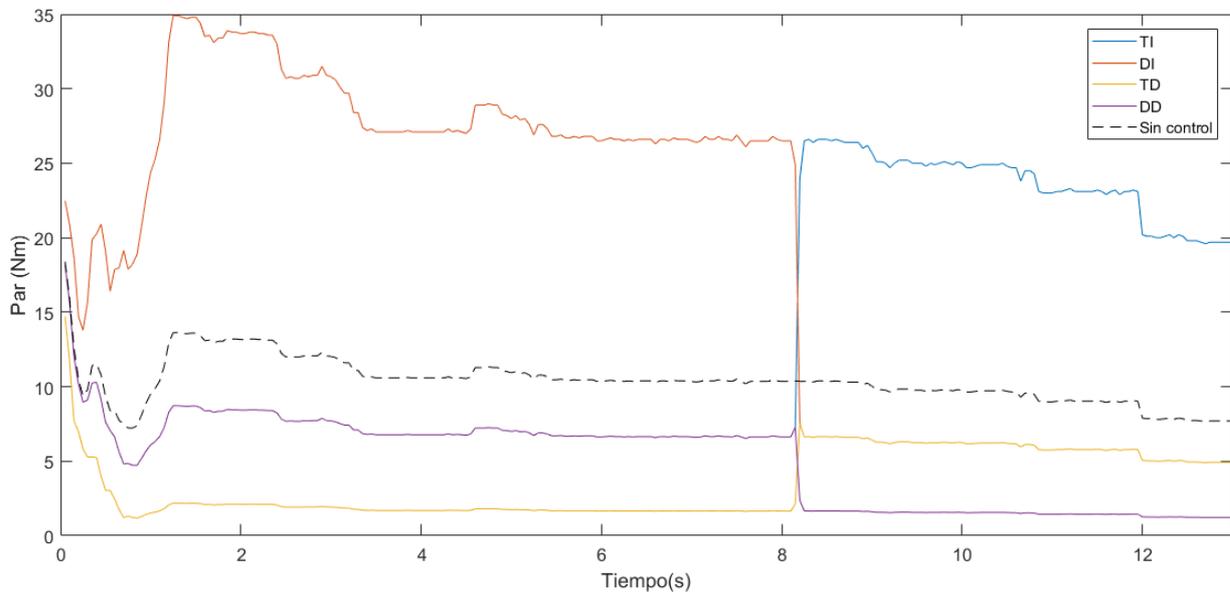


Figura 5-60: Pares aplicados sobre cada rueda. Maniobra de doble cambio de carril con control PI.



# 6 CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO

---

En el siguiente capítulo se extraen las conclusiones del proyecto, conformadas por un análisis comparativo de las distintas estrategias de control de tracción y estabilidad que han sido implementadas en las pruebas reales con el FOX. Partiendo de los resultados de este proyecto, se exponen una serie de tareas para continuar con el desarrollo del proyecto FOX.

## 6.1 Conclusiones. Análisis comparativo de las diferentes estrategias de control

Para comparar la respuesta de los distintos controladores entre sí, se recurre a los resultados de las pruebas expuestas en los apartados 5.3, 5.4 y 0 ya que se trata de pruebas en las que se realizan las mismas maniobras, bajo las mismas condiciones y utilizando los valores óptimos de los parámetros configurables de cada controlador.

Cabe recordar que la comparación se realizará únicamente entre los controles en velocidad angular (debido al problema mostrado en el apartado 5.1.3) y no entre las estrategias de control completas.

Las 3 estrategias de control implementadas producen, en mayor o menor medida, una mejora de la respuesta del vehículo en las pruebas realizadas frente a las pruebas en las que no se presenta ningún tipo de control. En concreto, producen un efecto más positivo sobre la prueba SKIDPAD que sobre la maniobra de doble cambio de carril. Esto podría estar asociado al hecho de que, la maniobra de adelantamiento, introduce giros más bruscos que los realizados en el SKIDPAD además de tratarse de una prueba realizada en un proceso de aceleración constante a diferencia del SKIDPAD donde la velocidad se mantiene más o menos constante durante toda la trayectoria.

En cuanto a la trayectoria, en la prueba SKIDPAD, el controlador basado en lógica difusa fue el que permitió al conductor reproducir más fácilmente, las primeras vueltas sobre los círculos en las segundas. Aunque, en general, la trayectoria descrita con los 3 controladores es aceptable. Además, hay que tener en cuenta que, en esta prueba, la experiencia del conductor puede influir en la trayectoria resultante a diferencia de la maniobra de doble cambio de carril, donde el seguimiento de la trayectoria deseada (en las condiciones establecidas) puede realizarse sin problemas incluso sin la presencia de un control de estabilidad.

Por otro lado, los 3 controladores permiten que el seguimiento de esas trayectorias pueda llevarse a cabo con actuaciones menos pronunciadas sobre el volante por parte del conductor. Mientras que, en ausencia de control, el conductor debía girar más el volante incluso llegando al tope en la prueba SKIDPAD para mantenerse dentro de la trayectoria marcada. Con la presencia de cualquiera de los controladores, el conductor podía seguir las mismas trayectorias girando menos el volante.

En términos de aceleración lateral, en la prueba del SKIDPAD solo el controlador PI consigue introducir una cierta reducción respecto a la aceleración lateral presentada sin control lo cual, tal como ya se ha mencionado anteriormente, permite que el conductor tenga una mayor sensación de seguridad durante la conducción. Sin embargo, en la maniobra de doble cambio de carril todas las estrategias de control introducen una reducción similar sobre la aceleración lateral.

Si se presta atención a los pares aplicados sobre las ruedas, tanto en el controlador basado en lógica difusa como en el controlador proporcional no aplican correctamente la idea del par diferencial. Esto dificulta el propósito de los mismos en el ajuste de la velocidad angular del vehículo a la velocidad angular deseada. Aunque las ideas planteadas en [5] para su aplicación son correctas, no están ejecutadas adecuadamente en los controladores. En cambio, esto no ocurre en el controlador PI por lo que le resulta más fácil a este corregir las tendencias de subviraje y sobreviraje que se den.

El punto más importante a comparar es el propio control que cada estrategia introduce sobre la velocidad angular del vehículo (Yaw rate). En la maniobra de doble cambio de carril, en general, ninguna de las 3 estrategias consigue introducir una reducción significativa del error del Yaw rate respecto al valor deseado del mismo. En dicha maniobra, la respuesta de los 3 controladores es aproximadamente la misma. Para completar la comparación entre las distintas estrategias de control en este tema, se calcula el ISE<sup>17</sup> (Vease Tabla 6-1).

Para la prueba SKIDPAD, el seguimiento de la velocidad angular deseada es relativamente mejor en los 3 controladores (Véase Figura 6-1). La inclusión de los mismos, tiene un efecto positivo sobre la corrección de la trayectoria (mediante el ajuste de la velocidad angular). De hecho, evitan las pérdidas de control direccional que se produjeron durante la prueba SKIDPAD realizada sin control. El controlador proporcional, es el que presenta un mayor error absoluto ( $\pm 0.4$  rad/s). Su error relativo se establece en tan solo un 10% en ciertos momentos durante la prueba, pero, en otras ocasiones, asciende hasta el 100%. Por otro lado, el controlador basado en lógica difusa disminuye el error hasta el 20% relativo a la referencia. En cualquier caso, el controlador PI es el que proporciona una mejor respuesta en términos de control de Yaw rate para la prueba SKIDPAD ya que su error relativo solo asciende hasta el 15% y el error absoluto oscila en torno a  $\pm 0.1$  rad/s. Esto es corroborado por el ISE que se presenta en cada prueba.

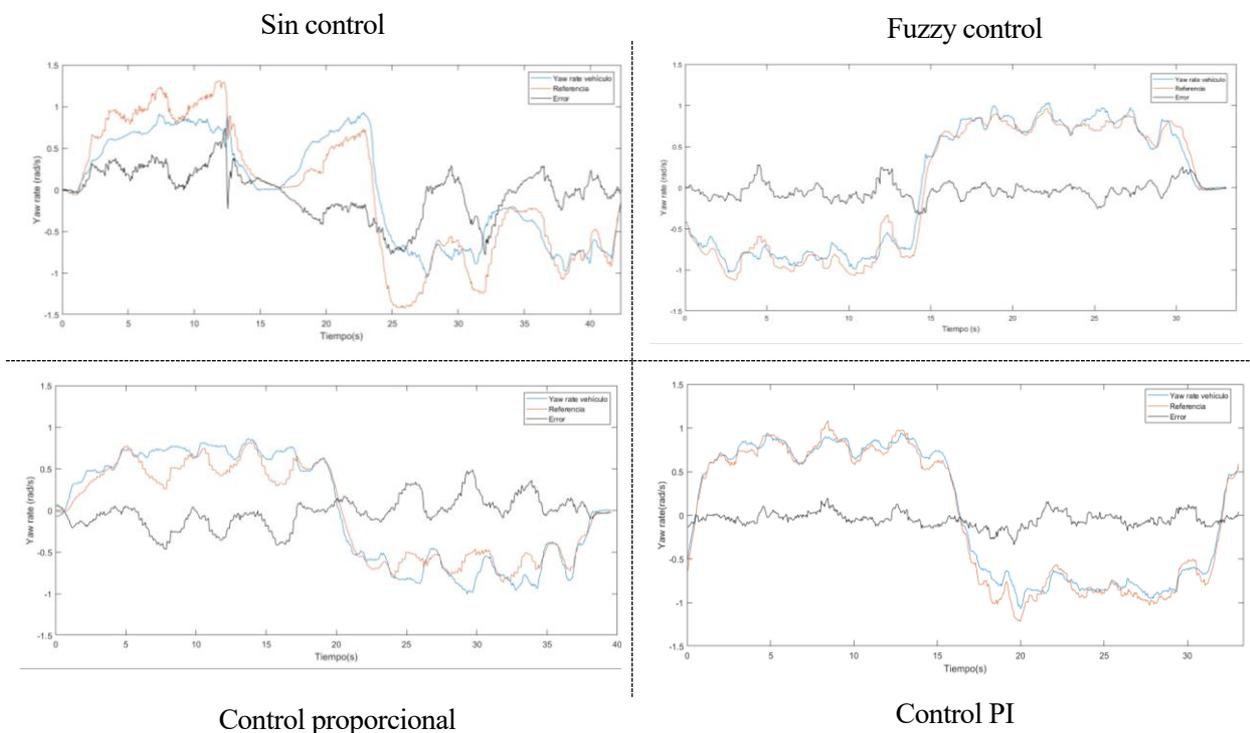


Figura 6-1: Comparativa del control en velocidad angular de las distintas estrategias. Prueba SKIDPAD

En la maniobra de doble cambio de carril, el seguimiento de la velocidad angular no es mejorado significativamente por ninguno de los 3 controladores respecto a la situación sin control (Figura 6-2). De hecho, el mínimo error relativo que se presenta durante la prueba asciende desde el 20 hasta el 60 % al incluir los controladores. En cuanto al error absoluto, este se establece en rangos similares en el caso sin control, con el controlador basado en lógica difusa y el controlador proporcional siendo algo menor en el caso en el que se utiliza el controlador PI. El ISE aclara lo anterior, ya que los casos de controlador proporcional y el basado en lógica difusa presentan un mayor ISE que el caso sin control. Sin embargo, el controlador PI presenta un ISE menor.

<sup>17</sup> ISE: Integral del error cuadrático. En sistemas discretos se define como la suma de los errores al cuadrado.

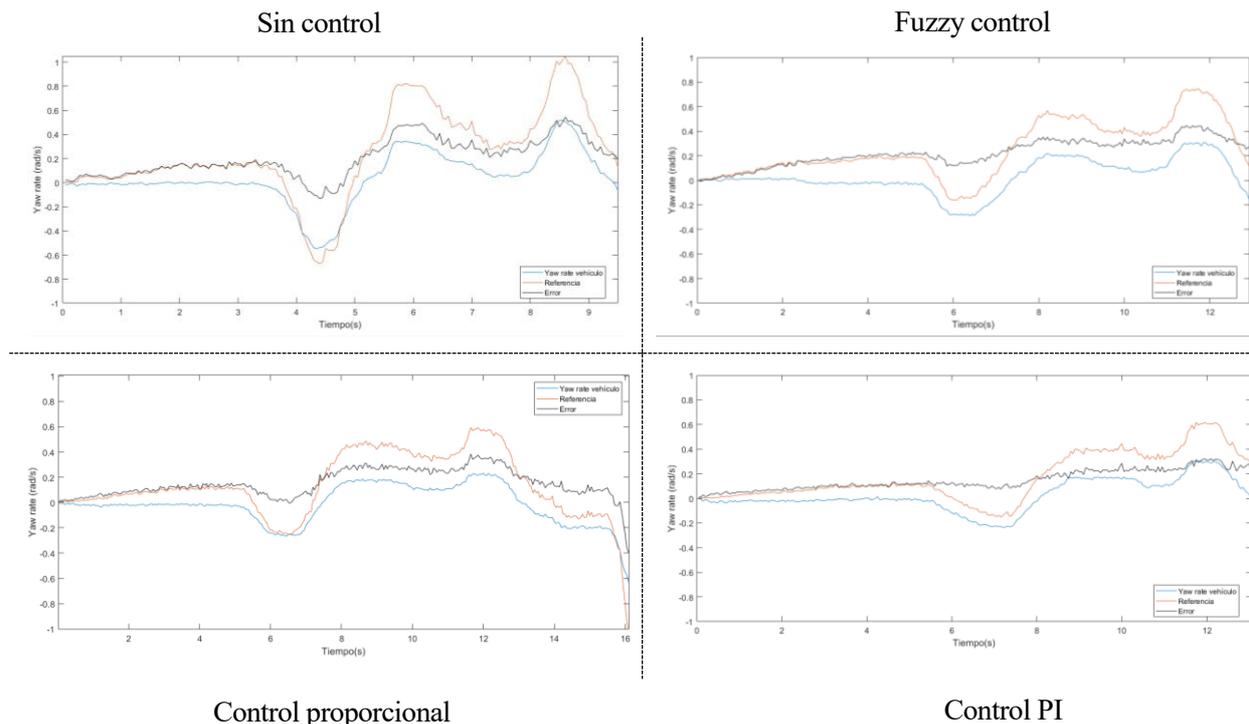


Figura 6-2: Comparativa del control en velocidad angular de las distintas estrategias. MOOSE Test<sup>18</sup>

Controlador   Prueba	Error Absoluto (rad/s)	Error Relativo (%)	ISE (rad <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> )
Sin control   SKIDPAD	[-0.6, 0.6]	[30, 100]	72.38
Fuzzy   SKIDPAD	[-0.2, 0.2]	~20	6.94
Proporcional   SKIDPAD	[-0.4, 0.4]	[10, 100]	25.88
PI   SKIDPAD	[-0.1, 0.1]	~15	5.86
Sin control   MOOSE	[-0.1, 0.4]	[20, 100]	12.47
Fuzzy   MOOSE	[0.2, 0.4]	[60, 100]	16.21
Proporcional   MOOSE	[0.2, 0.3]	[60, 100]	13.86
PI   MOOSE	~0.2	[60,100]	7.40

Tabla 6-1: Resumen errores presentados por cada controlador en cada prueba.<sup>19</sup>

Por lo tanto, para las pruebas realizadas, en las condiciones realizadas y teniendo en cuenta solo el control en velocidad angular, el controlador PI parece proporcionar la mejor respuesta. Además de presentar la mayor reducción en términos de error en velocidad angular, aplica correctamente la idea del par diferencial y tiene mayor capacidad para reducir la aceleración lateral del vehículo.

<sup>18</sup> MOOSE Test o "Prueba del Alce" es el nombre por el que comúnmente se conoce a la maniobra de doble cambio de carril ISO 3888.

<sup>19</sup> Los rangos de errores presentados en la tabla 6-1 no son estrictos. Es decir, pueden existir valores momentáneos que salgan de este rango. Sin embargo, el rango presentado es el rango donde varía el error, casi en su totalidad, durante la prueba.

Sin embargo, no hay que olvidar que, a diferencia del control basado en lógica difusa y del control proporcional, el controlador PI debe acoplarse a un control de tracción para evitar la pérdida de adherencia de las ruedas. Este controlador tampoco presenta un control de estabilidad lateral (control sobre el ángulo de deslizamiento) con lo que, la estrategia basada en lógica difusa podría ser más adecuada si se considera dicho control (ya que mantendría el ángulo de deslizamiento en valores adecuados para evitar el deslizamiento lateral) y si se corrige su aplicación del par diferencial.

## 6.2 Trabajo futuro

Para continuar con el desarrollo del proyecto FOX y de las distintas estrategias de control planteadas se podrían acometer las siguientes tareas:

- **Resolución del problema de desvirtuación de los valores de los ángulos de orientación del vehículo, introducido por el magnetómetro** (apartado 5.1.3). Actualmente, el driver de la IMU (hilo “*imu\_fox.c*” dentro del programa que ejecuta la ECU) obtiene los datos de la misma por “polling” e implementa una configuración por defecto, es decir, esta configuración se preestablece y no es modificada en tiempo de ejecución. Para solucionar el problema relacionado con el magnetómetro debería consultarse el manual de la IMU [18] para establecer mensajes de configuración, que permitan, en tiempo de ejecución, realizar un reseteo del magnetómetro. Tras esto, deberían realizarse pruebas de validación que nos permitan verificar que se ha solucionado el problema.
- **Evaluación de las estrategias de control completas planteadas en este proyecto, es decir, implementando el control de estabilidad lateral (control en ángulo de deslizamiento) en aquellas que lo consideren.** Para la realización de esta tarea es necesario haber realizado la anterior con el objetivo de que los valores de velocidad longitudinal, transversal y de ángulo de deslizamiento del vehículo no sean desvirtuados. Para la evaluación se propone realizar la batería de pruebas que se plantean en el apartado 5.1. De esa forma podrá observarse la influencia del control de estabilidad lateral y podrán compararse las estrategias de control completas.
- **Mejora de los algoritmos de control.** Revisar el planteamiento de cada una de las estrategias de control con el objetivo de introducir modificaciones que puedan mejorar las respuestas de las mismas. Entre dichas modificaciones deberían aparecer:
  - **Corrección de la aplicación de la idea del par diferencial en el control basado en lógica difusa y en el control proporcional.**
  - **Replanteamiento de la capa del Supervisor en el control proporcional para evitar que se produzcan activaciones/desactivaciones innecesarias.** Además de presentar un umbral de desactivación distinto del de activación, debería incluirse alguna condición que evalúe que la condición de desactivación no se ha producido solo momentáneamente (en uno o dos ciclos)
- **Realización de pruebas distintas.** Además de las pruebas realizadas en este proyecto, se propone realizar otra batería de pruebas sobre otro tipo de superficies (como asfalto o adoquín) y a mayores velocidades con la idea de evaluar las estrategias de control implementadas en situaciones más cercanas a experiencias reales de conducción.

# REFERENCIAS

---

- [1] HOV, Ø., HÖPPE, P., W. KUNDZEWICZ, Z. Figures. En: *Extreme weather events in Europe*. EASAC Website. [Consulta: 22 marzo de 2019]. Disponible en: <https://easac.eu/publications/details/extreme-weather-events-in-europe/>
- [2] Climate Analysis Data Tool (CAIT). World Resources Institute. [Consulta 22 marzo de 2019]. Disponible en: <http://cait.wri.org/>.
- [3] BAYER, RAYMOND GEORGE, 2004, Terminology and Classifications. En: BAYER, RAYMOND GEORGE *Mechanical Wear Fundamentals and Testing*. 2. Marcel Dekker. pp 1-5. ISBN 0-8247-4620-1.
- [4] D. YIN, S. OH y Y. HORI, 2009. A novel traction control for ev based on maximum transmissible. En: *IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRIAL ELECTRONIC*. Vol. 56, No. 6, pp 2086-2094.
- [5] del Ojo Jiménez, Ángel. 2016. *Diseño de estrategias de control de tracción para vehículos eléctricos con motores en rueda*. Sevilla: s.n.].
- [6] B. L. Boada, M. J. L. Boada y V. Díaz, *Fuzzy-logic applied to Yaw moment control for vehicle stability*.
- [7] J. Kiumars, *Stability Control of Electric Vehicles with In-wheel Motors*.
- [8] J. Bravo Riera y P. Luque Rodríguez, *Análisis del comportamiento dinámico en vehículos con tracción independiente a las cuatro ruedas*.
- [9] J. Yoon, S. Yim, W. Cho, B. Koo y K. Yi, Design of an unified chassis controller for rollover prevention, manoeuvrability and lateral stability, de *Vehicle System Dynamics: International Journal of Vehicle Mechanics and Mobility*, 48:11, 1247-1268.
- [10] S. Hallowell y L. Ray, 2003. All-wheel driving using independent torque control of each wheel, En; *American Control Conference. Proceedings of the 2003*, pp 2590 - 2595 vol.3.
- [11] Hernández, G., Bordons, C. y Montero, C., 2015. Control de estabilidad basado en MPC para un vehículo eléctrico con motores en rueda. En: *XXXVI Jornadas de Automática*. Bilbao: Comité Español de Automática da la IFAC (CEA-IFAC).
- [12] Lochlan Brown, 2013. *Improving performance using torque vectoring on an electric all-wheel-drive formula sae race car*.
- [13] Navas Alcántara, Miguel. 2017. *Diseño de controladores para vehículo eléctrico con cuatro motores en rueda*. Sevilla: s.n.].
- [14] David Marcos, 2014. *Contributions to power management and dynamics control in hybrid vehicles*. Sevilla: s.n.]
- [15] Jose Carlos Alonso Cañizal, 2015. *Implementación de control de tracción en vehículos eléctricos con tracción integral*. Sevilla: s.n.]
- [16] Isidro Raya Ramos, 2019. *Control de la dinámica de vehículos eléctricos con motores en las ruedas*. Sevilla: s.n.].
- [17] SAE International, 2016. ARTICLE 6: SKID-PAD EVENT. En: *2017-18 Formula SAE Rules*. pp 157-158
- [18] MicroStrain, 2013. *3DM-GX3©-35 Data Communications Protocol*. Disponible en: <http://files.microstrain.com/3DM-GX3-35%20Data%20Communications%20Protocol.pdf>