



INSTITUTO
MEXICANO
DEL
TRANSPORTE

COORDINACIÓN DE INGENIERÍA VEHICULAR
E INTEGRIDAD ESTRUCTURAL

INFORME DE INVESTIGACIÓN

PROYECTO NO. EE 10/12: EVALUACIÓN DE LLANTAS SUPERSENCILLAS XONE
PARA COMBINACIONES DOBLEMENTE ARTICULADAS
UTILIZANDO CONVERTIDOR TIPO H

Responsable del proyecto:

Dr. Manuel de Jesús Fabela Gallegos
Jefe del Grupo de Dinámica Vehicular

Aprobó:

Dr. Miguel Martínez Madrid
Coordinador de Ingeniería Vehicular e Integridad
Estructural

Autorizó:

Ing. Roberto Aguerrebere Salido
Director General

Sanfandilla, Qro. 05 de junio de 2012

Esta investigación fue realizada por el Dr. Manuel de Jesús Fabela Gallegos, el M. C. David Vázquez Vega, el M. C. José Ricardo Hernández Jiménez, el M. C. Oscar Flores Centeno y el Téc. Carlos Blake Cervantes, investigadores del Área de Dinámica Vehicular de la Coordinación de Ingeniería Vehicular e Integridad Estructural del Instituto Mexicano del Transporte. Se reconoce la participación del M. C. Omar Segovia Arriola, egresado del Instituto Tecnológico de Celaya, durante la planeación y ejecución de pruebas experimentales.

Se agradece al Ing. Gilberto Maldonado y al Ing. Alberto Aguilera, de Industrias Michelin, S. A. de C. V., por el apoyo en el suministro de llantas de prueba, así como la gestión con Grupo Finsa y Grupo Bimbo para disponer de las unidades vehiculares utilizadas. De la misma manera, se agradece al Sr. Rodolfo Jiménez, de Grupo Bimbo, por el apoyo en la conducción durante las maniobras de prueba.

Se agradecen las observaciones y recomendaciones técnicas durante el desarrollo del estudio del Dr. Miguel Martínez Madrid, Coordinador de Ingeniería Vehicular e Integridad Estructural del Instituto Mexicano del Transporte.

ÍNDICE

	Página
RESUMEN EJECUTIVO	4
INTRODUCCIÓN	5
1 ANTECEDENTES	5
1.1 Convertidores en configuraciones doblemente articuladas	5
1.2 Llanta supersencilla XOne	7
1.3 Objetivo y alcances	8
2 METODOLOGÍA GENERAL	8
2.1 Aspectos Generales	8
2.2 Maniobras	9
2.3 Plan de Pruebas	9
3 DESARROLLO EXPERIMENTAL	10
3.1 Llantas de prueba	10
3.2 Vehículo de prueba	10
3.3 Instrumentación	12
3.4 Acondicionamiento para pruebas	14
4 RESULTADOS	16
4.1 Manejabilidad	16
4.2 Cambio de carril	18
4.3 Frenado	22
4.4 Maniobrabilidad	23
4.5 Acciones del dolly H	24
4.6 Comentarios generales	27
CONCLUSIONES	28
REFERENCIAS	29
ANEXO A. Cambio simple de carril a izquierda	30
ANEXO B. Cambio simple de carril a derecha	36
ANEXO C. Cambio doble de carril a izquierda-derecha	42
ANEXO D. Cambio doble de carril a derecha-izquierda	48

RESUMEN EJECUTIVO

La llanta de base ancha, denominada convencionalmente como supersencilla, se ha considerado como una alternativa de sustitución de las llantas sencillas en arreglo dual tradicional, empleadas en ejes de carga y tracción de vehículos pesados. Una de estas llantas es el modelo XOne del fabricante Michelin, quien ha sustentado su aplicación con diversos estudios que incluyen el efecto en la estabilidad del vehículo y en la interacción con el camino. Estos estudios han tomado como referencia de comparación llantas sencillas Michelin en arreglo dual, mostrando que la XOne ofrece un desempeño general similar y, en algunos casos, mejorando aspectos de manejabilidad y maniobrabilidad, ofreciendo, además, una mejor distribución de la presión de contacto entre llanta y piso.

Los resultados de los estudios han sido el sustento para que sea autorizado el uso de llantas XOne en vehículos de auto transporte, aunque limitada a algunas configuraciones unitarias y simplemente articuladas. Para poder extender la aplicación de la llanta XOne, se realizó un estudio empleando una configuración doblemente articulada del tipo T3S2R4, también conocida como "full", utilizando un convertidor "dolly" tipo A, con resultados que refuerzan las características de comportamiento de la XOne. Con el propósito de complementar el estudio en combinaciones doblemente articuladas, se llevó a cabo el estudio aquí presentado, cuya característica particular es el empleo de un dolly tipo "H". A diferencia del tipo A, este convertidor posee dos puntos de acoplamiento para conectarse al primer semirremolque, además de que el eje posterior tiene capacidad autodireccional.

El estudio, con carácter experimental, utilizó un T3S2R4 convencional con dolly H, a un nivel de carga cercano a lo autorizado para ese tipo de configuración e instrumentado con medidores de variables del movimiento en todas sus unidades. Empleando llantas sencillas Michelin en arreglo dual tradicional, en un caso, y llantas supersencillas Michelin XOne, en otro caso, se realizaron diversas maniobras de conducción en la pista de pruebas del Instituto Mexicano del Transporte. Las maniobras incluyeron cambios direccionales a distintas velocidades, seguimiento de trayectoria circular a velocidad incremental, frenado de pánico y maniobras de giro a baja velocidad. De acuerdo a los resultados, el efecto del tipo de llantas sobre el desempeño dinámico es, en general, de características similares al utilizar llantas supersencillas Michelin XOne o llantas sencillas Michelin en arreglo dual.

De manera particular y respecto a las llantas sencillas en arreglo dual, con el empleo de la supersencilla XOne se observaron ligeras diferencias de mejora en el control direccional ante cambios de carril a distintas velocidades, en el seguimiento de trayectorias curvas y en el espacio requerido para maniobras a baja velocidad. En frenado de pánico, el vehículo mostró un desempeño en piso seco similar al utilizar la XOne o el dual de sencillas; en piso mojado, con la XOne se requirió una menor distancia para alcanzar el paro completo partiendo de velocidades de 60 y 70 km/h, mientras que partiendo de 80 km/h la distancia requerida fue ligeramente mayor respecto al empleo de sencillas en dual.

Respecto al efecto sobre la unidad dolly H, la prueba de seguimiento de trayectoria circular con incremento en la velocidad de avance mostró que una menor demanda en el ajuste direccional promueve también una menor deformación en el extremo de conexión de los brazos del dolly. En el caso del empleo de uno y otro tipo de llantas, se requirieron menos ajustes direccionales y menores ángulos de viraje con las llantas supersencillas XOne, respecto a las sencillas en arreglo dual. En este sentido, la instrumentación no se orientó a la determinación de esfuerzos, por lo que la deformación registrada no constituye un indicador de los máximos esfuerzos que pueden presentarse en la estructura del dolly.

Los resultados presentados sólo son aplicables a las llantas con la tecnología constructiva empleada por el fabricante Michelin. Por tanto, el comportamiento de las llantas empleadas no puede ser extendido ni extrapolado al de llantas de otras marcas, con otro tipo constructivo o de tecnología diferente, que pudieran ser clasificadas como de base ancha.

INTRODUCCIÓN

Las llantas de los vehículos de carretera constituyen el medio para obtener su desplazamiento. Su contacto con el piso le confiere funciones importantes en el control direccional, en la estabilidad, en la aceleración y paro, así como en el soporte de carga y su transmisión a la superficie del camino. Su evolución y desarrollo tecnológico ha repercutido enormemente en la seguridad de los vehículos, así como en la interacción con el pavimento.

En los vehículos empleados para el transporte de carga por carretera, las llantas en arreglo dual han sido de uso acostumbrado en ejes de carga y de tracción. Desde su inicio, su aplicación se fundamentó en el incremento de la carga de soporte, en compartir entre dos llantas la carga soportada por lado de eje y en el incremento del área de contacto con el piso para mejorar la tracción y el frenado. No obstante, las características constructivas han marcado diferencias en la forma en que interactúan con la superficie del camino, lo que ha limitado en algunos casos la fabricación tradicional de llantas con mayor ancho.

En la actualidad, se han desarrollado nuevas tecnologías de materiales y de construcción de llantas de base ancha para favorecer la interacción con el camino, sin menoscabo de la seguridad en la operación de los vehículos. Una de estas llantas es la supersencilla XOne de Michelin, cuyas aplicaciones van encaminadas al uso de una sola llanta por lado de eje, sustituyendo de esta manera el dual de llantas sencillas tradicionales. Como sustento de la factibilidad de esta sustitución, se han desarrollado diversos estudios de seguridad y desempeño de esta llanta en diversidad de combinaciones vehiculares de carga pesada, con resultados favorables respecto al desempeño del arreglo dual tradicional.

El buen desempeño mostrado por la llanta supersencilla XOne ha generado un fuerte interés en empresas de autotransporte para usarla en configuraciones doblemente articuladas denominadas comúnmente como "fulles"; tractocamión que arrastra dos semirremolques. Los estudios previos sobre configuraciones de este tipo se han desarrollado únicamente empleando para el segundo semirremolque un convertidor ("dolly") tipo A, el cual inherentemente le confiere una articulación adicional a la combinación vehicular. Con el propósito de mostrar las capacidades de las llantas y complementar los estudios en combinaciones de tractocamión-semirremolque-remolque, se realizó el presente estudio, empleando, en este caso, un convertidor tipo H en el segundo semirremolque. Las pruebas realizadas fueron de índole experimental, ejecutando diversas maniobras en una pista de pruebas que evidenciaron el desempeño de la llanta supersencilla Michelin XOne respecto a llantas sencillas Michelin en arreglo dual tradicional.

1 ANTECEDENTES

1.1 CONVERTIDORES EN CONFIGURACIONES DOBLEMENTE ARTICULADAS

Las combinaciones vehiculares de carga pesada permiten transportar grandes volúmenes de carga, compuestas comúnmente por una unidad tractiva a la que se acoplan con mecanismos de articulación una o varias unidades de arrastre, las cuales son las portadoras de la carga. Comúnmente, la unidad tractiva es un tractocamión al cual se conecta un semirremolque por medio de un mecanismo de acoplamiento denominado "quinta rueda" (Figura 1).



Figura 1. Tractocamión-semirremolque con mecanismo típico de acoplamiento articulado de quinta rueda.

En configuraciones de tractocamión con dos semirremolques, el segundo semirremolque requiere de una unidad intermedia de acoplamiento comúnmente conocida como "dolly", que sostiene su parte frontal y se conecta a la parte posterior del primer semirremolque (Figura 2). Esta unidad se considera un convertidor, ya que combinado con el semirremolque dan lugar a un remolque.

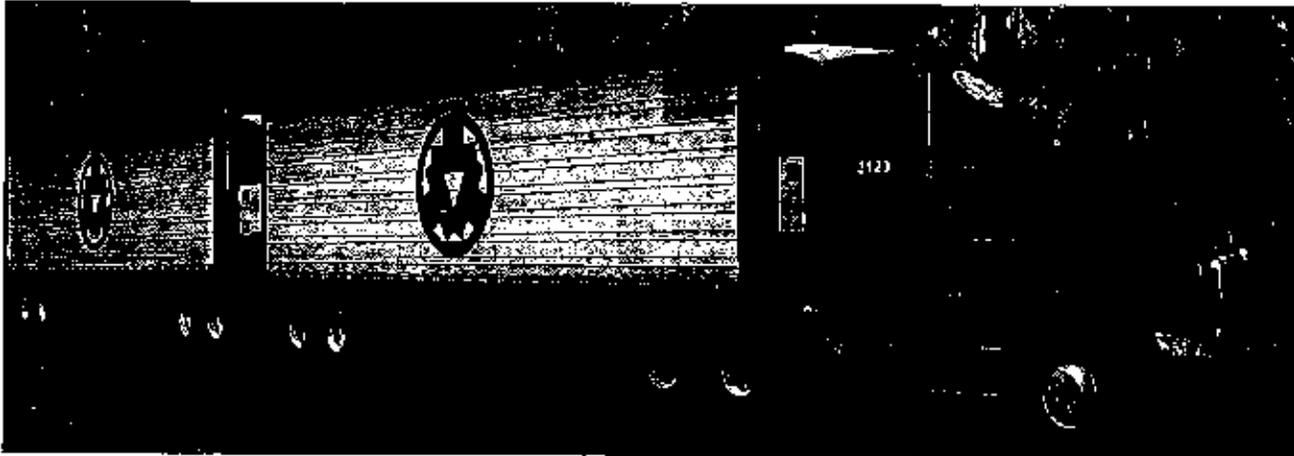


Figura 2. Tractocamión-semirremolque-remolque, con convertidor dolly en el segundo semirremolque.

El convertidor, además de poseer un mecanismo de acoplamiento de quinta rueda, puede tener una lanza de arrastre simple o doble para unirse al semirremolque que le precede. Para facilitar el acoplamiento, las lanzas terminan con una argolla u ojillo, mientras que la unidad a la que se conecta debe estar equipada con uno o dos ganchos de arrastre a los que se conectan las lanzas. Esta configuración de la conexión, además de otros aspectos geométricos y de direccionalidad, permite tipificar a los convertidores como "A" o "H". Un esquema que denota estas características se muestra en la Figura 3.

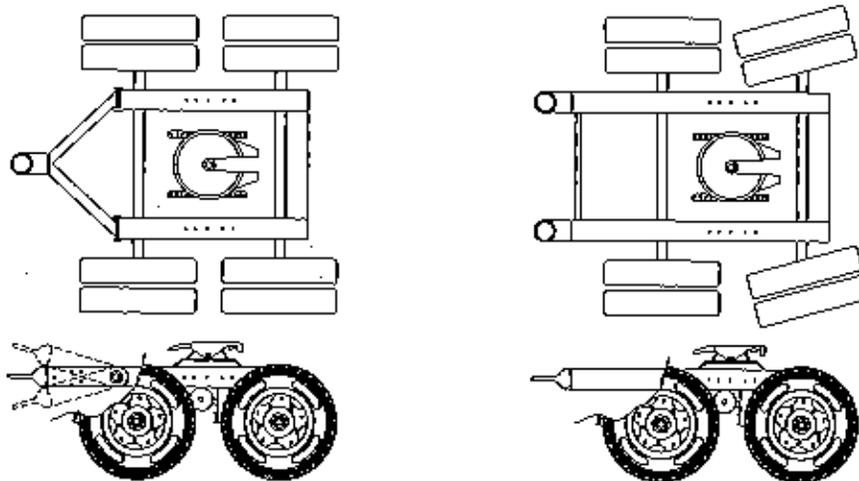


Figura 3. Esquema de convertidores "dolly", tipo "A" (izquierda) y tipo "H" (derecha).

Aunque existen convertidores (dolly) con un solo eje, los mayormente empleados en México cuentan con dos ejes. Respecto al dolly "A", su característica principal es que posee sólo un ojo de lanza que constituye el punto de articulación para girar libremente, dentro de cierto intervalo, alrededor de un eje vertical. Adicionalmente, la lanza puede girar hacia arriba y hacia abajo, lo que le permite ajustarse a las diferencias de altura que pudieran existir con el punto de conexión con el semirremolque al que se conecta.

Por otro lado, el tipo "H" incluye dos puntos de conexión para su arrastre, cada uno rematado en un ojo de lanza independiente. Esta doble conexión evita la unión articulada entre el convertidor y la unidad que la precede, funcionando prácticamente como una extensión de esa unidad. Aunque esta conexión elimina movimientos de coleo y balanceo entre ellas, modifica la maniobrabilidad del vehículo a baja velocidad, demandando mayor arrastre de llantas y generando fuerzas elevadas en los puntos de conexión. Para atenuar esos efectos, el eje posterior del convertidor regularmente cuenta con un mecanismo direccional que permite que las llantas puedan virar durante maniobras cerradas de giro, normalmente activadas por la fuerza lateral generada entre llanta y piso.

1.2 LLANTA SUPERSENCILLA XONE

En el desarrollo de llantas para vehículos de carretera han surgido diversas propuestas orientadas a mejorar su desempeño. Además de los aspectos de capacidad de carga, de mantenimiento y de operación, se ha incursionado en la modificación de dimensiones, particularmente al introducir llantas con base de mayor ancho para mejorar la interacción superficial con el camino en un área de contacto única por lado de eje. No obstante, los primeros diseños de llantas de base ancha generaron preocupaciones sobre la magnitud del daño al pavimento por tener una menor superficie de contacto que llantas en arreglo dual, además de mayores presiones de inflado. Los estudios correspondientes evidenciaron presiones de contacto considerablemente mayores que las duales, provocando un incremento significativo en el daño a los pavimentos, [1, 2, 3].

El desarrollo en la investigación para la mejora de materiales y diseños constructivos dio lugar a una nueva generación de llantas de base ancha. Tal es el caso de la llanta supersencilla XOne de la empresa Michelin (Figura 4), la cual es una llanta de base ancha diseñada y construida con base en la tecnología denominada Infiniticoll®. Esta tecnología le confiere un desempeño completamente diferente al de las llantas de base ancha de generaciones previas, mejorando las cualidades de operación del vehículo y de interacción con el camino, [4]. Su aplicación en vehículos pesados permite sustituir el dual tradicional de llantas sencillas en los ejes de carga y en los de tracción sin afectar la configuración estructural del vehículo, siendo la única diferencia la del uso de un rim ajustado para el ancho de la llanta.

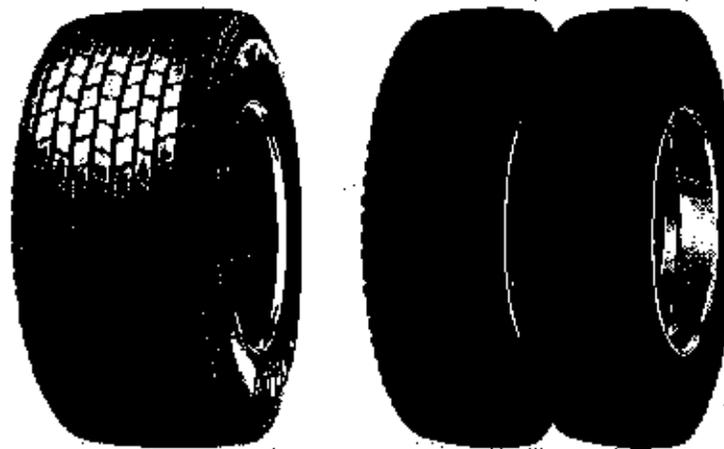


Figura 4. Llantas supersencilla XOne de Michelin y su contraparte de sencillas en arreglo dual.

Para la introducción de la XOne al mercado mexicano, autoridades reguladoras del uso de las carreteras y del transporte de carga pesada evidenciaron la necesidad de analizar el comportamiento de la llanta y evaluar los efectos en el desempeño dinámico del vehículo, así como de la capacidad de producir deterioro a la infraestructura del camino. Atendiendo tal preocupación, se realizaron primeros estudios referentes a los efectos en la estabilidad de combinaciones vehiculares simplemente articuladas del tipo tractocamión-semirremolque, así como de la magnitud y distribución de la carga de interacción entre la llanta y la superficie del camino. En ambos casos, el comportamiento de la llanta evidenció mejor desempeño en el vehículo y menor propensión a producir daño al camino, respecto al uso de llantas en arreglo dual tradicional, [5, 6].

Con la evidencia suministrada como resultado de esos estudios, la Secretaría de Comunicaciones y Transportes permitió el uso de la llanta supersencilla Michelin XOne como sustituto del arreglo dual de llantas tradicionales,

autorización publicada en el Diario Oficial de la Federación el 5 de marzo de 2008, [7]. No obstante, limitó su aplicación a configuraciones vehiculares distintas a las utilizadas para el transporte de materiales peligrosos, autobuses de dos ejes y de combinaciones doblemente articuladas denominadas "fulles".

Típicamente, la configuración de "full" se compone de tractocamión-semirremolque-remolque, con dos acoplamientos de quinta rueda, razón por la cual se clasifican como doblemente articulada. La primera quinta rueda se ubica en el tractocamión, con la cual se acopla el primer semirremolque. Para la conformación del remolque como última unidad de arrastre, se utiliza un "dolly" con una segunda quinta rueda con la cual se acopla el segundo semirremolque. Así mismo, el dolly puede ser del tipo "A" o del tipo "H", de acuerdo a la forma de enganche con la unidad que la precede. Para el caso del empleo de un dolly "A", la configuración resulta físicamente con tres articulaciones en el plano del movimiento, mientras que con un dolly "H" se mantienen únicamente las dos articulaciones proporcionadas por las quintas ruedas.

Para proveer información de sustento para el uso de la llanta XOne en combinaciones de full, se llevó a cabo un estudio en una configuración tractocamión-semirremolque-remolque del tipo T3S2R4, utilizando en el remolque un convertidor "dolly" A. Como resultado general se obtuvo un efecto práctico similar de la XOne al de las sencillas en arreglo dual tradicional, con ventaja en la estabilidad de la XOne respecto a la pérdida súbita de presión, [8]. No obstante, como complemento de información de ese estudio, se consideró necesario evaluar el uso de la XOne al utilizar convertidores tipo H, cubriendo con ello la posibilidad de que la llanta supersencilla se pueda utilizar en esos casos.

1.3 OBJETIVO Y ALCANCES

De acuerdo al Interés de aplicación de las llantas, el objetivo de este estudio fue evaluar el desempeño y los efectos de la llanta Super Single XOne (supersencilla) respecto a llantas en arreglo dual tradicional, en el comportamiento dinámico de una combinación de tractocamión con doble semirremolque y un convertidor "dolly" tipo "H".

El estudio contempló únicamente la evaluación experimental y de manera comparativa, de modelos similares de llantas Michelin de servicio pesado, supersencillas XOne y sencillas en arreglo dual. Se consideró únicamente el empleo de una configuración vehicular doblemente articulada con dolly tipo "H" (como unidad convertidora a remolque), del tipo tractocamión-semirremolque-remolque T3S2R4. Las pruebas experimentales se ejecutaron en la pista de pruebas del Instituto Mexicano del Transporte, en Sanfandila, Qro., con capacidades para ejecución de pruebas con vehículos pesados.

En las pruebas se utilizaron llantas supersencillas con designación X-One 445/50R22.5 en ejes tractivos (modelo XDA Energy) y en ejes de carga (modelo XTA), así como arreglos en dual de llantas sencillas 275/80R22.5 en ejes tractivos (modelo XDA5) y en ejes de carga (modelo Pilot XT-1). En el eje direccional se utilizaron llantas 275/80R22.5 XZE durante todo el proceso de pruebas.

2 METODOLOGÍA

2.1 ASPECTOS GENERALES

El proceso de evaluación, de índole experimental, consistió en representar diversas acciones de conducción en pista de una configuración doblemente articulada con un convertidor tipo H. Durante el desarrollo de las maniobras se midieron y registraron diversos parámetros del desempeño del vehículo en su totalidad, así como en cada una de las unidades de la configuración. Las maniobras en pista fueron las asociadas con el control direccional, la manejabilidad y la capacidad de frenado en piso seco y húmedo, así como de maniobrabilidad a muy baja velocidad.

Para el proceso se definieron dos casos de estudio, de acuerdo al uso de llantas sencillas en arreglo dual típico, en un caso, y llantas supersencillas XOne (de tipo y construcción similar), en otro, en todos los ejes de tracción y de carga de la configuración. Los resultados obtenidos con el uso de llantas en arreglo dual fueron considerados como datos de referencia para comparación con los resultados al emplear llantas supersencillas.

Para lograr las mediciones, cada unidad fue acondicionada para la colocación de diversos instrumentos y equipos de medición, cuyos datos de registro fueron adquiridos por un sistema de adquisición de datos. Con el vehículo

instrumentado se realizaron las pruebas en diversos tramos de la pista de pruebas previamente acondicionada para el seguimiento de trayectorias, de acuerdo a las maniobras establecidas.

2.2 MANIOBRAS

Las maniobras base consideradas fueron tipificadas como de maniobrabilidad, de manejabilidad, de frenado y de estabilidad direccional. Todas las maniobras realizadas fueron ejecutadas en la pista de pruebas del IMT, aprovechando sus características geométricas y sus capacidades estructurales. Las maniobras comprendieron acciones de maniobrabilidad, de seguimiento de curva circular, de simulación de cambios de carril y de frenado.

Las pruebas de maniobrabilidad consisten en desplazar el vehículo a muy baja velocidad (menor a 5 km/h) mientras el volante de dirección se mantiene en una posición de giro fija (en distintos intervalos), describiendo una trayectoria aproximadamente circular. A partir de estas pruebas se determina el espacio requerido para maniobras a baja velocidad (radios de giro y posible despiste - *offtracking* - de unidades remolcadas).

En el seguimiento de trayectoria circular el vehículo se desplaza a velocidad de avance constante describiendo una curva de radio constante, considerando un intervalo de velocidad establecido. Con esta prueba se determina el efecto sobre la respuesta direccional de cada una de las unidades que componen la configuración vehicular de prueba y las características de manejabilidad de la unidad tractiva.

La maniobra direccional de cambios de carril consiste en desplazar el vehículo manteniendo una misma velocidad de avance y desplazándose, a la vez, lateralmente, simulando el cambio hacia un carril adyacente y, en otro, el cambio y retorno al carril original. Los resultados de esta prueba conducen a características de la respuesta direccional y estabilidad lateral de las unidades remolcadas ante cambios de dirección.

En las pruebas de frenado se desplaza el vehículo en trayectoria recta a velocidad de avance constante, cuando de manera repentina se acciona totalmente el pedal del freno hasta la completa detención del vehículo. La prueba se realiza en dos modalidades, con la superficie del pavimento seco y con la superficie húmeda. De la prueba se obtienen las características de la desaceleración experimentada, estimando la distancia invertida para detener el vehículo una vez aplicados los frenos.

2.3 PLAN DE PRUEBAS

De acuerdo a la metodología de evaluación, las pruebas contemplaron las maniobras descritas con el vehículo de prueba utilizando en ejes de carga y tracción llantas sencillas en arreglo dual y, en contraparte, llantas supersencillas XOne. Las condiciones de ejecución, para uno y otro tipo de llantas, se planificaron como se indica en la Tabla 1.

Tabla 1. Plan general de pruebas para cada arreglo de llantas (dual y supersencilla).

Prueba	Parámetro	Condición	Eventos
Manejabilidad	Velocidad Dirección	20, 30, 40, 50, 60 km/h Giro izquierdo, giro derecho	2 repeticiones por condición
Simple Cambio de Carril (SCC)	Velocidad Dirección	60, 70 y 80 km/h Cambio izquierdo, Cambio derecho	3 repeticiones por condición
Doble Cambio de Carril (DCC)	Velocidad Dirección	60, 70 y 80 km/h Cambio izquierdo, Cambio derecho	3 repeticiones por condición
Maniobrabilidad	Ángulo en volante Dirección	360°, 450°, 540° Giro izquierdo, giro derecho	Hasta alcanzar configuración geométrica estable
Frenado	Velocidad Condición superficial	60, 70 y 80 km/h Piso seco, piso húmedo	3 repeticiones por condición

Las pruebas fueron llevadas a cabo en pista cerrada, acondicionada para la ejecución de las diversas maniobras. Las velocidades altas de prueba dependieron de las capacidades y disposición de potencia útil en la unidad motriz, alcanzables en el circuito de prueba de la pista.

3 DESARROLLO EXPERIMENTAL

3.1 LLANTAS DE PRUEBA

Las llantas sujetas a evaluación, marca Michelin y de manufactura reciente (llantas nuevas), comprendieron llantas para ejes de tracción (tractocamión) y llantas para ejes de carga (semirremolques). En el eje direccional se empleó en todo momento llantas sencillas 275/80R22.5 versión XZE. Las llantas de referencia correspondieron a sencillas en arreglo dual tradicional, 275/80R22.5 en versión XDA5 para tracción y Pilot XT-1 para carga. Como llantas de prueba se utilizaron supersencillas 445/50R22.5 en versión XDA Energy para tracción y XTA para carga. Las llantas mencionadas se muestran en la Figura 5, con su información técnica general resumida en la Tabla 2, [9].

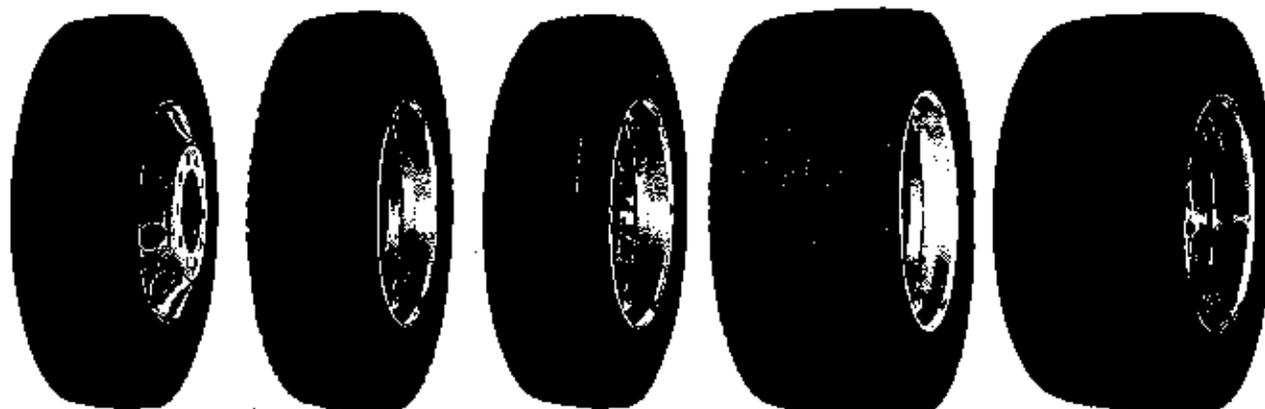


Figura 5. Versiones de llantas de prueba. De izquierda a derecha, 275/80R22.5 XZE, XDA5 y Pilot XT-1; así como XOne 445/50R22.5 XDA Energy y XTA. La llanta XZE se utilizó como llanta direccional en el eje frontal.

Tabla 2. Información general de las llantas de prueba, [9].

Modelo	r_0 [mm]	D [mm]	A_g [mm]	$d_{\text{mín}}$ [mm]	rpm	h_d [mm]	$V_{\text{máx}}$ [km/h]	$L_{\text{máx}}$ [kg/kPa]	L_{dual} [kg/kPa]	m [kg]
XZE 275/80R22.5*	475	1022	282	311	321	17	121	3250/830	3000/830	61,3
XDA5 275/80R22.5	483	1031	281	311	317	24	121	2800/760	2575/760	59,5
Pilot XT-1 275/80R22.5	467	1008	281	311	326	10	121	2800/760	2575/760	47,1
XOne XDA Energy 445/50R22.5	471	1019	436	na	322	19	121	4625/830	No aplica	82,0
XOne XTA 445/50R22.5	463	1003	435	na	328	10	121	4625/830	No aplica	73,3

r_0 : radio de la llanta bajo carga; D: diámetro global; A_g : ancho global; $d_{\text{mín}}$: espaciamiento mínimo en dual; rpm: revoluciones por kilómetro; h_d : profundidad de dibujo; $V_{\text{máx}}$: velocidad máxima; $L_{\text{máx}}$: Carga máxima por llanta sencilla y presión de inflado; L_{dual} : Carga máxima por llanta en dual y presión de inflado; m: masa por llanta; na: no aplica. * Llanta utilizada como llanta direccional.

Las llantas se suministraron montadas en su respectivo rim, en cantidad suficiente para el equipamiento de todos los ejes de la configuración de prueba, incluyendo una adicional de cada tipo como refacción. La presión de inflado se mantuvo de acuerdo a la recomendación del fabricante, acorde al nivel de soporte de carga una vez montado en el vehículo de prueba.

3.2 VEHÍCULO DE PRUEBA

La configuración de prueba fue una combinación de unidades del tipo tractocamión-semirremolque-remolque T3S2R4, mostrado en la Figura 6. Al tractocamión, de tres ejes, se acoplaron dos semirremolques de dos ejes cada uno, siendo el segundo semirremolque convertido a remolque con un *dolly* de dos ejes tipo H, (Figura 7).

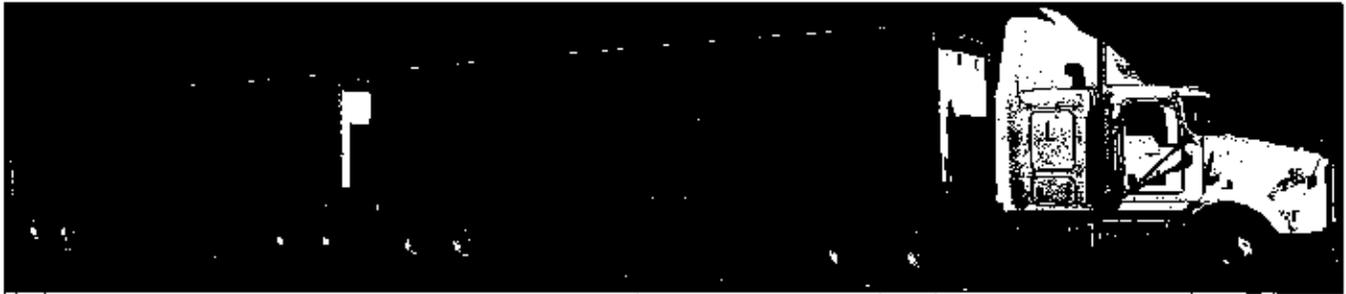


Figura 6. Configuración vehicular de prueba del tipo T3S2R4.



Figura 7. Convertidor dolly tipo H empleado en la configuración T3S2R4 de prueba.

El tractocamión utilizado fue de marca Kenworth, modelo 2003, de 400 hp. Los semirremolques correspondieron a plataformas típicas con cortinas laterales flexibles, mientras que el dolly presentaba placa de identificación de Manufacturas Industriales GAMI, modelo 2011. Las dimensiones de la configuración, una vez acopladas las unidades, se muestran esquemáticamente en la Figura 8.

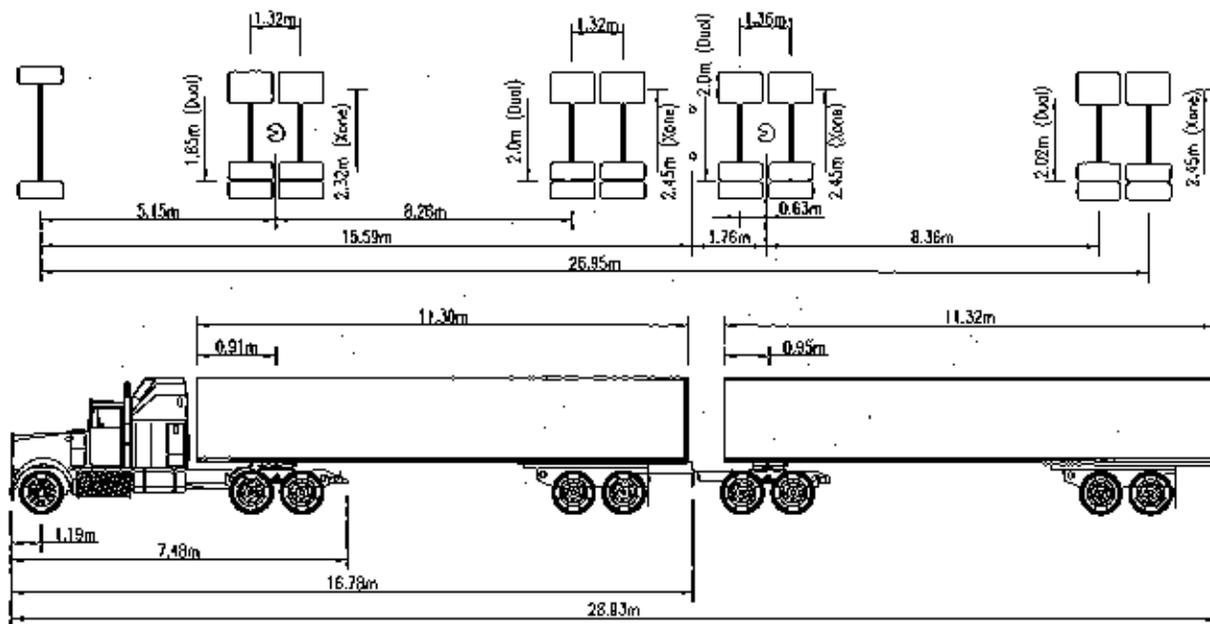


Figura 8. Dimensiones generales de la configuración de prueba. Para ejemplificar, se representan llantas sencillas en arreglo dual y supersencillas XOne.

Los semirremolques fueron cargados con placas metálicas de acero para obtener la condición de carga completa, las cuales fueron depositadas lateralmente y sujetas a la plataforma por medio de bandas tensoras para evitar su desplazamiento. Debido a las dificultades para manipular las placas una vez colocadas sobre las plataformas, resultó la distribución de masa mostrada en la Tabla 3. Las mediciones del peso se obtuvieron por medio de un pesaje estático por ejes, siendo la masa total en la configuración de 77,15 ton.

Tabla 3. Distribución de masa sobre los ejes de la configuración de prueba.

Eje	Tractocamión			Semirráiler 1		Dolly H		Semirráiler 2		Total
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
Masa [ton]	4,94	8,15	8,01	9,12	8,88	9,10	9,10	9,13	10,73	77,15
Peso [kN]	48,4	79,9	78,5	89,4	87,1	89,2	89,2	89,5	105,2	756,5

Ejes numerados del frente hacia atrás.

3.3 INSTRUMENTACIÓN

Como parte previa fundamental para el proceso de registro, se ubicaron y fijaron instrumentos de medición en las diferentes unidades de la configuración, observándose esquemáticamente en la Figura 9. Estos instrumentos correspondieron principalmente a sensores de parámetros cinemáticos, los cuales se ubicaron en puntos que fueron acondicionados para la fijación de los mismos.

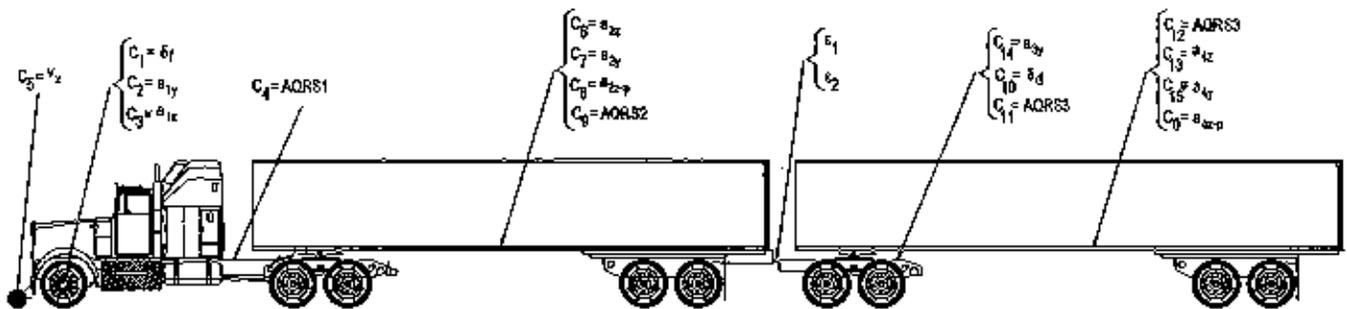


Figura 9. Esquema de los puntos de instrumentación sobre la configuración vehicular T3S2R4.

Apoyado y fijo en la defensa delantera del tractocamión se colocó un dispositivo para medición de la velocidad de avance con base en la determinación de la frecuencia de giro de una rueda. Acondicionado a la estructura de su eje frontal, se ubicó un dispositivo para medir el ángulo de orientación de las llantas direccionales, así como acelerómetros y un medidor de velocidad angular. Estos detalles se presentan en la Figura 10.



Figura 10. Dispositivo medidor de velocidad tipo "quinta rueda" en la defensa frontal del tractocamión y medidor del ángulo direccional en el eje frontal, así como placa portadora de acelerómetros.

Además del eje frontal del tractocamión, el eje posterior del dolly tenía libertad direccional. Por tanto, para conocer la orientación de las ruedas en este eje, de manera particular se adaptó un mecanismo electromecánico para la

medición del ángulo de orientación, basado en un potenciómetro y un juego de poleas (Figura 11). Así mismo, sobre los ojillos de acoplamiento del dolly se colocaron galgas extensométricas para determinar indirecta y comparativamente el nivel de fuerza durante las maniobras direccionales. Para su protección, las galgas fueron protegidas de acuerdo a las recomendaciones propias de aplicación de la técnica de extensometría (Figura 12).

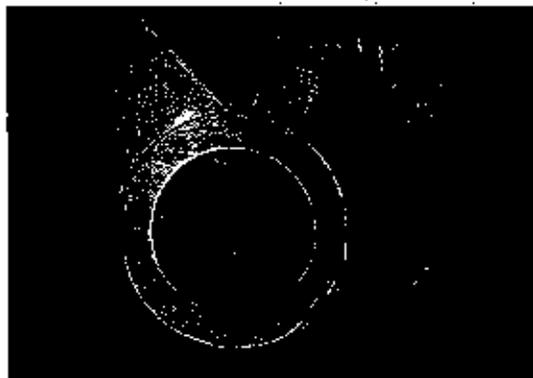


Figura 11. Mecanismo medidor del ángulo direccional en la articulación del segundo eje del dolly.

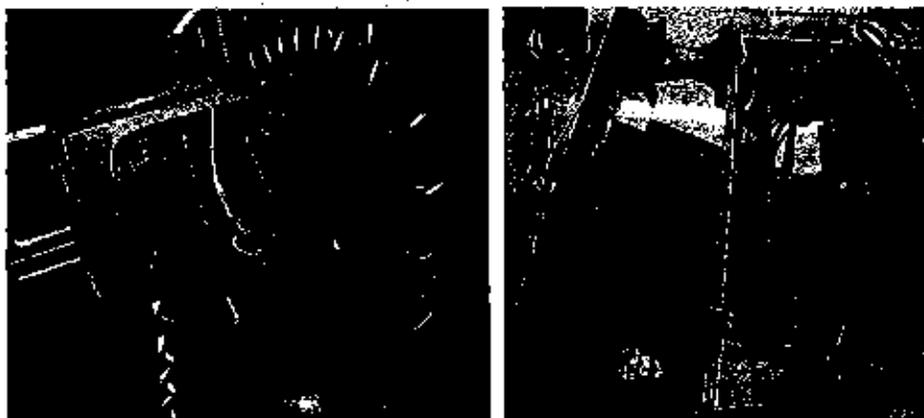


Figura 12. Galgas extensométricas en ojillos de acoplamiento del dolly.

La Figura 13 muestra otros aspectos generales de la instrumentación utilizada. Características de ubicación de los instrumentos y las variables de medición se muestran de manera resumida en la Tabla 4.

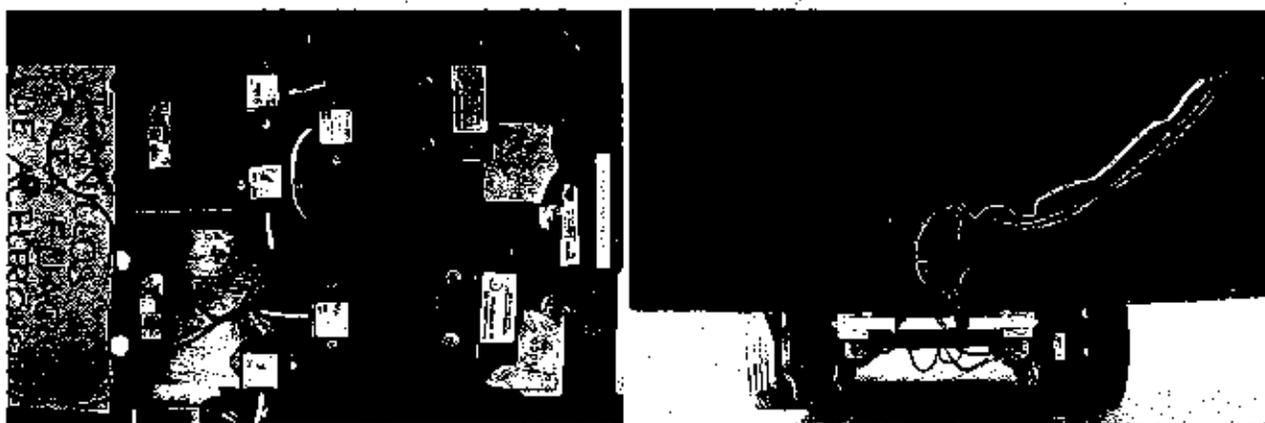


Figura 13. Placas con distintos instrumentos para colocarse en la parte inferior de los semirremolques.

Tabla 4. Descripción general de los sensores utilizados.

Unidad	CANAL	Dispositivo / Instrumento	Variable	Ubicación
U1	C1	Medidor de ángulo direccional	δ_r	Eje frontal (E1) tractocamión
	C2	Acelerómetro capacitivo dirección lateral (y)	a_{1y}	Eje frontal (E1) tractocamión
	C3	Acelerómetro capacitivo dirección longitudinal (x)	a_{1x}	Eje frontal (E1) tractocamión
	C4	Medidor de velocidad angular 1	AQRS ₁	Bastidor de tractocamión
	C5	Medidor de velocidad de avance	V_x	Defensa delantera de tractocamión
	C18	Marca de disparo de manejo manual	-	Tractocamión
U2	C6	Acelerómetro capacitivo dirección vertical (z)	a_{2z}	Estructura de semirremolque 1
	C7	Acelerómetro capacitivo dirección lateral (y)	a_{2y}	Estructura de semirremolque 1
	C8	Acelerómetro piezoeléctrico dirección vertical (z)	a_{2zp}	Estructura de semirremolque 1
	C9	Medidor de velocidad angular 2	AQRS ₂	Estructura de semirremolque 1
U3	C10	Medidor de ángulo direccional	δ_d	Mecanismo direccional de dolly
	C11	Medidor de velocidad angular 3	AQRS ₃	Estructura de dolly
	C14	Acelerómetro capacitivo dirección lateral (y)	a_{3y}	Estructura de dolly
	C16	Extensómetro eléctrico 1	ϵ_1	Lanza de acoplamiento de dolly
	C17	Extensómetro eléctrico 2	ϵ_2	Lanza de acoplamiento de dolly
U4	C0	Acelerómetro piezoeléctrico dirección vertical (z)	a_{4zp}	Estructura de semirremolque 2
	C12	Medidor de velocidad angular 4	AQRS ₄	Estructura de semirremolque 2
	C13	Acelerómetro capacitivo dirección vertical (z)	a_{4z}	Estructura de semirremolque 2
	C15	Acelerómetro capacitivo dirección lateral (y)	a_{4y}	Estructura de semirremolque 2

U1, U2, U3 y U4, respectivamente tractocamión, semirremolque 1, dolly y semirremolque 2 en la combinación vehicular.

Los sensores fueron conectados a un sistema de adquisición de datos compuesto por una caja concentradora de conexiones, por diversos acondicionadores y amplificadores de señal, dirigidos hacia una tarjeta de adquisición de datos. La tarjeta se ubicó en una computadora portátil con procesador intel, la cual tenía instalado el software de control de los parámetros de adquisición y registro de señales. Como parámetro principal de adquisición se estableció la razón de muestreo en 250 datos/s, cuyo registro fue almacenado en el disco duro de la computadora.

De manera redundante, en la cabina del tractocamión se colocó un sistema medidor de velocidad con base en la comunicación con un sistema de posicionamiento global (gps). Para su operación, el sistema requirió de la colocación de tres antenas externas, las cuales se ubicaron sobre la parte frontal del tractocamión. Dadas las características del sistema, se realizaron ajustes para coleccionar datos a una razón de 20 muestras/s, los cuales se almacenaron en una tarjeta tipo "flash drive". Entre otras características de ajuste, se acondicionó para adquirir datos al inicio del movimiento y almacenar registros al detectar el paro del vehículo.

3.4 ACONDICIONAMIENTO PARA PRUEBAS

Algunas de las pruebas requirieron de un acondicionamiento específico de un tramo de la pista utilizada. Para el cambio simple y doble de carril se trazaron las trayectorias sobre la superficie del pavimento para ser seguidas por el operador del vehículo. Las trayectorias fueron marcadas con puntos sobre la superficie del pavimento, separados entre sí dos metros, simulando cambios de carril tanto a izquierda como a derecha. Un aspecto de estos trazos se presenta en la Figura 14.

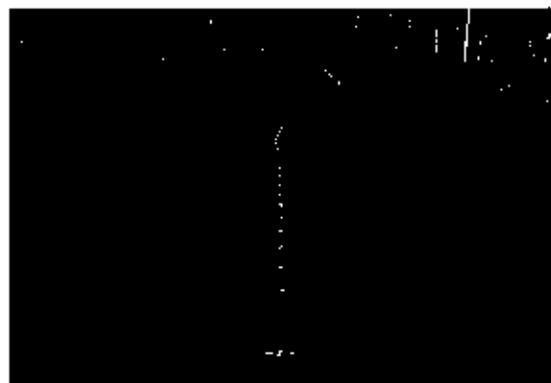


Figura 14. Trazo de cambios de carril sobre el pavimento en la pista de pruebas.

Dadas las características dimensionales del vehículo de prueba, el trazo de la trayectoria para seguimiento en la simulación de cambios simple y doble de carril se apoyó en una función sinusoidal que, al avanzar, permite un desplazamiento lateral de hasta 2,11 m. El esquema, ilustrado en la Figura 15, representa una trayectoria continua en un tramo de 240 m conformada en dos partes, cada una de un cambio simple de carril que, combinadas, generan el cambio doble.

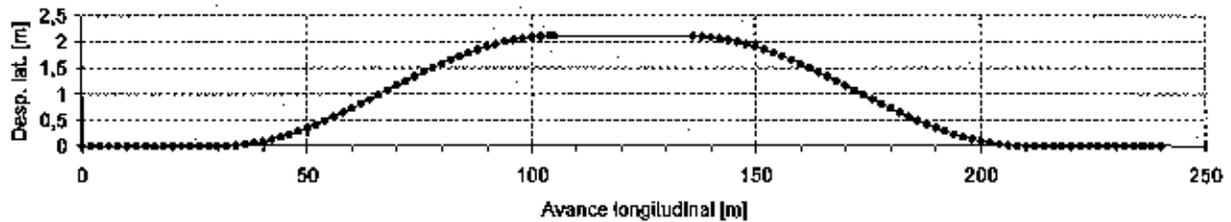


Figura 15. Esquema del trazo sobre el pavimento de cambios de carril.

La primera parte se compone de una recta de 30 m, seguida por una curva sinusoidal que alcanza los 2,11 m en los siguientes 75 m, para terminar en una recta de 30 m, dando lugar esta parte a la trayectoria para la maniobra de cambio simple de carril. La segunda parte retoma esta recta previa, seguida por otra curva sinusoidal que regresa a la línea original en otros 75 m, terminando su salida en una recta de 30 m. Esta misma trayectoria se ajustó para realizar la maniobra con cambio tanto a la izquierda como a la derecha.

Para las maniobras de seguimiento de trayectoria en cambio simple y doble de carril, se determinó y se ajustó la distancia de pre-visualización sobre el tractocamión. Para ello, considerando la posición normal de manejo del conductor, se limitó su campo visual para el avance durante estas maniobras, restringiéndolo a una distancia no mayor de 8 m al frente, con aproximadamente 0,3 m de ancho proyectado sobre el piso. Esto se logró dejando una pequeña abertura en la línea visual del conductor sobre el parabrisas, como se muestra en la Figura 16.



Figura 16. Acondicionamiento en la visual sobre el parabrisas del tractocamión.

Para las pruebas de frenado, la zona designada para la detención repentina del vehículo se delimitó con conos de señalización. Para la modalidad de frenado en húmedo, la superficie del pavimento en esa zona se humedeció con agua para, de esa manera, disminuir la fricción entre llanta y pavimento. El agua fue depositada a través de un riego con un autotanque de 10 mil litros, esparciendo el agua uniformemente sobre la superficie de frenado, como se muestra en la Figura 17.

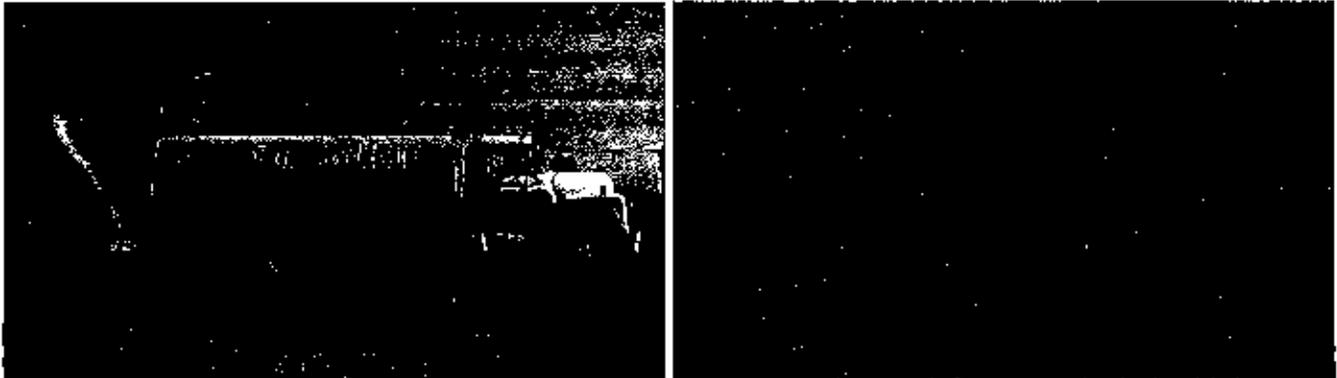


Figura 17. Humedecimiento de la superficie para pruebas de frenado.

Para las otras maniobras programadas, de manejabilidad y de maniobrabilidad, no fue necesario realizar ningún otro acondicionamiento sobre la pista. Para ello, únicamente se seleccionaron las zonas de la pista con la geometría y espacio suficiente para su ejecución.

RESULTADOS

El estudio se desarrolló ejecutando en forma práctica diversas maniobras de conducción en pista, analizadas en términos del efecto del tipo de llanta utilizada en el comportamiento dinámico de la configuración vehicular. Las maniobras representaron el seguimiento de trayectorias, la afectación en la estabilidad lateral y direccional, expusieron la capacidad de detención del movimiento de las diversas unidades en la combinación y mostraron las demandas del espacio necesario en el caso de maniobras a baja velocidad. Los parámetros medidos en cada condición de prueba, fueron principalmente asociados a variables referentes al movimiento de las unidades en la combinación. El comportamiento y valores específicos de estas variables para cada caso de uso de llantas, arreglo dual de sencillas tradicionales o llantas supersencillas XOne, fueron comparadas correspondientemente, enfatizando el efecto sobre la última unidad en la configuración.

4.1 MANEJABILIDAD

La manejabilidad de un vehículo se refiere a su capacidad para seguir una trayectoria definida, como respuesta del ajuste o cambios en su orientación direccional. En este sentido, al ejecutar un cambio en la orientación de las llantas de guía direccional (frontales), las unidades tratan de seguir a la unidad tractiva. Para el seguimiento, ajustan su respuesta para alcanzar la condición de alineamiento a la trayectoria de la unidad que le precede, considerando las condiciones de operación en el movimiento de avance. El alineamiento es afectado por el ajuste en el volante de dirección, transmitido hacia las ruedas direccionales en la unidad tractiva y guía de la configuración. La Figura 18 muestra el comportamiento del ángulo en las llantas direccionales con respecto a la velocidad de avance, durante el seguimiento de una trayectoria circular e incrementando la velocidad.

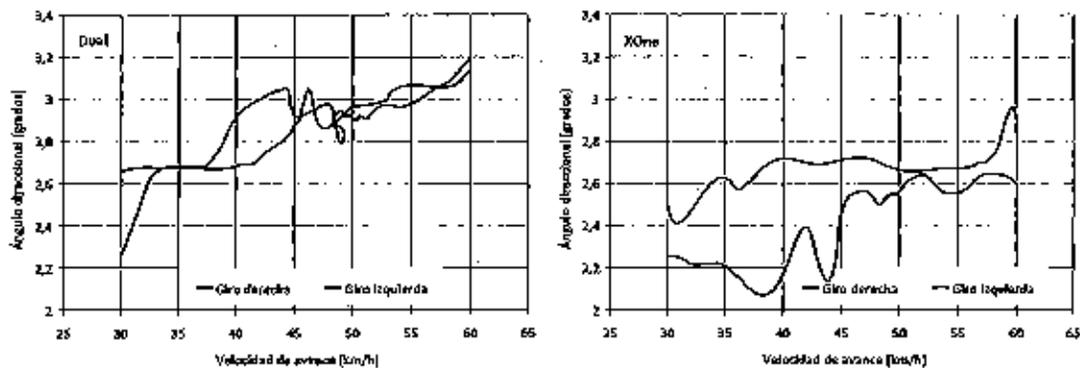


Figura 18. Comportamiento del ángulo en las llantas direccionales con respecto a la velocidad de avance.

Las gráficas muestran la demanda que se tiene en las llantas direccionales conforme se incrementa la velocidad de avance. La uniformidad en la línea de comportamiento es un indicador de los ajustes requeridos para mantener la trayectoria, por lo que la presencia de cambios abruptos o de "rizos" implica mayor cantidad de ajustes. Al utilizar llantas sencillas en dual se presenta una tendencia de mayores ángulos en las llantas direccionales conforme se incrementa la velocidad de avance, alcanzando hasta 3,2° para 60 km/h, además de que en el intervalo de 45 a 50 km/h requiere de ajustes frecuentes. Esta necesidad de ajuste produjo que el tractocamión debiera abrir ligeramente el radio de curvatura de la trayectoria para dar mayor libertad a los semirremolques para que no invadieran la parte interna de la curva.

Respecto al uso de llantas supersencilas XOne, la mayor horizontalidad de la curva denota que se requieren menos cambios en el ángulo de orientación de las llantas direccionales para seguir la trayectoria, con menor influencia de la velocidad. No obstante, la demanda del ángulo para el seguimiento se incrementa poco antes de los 60 km/h, alcanzando poco menos de 3°, particularmente para el giro a la derecha, mientras que el giro a la izquierda se ubica en alrededor de los 2,6° a partir de los 45 km/h.

En el seguimiento de una trayectoria circular, al incrementar la velocidad se generan cambios en los parámetros del movimiento en cada una de las unidades de la configuración vehicular. La aceleración lateral representa la magnitud del empuje transversal que actúa sobre el cuerpo de la unidad, mientras que la velocidad angular representa la rapidez de las unidades para rotar sobre sí mismas durante el seguimiento de la trayectoria. Aunque en la medición de la aceleración lateral intervienen factores como la inclinación del cuerpo producida por efectos inerciales y de deformación, es también afectada significativamente por la geometría de la trayectoria y la velocidad de operación (V^2/R ; V, velocidad de avance, R, radio de curvatura). El comportamiento de la aceleración lateral y la velocidad angular del tractocamión (unidad tractiva direccional), se presenta en la Figura 19.

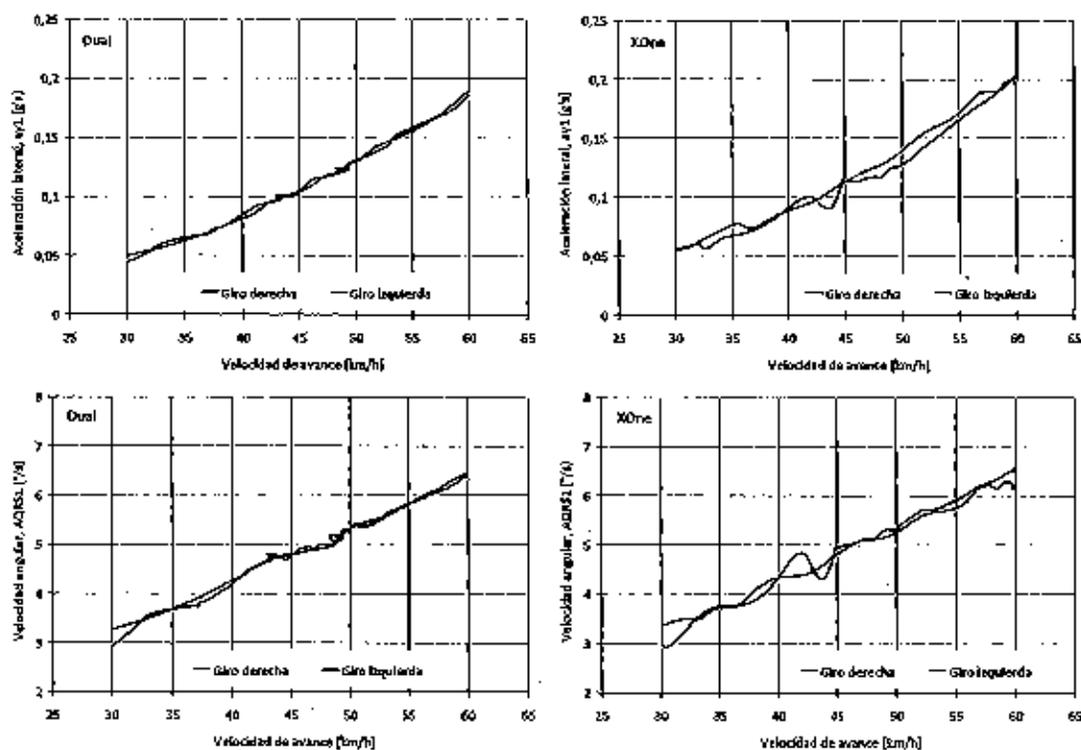


Figura 19. Comportamiento de la aceleración lateral y la velocidad angular respecto a la velocidad de avance, para el tractocamión.

Como se desprende de las gráficas de aceleración para el tractocamión, se alcanzó una menor aceleración lateral en el tractocamión al emplear llantas sencillas en arreglo dual tradicional que al emplear las supersencilas XOne. La principal razón para esa ligera diferencia fue que, en el contexto del desarrollo de las pruebas, debido a los ajustes direccionales del tractocamión se precisó de un mayor radio con el empleo de las llantas en arreglo dual,

mientras que con las llantas XOne se pudo mantener un menor radio y, por tanto, un mayor nivel de aceleración lateral.

Para el caso de la configuración vehicular de prueba y el tipo de convertidor utilizado, resulta importante la respuesta de los parámetros del movimiento de la última unidad. De esta manera, la Figura 20 muestra el resultado gráfico de los registros de aceleración lateral y de velocidad angular para el último semirremolque.

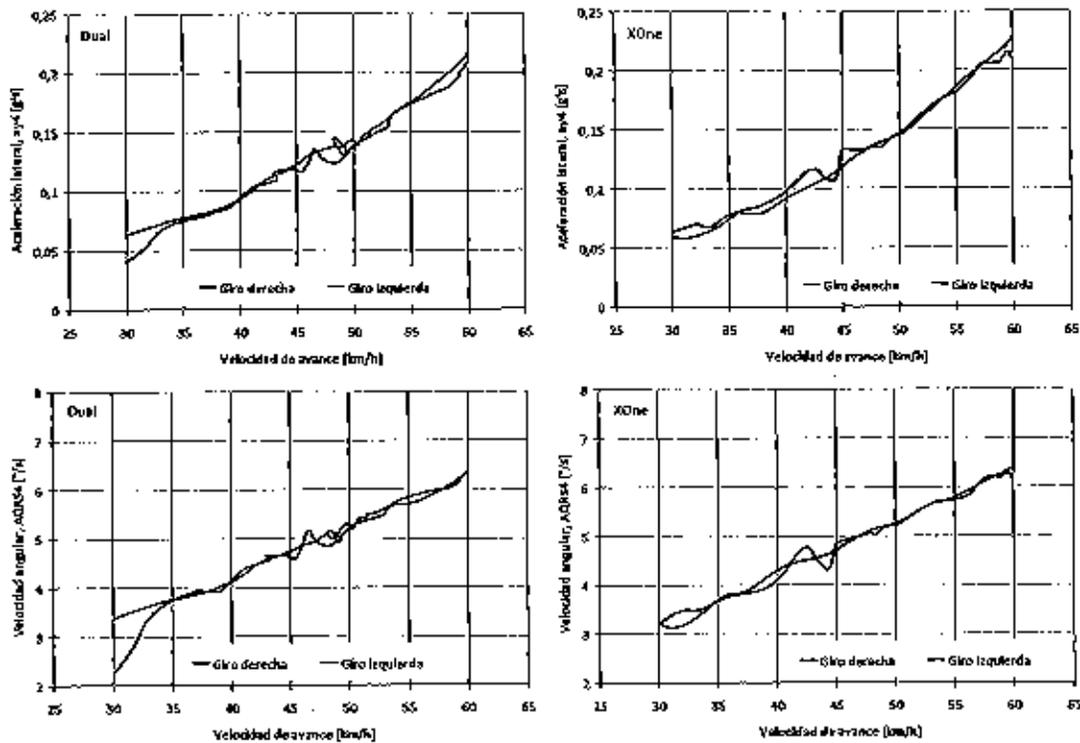


Figura 20. Comportamiento de la aceleración lateral y la velocidad angular respecto a la velocidad de avance, para el último semirremolque en la configuración T3S2R4.

De manera global, las gráficas muestran un reflejo similar del movimiento del último semirremolque respecto al experimentado por el tractocamión. En el caso del arreglo dual, se presentan mayores variaciones con respecto al comportamiento del tractocamión, mientras que con el uso de supersencillas XOne se mantienen prácticamente en el mismo orden de cambio respecto al tractocamión. Esto se observa de la concordancia de las líneas de comportamiento en las correspondientes direcciones de giro, mostrando mayor estabilidad en el giro a la derecha, siendo más uniforme en el caso de la XOne. Se observa también el menor valor de aceleración lateral en el semirremolque cuando se emplean llantas en arreglo dual, respecto al alcanzado por el mismo al utilizar llantas supersencillas XOne. Esto corrobora el efecto de los mayores ajustes direccionales necesarios por el tractocamión al emplear llantas en arreglo dual, debido al mayor espacio lateral requerido para absorber los cambios direccionales en la última unidad y, con ello, mayor radio de curvatura de la trayectoria producida. En ambos casos de empleo de llantas, los mayores ajustes se aplicaron durante el seguimiento de trayectoria con giro a la izquierda.

4.2 CAMBIO DE CARRIL

Las maniobras de cambio de carril comprendieron cambios simples y dobles, iniciando con desplazamientos laterales tanto a izquierda como a derecha, guiados por el ajuste en el ángulo de orientación de las llantas direccionales a través del volante. Así, se obliga a la unidad tractiva a cambiar su trayectoria recta transitoriamente siguiendo un trazo sinusoidal, siendo a su vez obligadas las unidades de arrastre a tratar de ajustarse a ese cambio temporal. De estas maniobras se extrajeron el ángulo direccional requerido (Δ_f), así como la

aceleración lateral (a_y) y la velocidad angular (AQRS), tanto de la primera como de la última unidad en la combinación. Con base en el comportamiento, se obtuvo un factor de amplificación de coleo para cada caso.

Cambio simple de carril

Una primera serie de pruebas de este tipo consistieron en ejecutar el cambio simple de carril. De esas pruebas se obtuvo la amplitud del ángulo de orientación de las ruedas direccionales en el tractocamión para la ejecución de la maniobra, así como la aceleración lateral y la velocidad angular de coleo del tractocamión y del segundo semirremolque, primera y última unidad de la configuración. Ejemplos gráficos se muestran en la Figura 21 para la aceleración lateral y en la Figura 22 para la velocidad angular, al ejecutarse el cambio simple de carril hacia la izquierda, ejecutada a una velocidad de avance de 80 km/h.

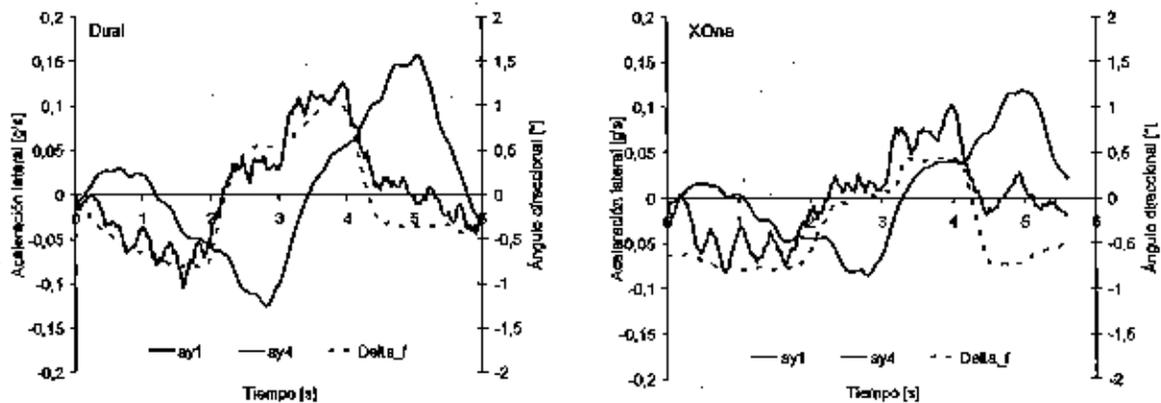


Figura 21. Típica aceleración lateral en la primera y última unidades de la configuración durante cambio simple a carril izquierdo a 80 km/h.

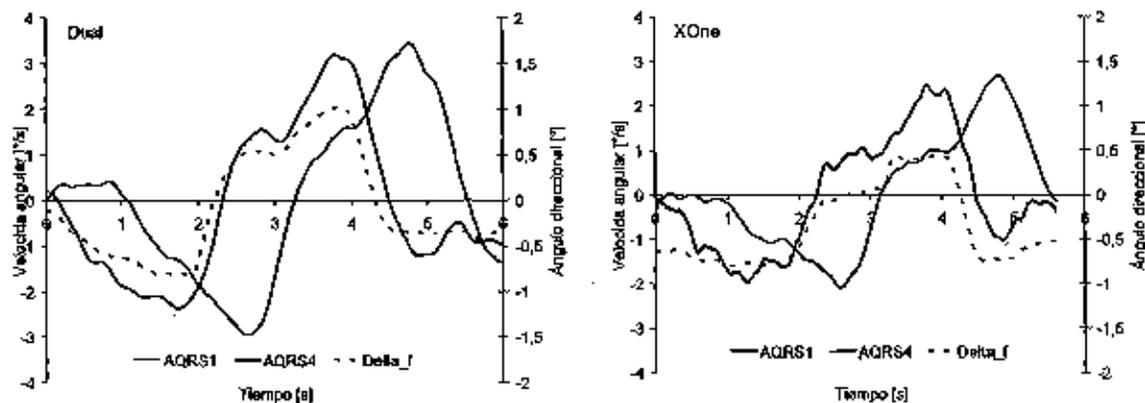


Figura 22. Típica velocidad angular de la primera y última unidades de la configuración durante cambio simple a carril izquierdo a 80 km/h.

En las gráficas puede observarse el ángulo direccional de las llantas en el tractocamión requerido para seguir la trayectoria sinusoidal que representa el cambio simple de carril. En cada caso, los comportamientos de la aceleración lateral y de la velocidad angular del tractocamión se presentan conforme se realiza el movimiento de ajuste a la trayectoria, mientras que la última unidad presenta un desfaseamiento en tiempo debido a su posición en la combinación y entrada posterior a la curva de cambio. Caso similar se presenta para el cambio simple de carril a las velocidades de avance de 60 y 70 km/h, así como para la dirección de cambio hacia la derecha. Los resultados gráficos para esos eventos se presentan en los Anexos A y B.

El concentrado de los valores promedio representativos de esta maniobra para el tractocamión y el segundo semirremolque, se presentan en la Tabla 5. Se incluye la amplitud pico a pico del ángulo de orientación de las

ruedas direccionales (δ_{p-p}), los valores máximos de aceleración lateral (a_y) y velocidad angular (w_z), así como los valores estimados de la razón de amplificación de coqueo (RWA_a y RWA_w). Estos valores de amplificación de coqueo corresponden respectivamente a las calculadas de los máximos valores presentes en la maniobra con la aceleración lateral y con la velocidad angular de la primera y última unidades en la configuración.

Tabla 5. Resumen de valores para el cambio simple de carril.

Velocidad	Dual						XOne						
	δ_{p-p} [°]	a_{y1} [g's]	a_{y4} [g's]	w_{z1} [°/s]	w_{z4} [°/s]	RWA_w	δ_{p-p} [°]	a_{y1} [g's]	a_{y4} [g's]	w_{z1} [°/s]	w_{z4} [°/s]	RWA_a	RWA_w
Izquierda													
60 km/h	1,206	0,053	0,037	1,709	1,573	0,878	0,927	1,016	0,062	0,047	1,731	1,433	0,560
70 km/h	1,616	0,074	0,056	2,214	2,139	1,003	0,997	1,299	0,081	0,074	2,093	1,777	0,640
80 km/h	1,909	0,105	0,072	2,539	2,756	1,136	1,092	1,558	0,100	0,093	2,658	2,615	0,714
Derecha													
80 km/h	1,198	0,037	0,060	1,791	1,526	0,877	0,665	0,933	0,049	0,063	1,734	1,361	0,390
70 km/h	1,269	0,030	0,053	1,951	1,827	1,023	0,841	1,217	0,073	0,064	2,087	1,851	0,316
80 km/h	1,638	0,100	0,116	2,582	2,546	1,092	1,009	0,927	0,076	0,095	1,749	1,677	0,162

Los valores muestran que con las llantas supersencillas XOne se requirió de un menor ángulo de orientación que con las llantas en dual, incrementándose el ángulo requerido en ambos casos con la velocidad de avance, salvo en el caso de cambio a la derecha a 80 km/h, en el que se demandó el menor ángulo en la XOne. Se observa en general que, tanto la aceleración lateral como la velocidad angular son de orden similar para ambos arreglos de llantas, con una ligera disminución para la supersencilla XOne respecto a la dual.

Cambio doble de carril

Los cambios simples y dobles de carril permiten estimar la capacidad de ajuste de las unidades arrastradas a los cambios de trayectoria requeridos por la unidad tractiva. En este sentido, la maniobra de cambio doble implica una acción de mayor demanda en el que se debe regresar al carril inicial, parecido a una maniobra gradual de evasión, pero en este caso, con un menor grado de severidad para no incurrir en riesgos altos. De esta manera, una segunda serie de pruebas de cambio de carril correspondieron al cambio doble, cuyo ejemplo de respuesta se muestra gráficamente en la Figura 23 y en la Figura 24. Los ejemplos representan respectivamente el comportamiento típico de la aceleración lateral y de la velocidad angular en una maniobra ejecutada a 80 km/h iniciando hacia la derecha.

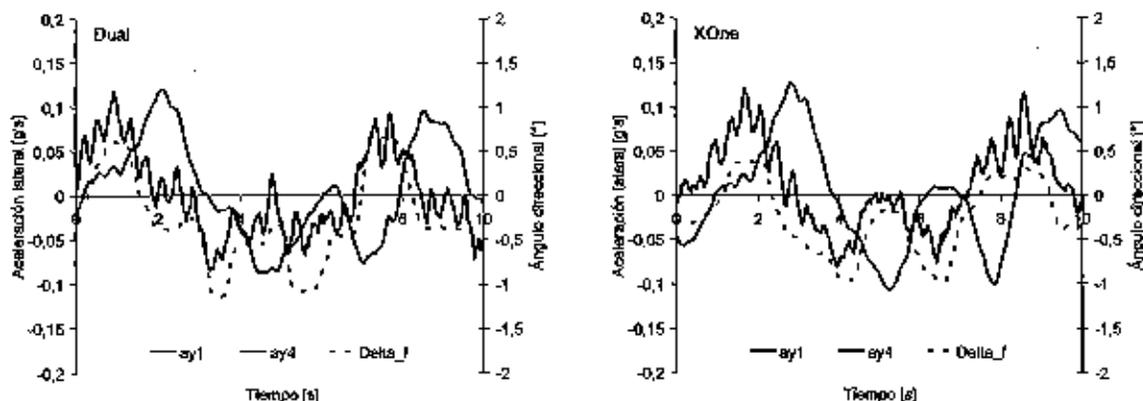


Figura 23. Aceleración lateral típica en la primera y última unidades de la configuración durante el cambio doble de carril (derecha-izquierda) a 80 km/h.

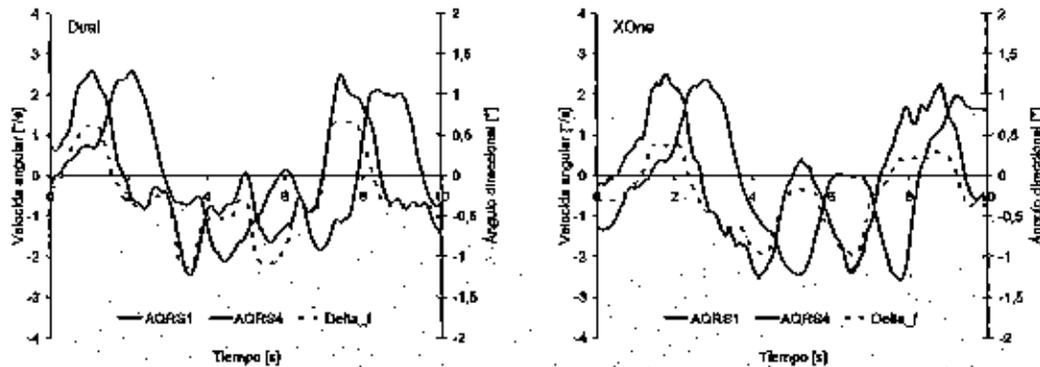


Figura 24. Velocidad angular típica en la primera y última unidades de la configuración durante el cambio doble de carril (derecha-izquierda) a 80 km/h.

Similar al caso del simple cambio de carril, las gráficas muestran un ejemplo del comportamiento del ángulo direccional de las llantas en el tractocamión, mientras se sigue la trayectoria combinada de la maniobra, que en este caso corresponde a dos cambios simples opuestos de tipo sinusoidal. Así mismo, se ejemplifica la aceleración lateral y la velocidad angular durante la maniobra, en el que se aprecia el retardo normal por el cambio iniciado por la primera unidad en la entrada en la trayectoria y reflejado posteriormente en la última. Los registros gráficos de los eventos de cambio doble de carril a 80 km/h, así como para las velocidades de 60 y 70 km/h para las direcciones de entrada a la izquierda-derecha y a la derecha-izquierda, se presentan en los Anexos C y D.

El resumen de los valores promedio para el tractocamión y el segundo semirremolque, se presentan en la Tabla 6. La tabla incluye la amplitud pico a pico del ángulo de orientación de las ruedas direccionales (δ_{p-p}), los valores máximos de aceleración lateral (a_y) y velocidad angular (w_z), además de la razón de amplificación de coleo estimada de la aceleración lateral (RWA_a) y de la velocidad angular (RWA_w) de la primera y última unidades en la configuración.

Tabla 6. Resumen de valores para el cambio doble de carril.

Velocidad	Dual							XOne						
	δ_{p-p}	a_{y1}	a_{y2}	w_{z1}	w_{z2}	RWA_a	RWA_w	δ_{p-p}	a_{y1}	a_{y2}	w_{z1}	w_{z2}	RWA_a	RWA_w
Izquierda	[°]	[g's]	[g's]	[°/s]	[°/s]			[°]	[g's]	[g's]	[°/s]	[°/s]		
60 km/h	1,147	0,055*	0,030	2,046	1,634	1,131*	0,813	1,310	0,033	0,037	1,948	1,620	1,132	0,836
70 km/h	1,430	0,069*	0,037	2,257	2,181	1,262*	0,974	1,390	0,035	0,043	2,172	2,089	1,132	0,960
80 km/h	2,014	0,091*	0,039	2,831	2,944	1,430*	1,049	1,439	0,034	0,041	2,381	2,508	1,130	1,055
Derecha														
60 km/h	1,687	0,036*	0,034	2,298	1,898	0,924*	0,836	1,274	0,037	0,035	2,016	1,659	0,950	0,831
70 km/h	1,746	0,037*	0,030	2,444	2,161	1,037*	0,894	1,525	0,034	0,032	2,223	1,891	1,032	0,856
80 km/h	1,841	0,039*	0,022	2,645	2,392	1,035*	0,902	1,613	0,034	0,031	2,664	2,460	1,037	0,924

* Valor solamente indicativo del orden de magnitud

En el resumen anterior, los datos de a_{y1} en el cambio a la izquierda se estimaron a partir de un segundo sensor colocado en la misma unidad, debido a que en esa maniobra el primer acelerómetro presentó problemas de conectividad. Sin embargo, estos valores sólo son indicativos del orden del valor de aceleración actuante, así como para la estimación del RWA_a correspondiente.

Los valores representativos del cambio doble de carril muestran que existe una mayor demanda en esta maniobra, respecto al cambio simple de carril. Con tendencia semejante al comportamiento en el cambio simple de carril, la tabla muestra demanda de un menor ángulo de orientación de las llantas direccionales durante el empleo de llantas supersencillas XOne, respecto al demandado con el empleo de llantas en dual. Se aprecia también que la demanda del ángulo se incrementa conforme se ejecuta la maniobra a una velocidad mayor. El comportamiento general de la aceleración lateral presentó valores de orden similar para ambos arreglos de llantas, aunque la velocidad angular fue ligeramente menor en el caso de la llanta supersencilla XOne. La razón de amplificación de coleo resultante es similar, considerando tanto la aceleración lateral como la velocidad angular.

4.3 FRENADO

Las maniobras de frenado involucran una alta demanda mecánica para la detención de un vehículo. Esta demanda se refleja en el desgaste de elementos importantes en el sistema de frenos, lo cual fue evidente en las pruebas ejecutadas, presentándose la falla por fractura de un tambor en el segundo semirremolque (Figura 25). El tambor comprometido fue reemplazado y ajustado convenientemente para continuar con el desarrollo de las pruebas.

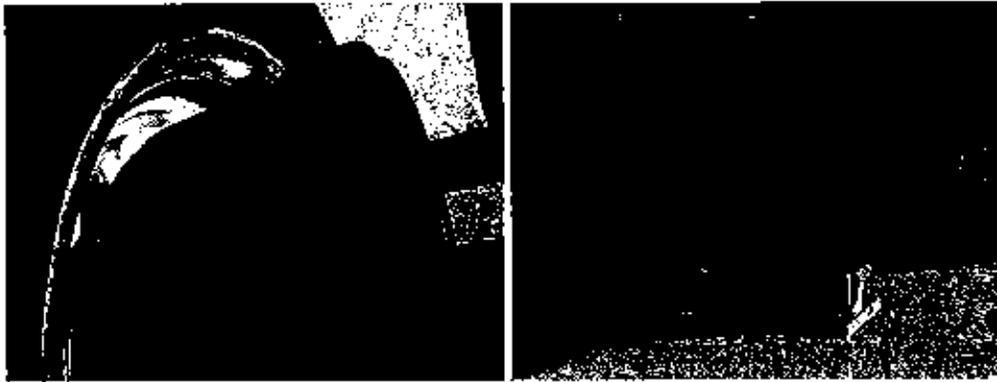


Figura 25. Tambor fracturado durante pruebas, ubicado en el segundo semirremolque.

Los datos registrados en las pruebas de frenado se procesaron a fin de determinar la distancia requerida para detener el vehículo completamente desde la velocidad de avance inicial. Así mismo, se obtuvo la máxima desaceleración alcanzada en cada caso, cuyos resúmenes gráficos se presentan en la Figura 26 y en la Figura 27.

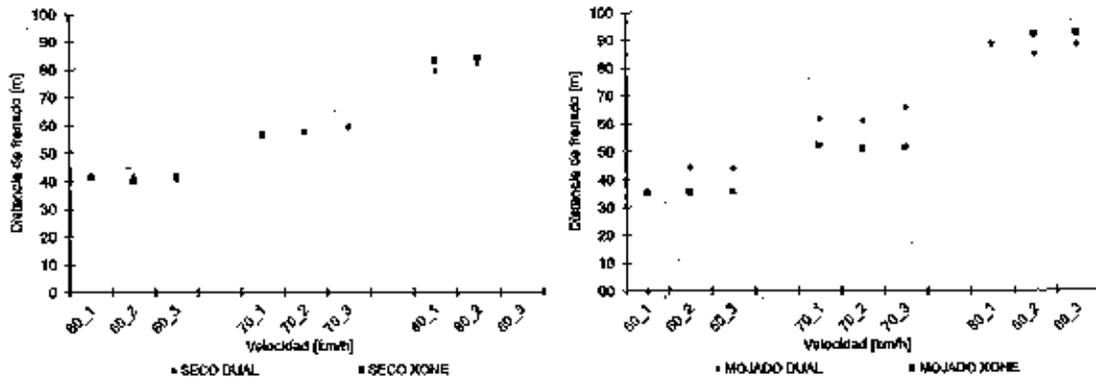


Figura 26. Distancia de frenado para las distintas velocidades, tanto en superficie seca como en mojada.

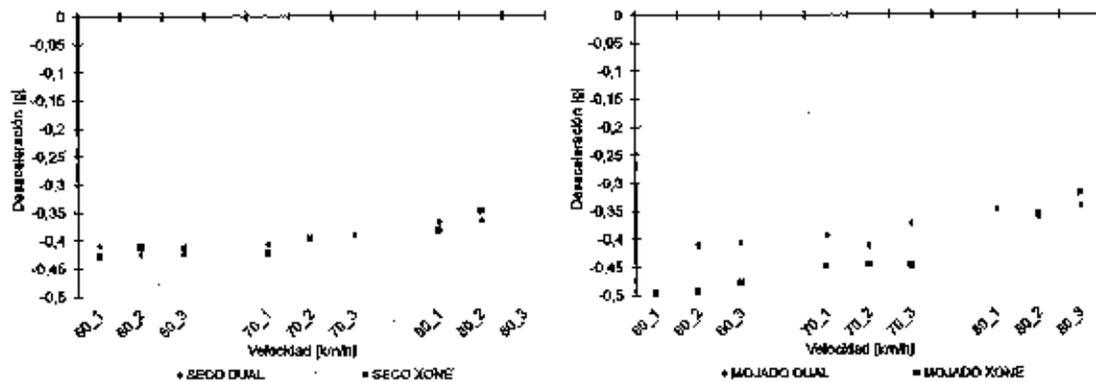


Figura 27. Valor máximo de desaceleración en frenado, en superficie seca y en mojada.

De la gráfica de pruebas en superficie seca se observa gran similitud, tanto en la distancia requerida para detener el vehículo como en la máxima desaceleración alcanzada para ambos tipos de llantas, en las distintas velocidades. No obstante, sobre superficie mojada se obtuvieron diferencias significativas entre ambos tipos de llantas, principalmente en las velocidades de 60 y 70 km/h, donde la XOne mostró menor distancia de frenado y desaceleraciones máximas de mayor magnitud, incluso que las obtenidas en piso seco, aunque con menor efectividad a 80 km/h, ratificada por la menor magnitud en la desaceleración. La Tabla 7 muestra los valores promedio de distancia y desaceleración para estas pruebas.

Tabla 7. Valores promedio de distancia y desaceleración máxima de frenado.

Velocidad	Distancia [m], seco		Aceleración [m/s ²], seco		Distancia [m], mojado		Aceleración [m/s ²], mojado	
	Dual	XOne	Dual	XOne	Dual	XOne	Dual	XOne
60 km/h	41,6	41,1	-0,419	-0,417	44,1	35,8	-0,409	-0,489
70 km/h	57,7	57,1	-0,398	-0,409	62,8	51,5	-0,393	-0,447
80 km/h	80,7	83,6	-0,367	-0,366	87,4	92,4	-0,350	-0,338

Los valores en la tabla ilustran la similitud en la magnitud de valores de distancia y desaceleración, muy cercanos entre sí para el frenado en superficie seca, con diferencias menores al 4%. En el caso de frenado en húmedo, las diferencias de la XOne respecto al arreglo dual son de 18% con menor distancia de frenado para las velocidades de 60 y 70 km/h, pero con cerca de 6% de mayor distancia para 80 km/h, aunque con valores máximos de desaceleración similares para ambos tipos. En general, considerando la falla por fractura del tambor de una de las ruedas del último semirremotque y, por tanto, el ajuste respectivo de la separación entre balatas y superficie de fricción del tambor, se infiere que la eficacia en el frenado se beneficia con un ajuste adecuado del sistema, además de la buena condición y desempeño de las llantas.

4.4 MANIOBRABILIDAD

A partir de las pruebas de maniobrabilidad se estimó el espacio requerido por la configuración ante una conducción a baja velocidad y giros amplios del volante. De esta manera, para ángulos fijos de giro del volante, se midieron las distancias indicadas en la Figura 28 para cada caso de uso de llantas, duales sencillas o supersencilias XOne.

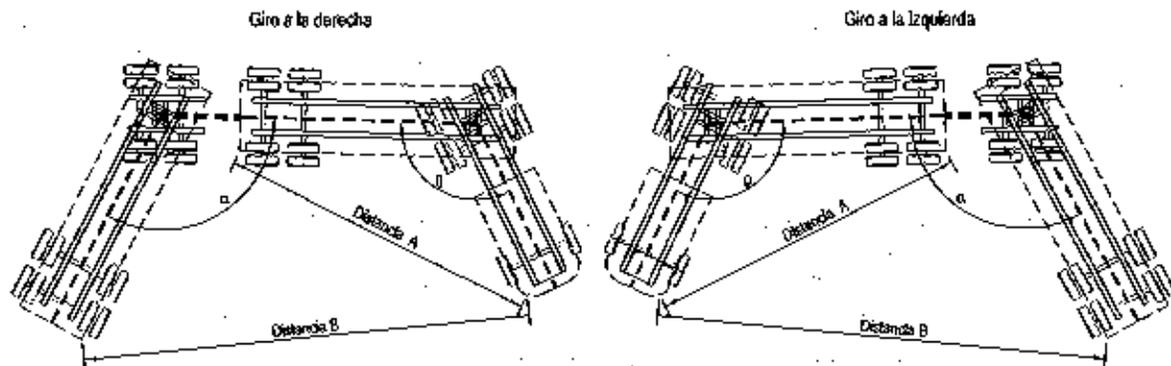


Figura 28. Representación esquemática de las distancias medidas como indicador de maniobrabilidad.

Las mediciones se realizaron una vez considerada estable la configuración geométrica adquirida por las unidades en la combinación, para cada caso de giro del volante. A partir de las dimensiones del vehículo y de las distancias indicadas en el esquema anterior, se estimaron los ángulos entre unidades, indicados por θ y α .

Tales distancias y ángulos correspondientes a cada posición del volante se resumen en la Tabla 8. En cada caso, se obtuvo una configuración específica de las unidades, cuyas longitudes proporcionales se representan en la Figura 29. En los esquemas se representa únicamente el eje central de cada una de las unidades en la combinación vehicular, en la que cada segmento corresponde a cada unidad.

Tabla 8. Resumen de distancias y ángulos de maniobrabilidad.

Giro del volante*	Dual		Dual		XOne		XOne	
	A [m]	B [m]	θ [°]	α [°]	A [m]	B [m]	θ [°]	α [°]
- 360°	15,70	25,68	153,0	150,0	15,64	25,52	151,5	149,6
- 450°	15,28	23,30	145,3	134,5	15,18	22,93	143,7	132,7
- 540°	14,54	18,28	134,3	107,5	14,46	17,35	133,2	102,8
360°	15,35	24,07	146,5	140,0	15,26	23,81	145,0	138,9
450°	14,82	20,36	136,2	118,2	14,74	20,09	137,1	117,2
540°	14,03	16,09	127,5	99,1	13,81	11,90	124,8	77,5

* El valor negativo indica giro a la derecha; el valor positivo, a la izquierda.

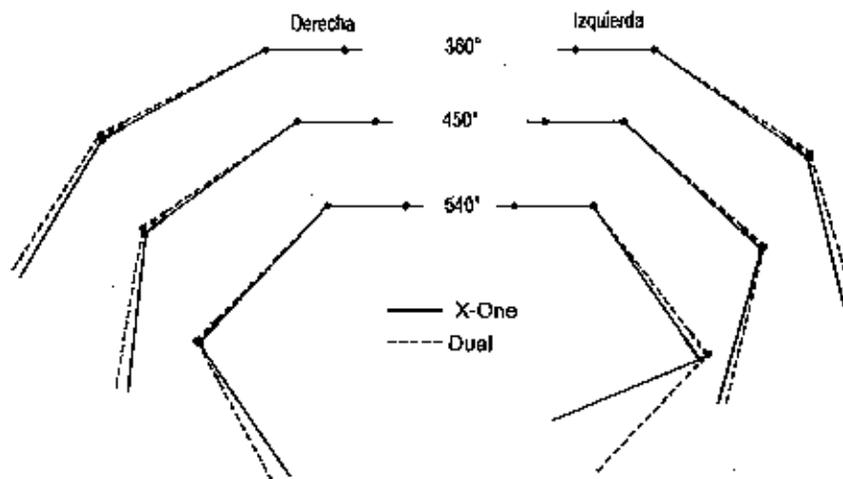


Figura 29. Configuración geométrica de las unidades en la combinación vehicular de pruebas de maniobrabilidad.

De la tabla y gráficas se aprecia que las configuraciones geométricas más compactas (cerradas) se presentaron para el caso de uso de las llantas supersencillas XOne. Así mismo es notorio que, para el vehículo empleado, el giro a uno y otro lado del volante llegan a presentar diferencias significativas en los ángulos entre las unidades, produciendo los menores ángulos para el caso de giro a la izquierda, evidenciando también el menor espacio utilizado con el uso de las llantas supersencillas.

4.5 ACCIONES DEL DOLLY H

Como un indicador indirecto de la demanda mecánica a la que es sujeto el acoplamiento característico del dolly H, se registró la deformación inducida en puntos similares cerca de los extremos de cada brazo de las barras de conexión. Para el uso de la deformación como indicador, se consideró la suposición de que el material, manufactura y geometría en ambas barras, comparten idénticas propiedades de rigidez y resistencia mecánica.

Para la comparación del desempeño de uno y otro tipo de llanta, se tomó de base el seguimiento de una trayectoria circular, tal como se realiza en las pruebas de manejabilidad. En este caso, se representa la historia de la velocidad de avance referida para la maniobra en la dirección indicada de seguimiento de la curva, así como la deformación sufrida por cada brazo del dolly en su respectivo punto de instrumentación. Las gráficas de comportamiento se presentan en la Figura 30, para el caso de seguimiento de la curva hacia la izquierda, y en la Figura 31 para el sentido opuesto de seguimiento en el círculo.

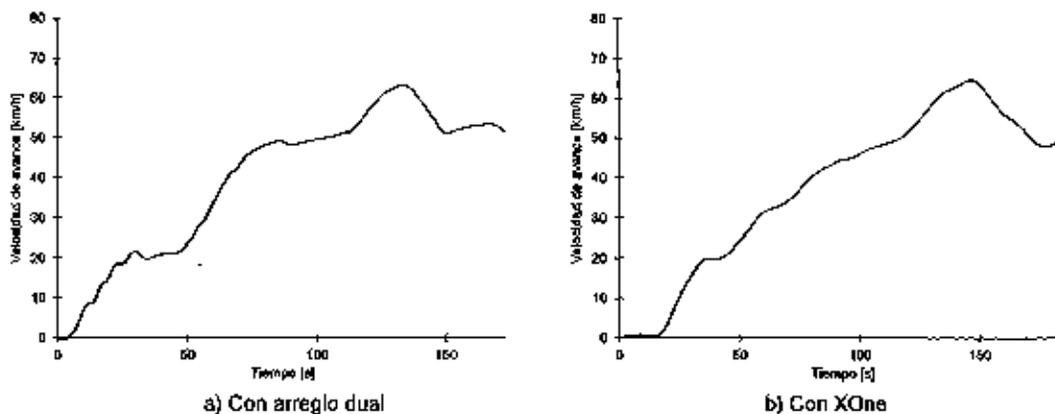


Figura 30a. Efecto sobre el dolly en el seguimiento de la curva circular hacia la izquierda. Desarrollo de la velocidad de avance.

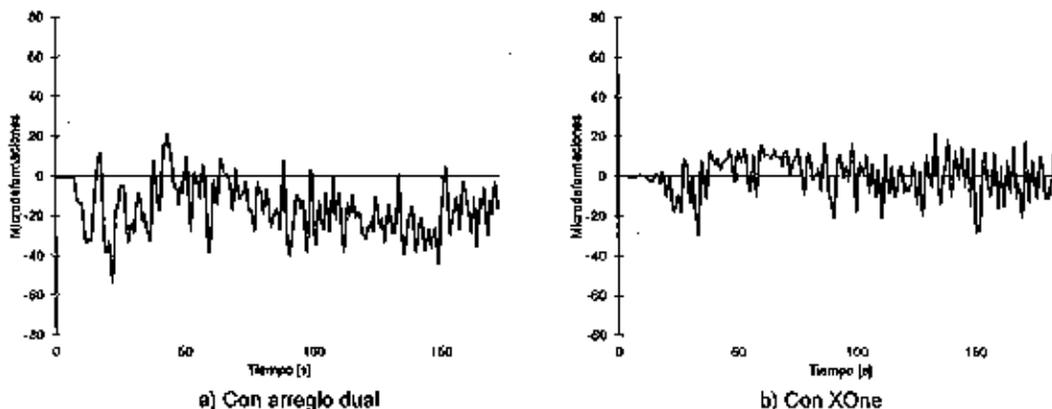


Figura 30b. Efecto sobre el dolly en el seguimiento de la curva circular hacia la izquierda. Desarrollo de la deformación en la barra izquierda.

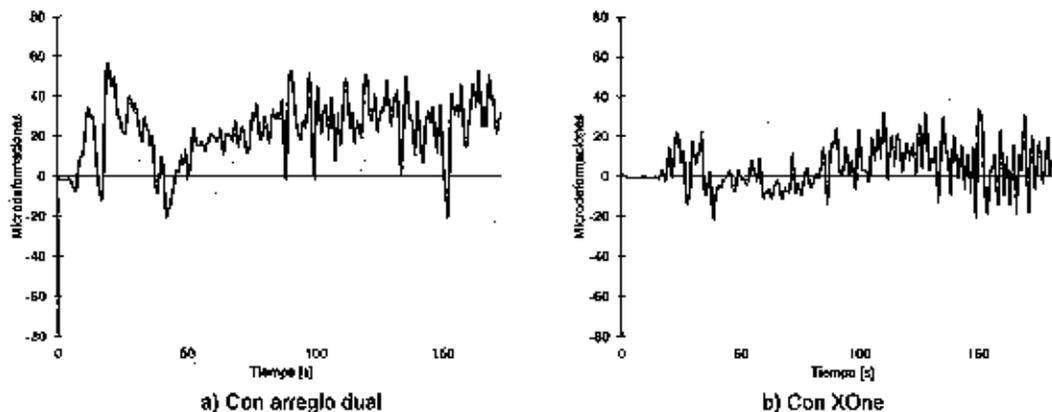


Figura 30c. Efecto sobre el dolly en el seguimiento de la curva circular hacia la izquierda. Desarrollo de la deformación en la barra derecha.

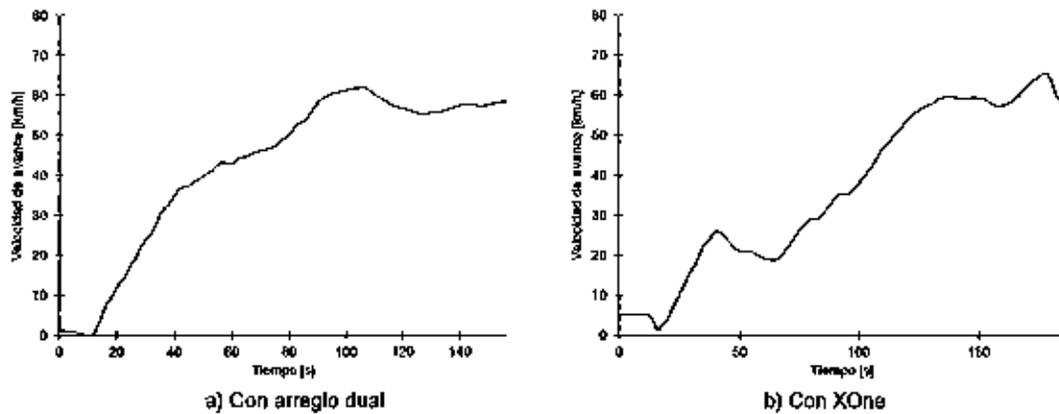


Figura 31a. Efecto sobre el dolly en el seguimiento de la curva circular hacia la derecha. Desarrollo de la velocidad de avance.

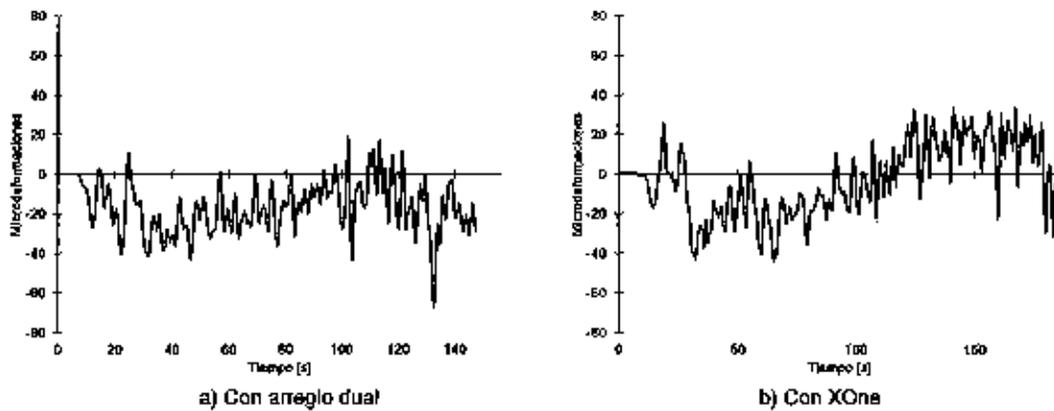


Figura 31b. Efecto sobre el dolly en el seguimiento de la curva circular hacia la derecha. Desarrollo de la deformación en la barra izquierda.

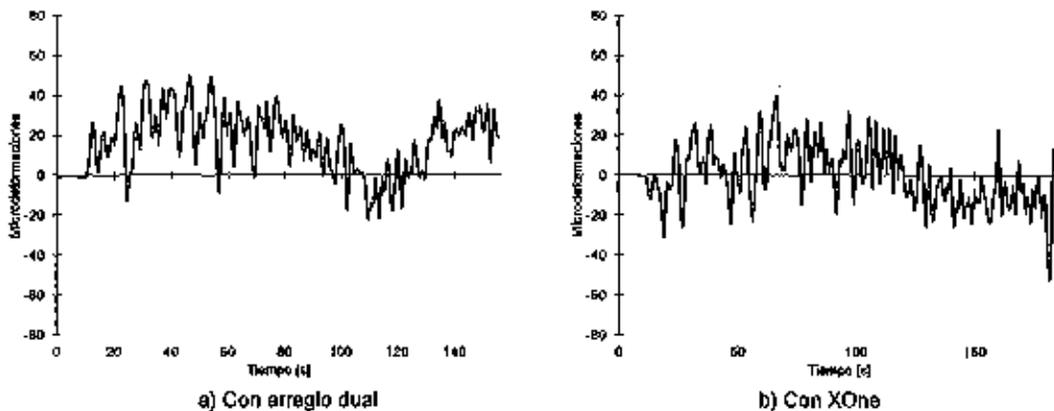


Figura 31c. Efecto sobre el dolly en el seguimiento de la curva circular hacia la derecha. Desarrollo de la deformación en la barra derecha.

Las gráficas permiten apreciar, en cada caso, la velocidad alcanzada con el uso de uno y otro tipo de llantas. En ese sentido, la linealidad de la gráfica de velocidad no representa ninguna característica especial, puesto que se dio libertad al conductor para que incrementara la velocidad según su propia sensación. Para el caso del giro a la izquierda, los niveles de deformación alcanzados fueron menores y de mayor uniformidad con el uso de las llantas supersencillas XOne en ambos brazos del dolly. Durante el giro a la derecha, los niveles de amplitud en la deformación fueron similares para ambos tipos de llanta, aunque con la llanta XOne se obtuvo una mayor variación en la linealidad del incremento de la velocidad. En ambos sentidos de giro se alcanzó una velocidad ligeramente mayor con el uso de las llantas XOne, de hasta 65,5 km/h para el giro a la derecha, mientras que en ese mismo sentido con las llantas en arreglo dual la máxima velocidad fue de 62 km/h. Lo anterior, considerando la propia percepción del conductor para el control de la configuración vehicular con base en el desempeño en condición segura del último semirremolque.

Respecto al comportamiento del eje autodireccionable del convertidor, en la Figura 32 se muestra lo observado durante las pruebas de seguimiento de trayectoria circular, respecto a la velocidad de avance. Un valor angular positivo corresponde a un viraje hacia la derecha (orientación de las ruedas en el eje del dolly) y, en oposición, un ángulo de viraje a la izquierda se refleja como valor negativo.

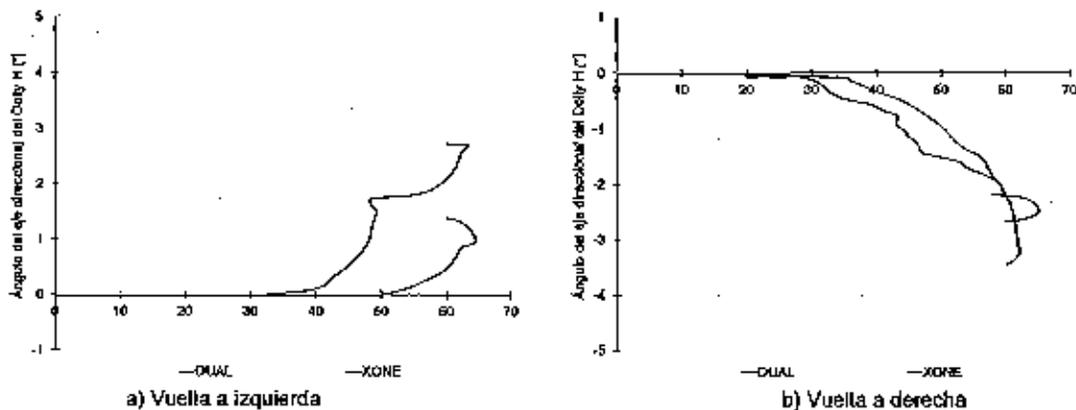


Figura 32. Ángulo de orientación de las llantas direccionables en el dolly H en la curva circular.

Debido a la maniobra de acomodado del vehículo a la entrada de la curva al arranque de la prueba, se presentaba un valor angular en el eje del dolly, aunque todas las unidades de la configuración estuvieran aparentemente alineadas. Para propósito de comparación, ese ángulo inicial no se indica en la gráfica. El viraje de las ruedas del dolly se activaba cuando la fuerza lateral entre llanta y piso sobrepasaba la resistencia de muelles de resorte del mecanismo de dirección del eje. De acuerdo a las gráficas de comportamiento del ángulo en la condición de vuelta a la izquierda, se observa que el valor de oposición para producir el viraje se alcanzaba a poco más de los 30 km/h con las llantas en dual, mientras que con las supersencillas XOne a los 50 km/h, requiriendo de un mayor ángulo de viraje con las llantas en arreglo dual. En la vuelta contraria, a la derecha, el ángulo se produce para el arreglo dual a los 25 km/h y para la supersencilla XOne a los 35 km/h, con un valor mayor para el caso de las llantas en dual. Esto implica que las llantas en arreglo dual deben reaccionar desde velocidades más bajas para poder alinearse a la trayectoria que siguen las unidades precedentes. Además de las propiedades al giro propias de cada llanta, el ancho físico del arreglo dual era casi 0,2 m más grande que el de la llanta supersencilla, lo que pudo contribuir con ese comportamiento.

4.6 COMENTARIOS GENERALES

El desarrollo del estudio contempló inicialmente el uso de un par de semirremolques distintos a los utilizados. Inconvenientes de tránsito durante el proceso de lastrado para simular la carga no permitieron su uso en pruebas, por lo que debieron ser sustituidas por otro par de semirremolques de dimensiones y capacidad similares. Considerando que el objetivo del estudio fue asociar el efecto del uso de uno y otro tipo de llantas en la configuración con la unidad convertidora (dolly) H en particular, de menor importancia fue el desempeño y estado individual del resto de las unidades. En la práctica, los vehículos muestran un comportamiento asimétrico que solo es evidente al realizar maniobras en una y otra dirección, afectados también por la asimetría de las condiciones

físicas de la superficie del camino donde circula. Para los fines del estudio, se supuso que cada una de las unidades en la configuración se encontraba en buenas condiciones físico-mecánicas, sin aplicarse pruebas específicas para determinarlo. Estas condiciones no fueron modificadas en ningún momento, salvo un ajuste inicial de la separación balata-tambor del sistema de frenos de los semirremolques. En el desarrollo de las pruebas de mayor demanda mecánica (frenado de pánico) se presentó la fractura de un tambor que, al ser sustituido, el ensamble balata-tambor en la rueda involucrada debió ser nuevamente ajustado. Posterior a ese evento, las pruebas se desarrollaron de manera normal.

El dolly H fue instrumentado con extensómetros eléctricos de manera puntual en sus barras de acoplamiento. Aunque la técnica de extensometría eléctrica es utilizada comúnmente para estimar los esfuerzos presentes en un elemento sujeto a sollicitación mecánica, no fue el caso del dolly. Para poder determinar los esfuerzos en el punto de instrumentación se requiere conocer las propiedades elásticas de los materiales, así como de una calibración que asocie la magnitud y dirección de fuerzas con el nivel de deformación producido. El propósito de los extensómetros fue como indicador de la variación relativa de la carga mecánica en el brazo a través de la deformación en ese punto, comparable únicamente con sí mismo al utilizar el vehículo uno u otro tipo de llantas. La selección del punto se realizó conforme a la accesibilidad y continuidad del material (sin interrupciones geométricas bruscas o de diferente material). Por tanto, un solo punto no es suficiente para estimar la magnitud de las fuerzas presentes en la barra ni de la deformación/esfuerzo máximos en la estructura del dolly, por lo que mayor deformación o esfuerzo pueden estar presentes en alguna otra zona de la estructura de acoplamiento del dolly.

Además de las mediciones cuantitativas, resultado de la instrumentación y el procesamiento de datos, se atendió la conducta de manejo del conductor. El seguimiento de trayectorias específicas diferentes a una conducción típica en carretera representó una actitud y esfuerzo especialmente extraordinario. Particularmente, las trayectorias circulares le demandaron la observación frecuente del comportamiento de la última unidad a través de los espejos retrovisores, que se reflejó en los ajustes direccionales del tractocamión, además de la atención misma hacia el control de la velocidad y trayectoria a seguir. Entre lo observado se distingue que, tanto en prueba como en el desplazamiento general requerido en pista, el tipo de llanta utilizada marcó diferencia en las velocidades alcanzadas, así como en los ajustes para el control direccional en las maniobras en general. Aunque esto se evidencia de los mismos resultados de medición, en su momento el conductor expuso que su experiencia de manejo en el desarrollo del estudio fue significativamente diferente al conducir el vehículo con uno u otro tipo de llantas.

CONCLUSIONES

El estudio se orientó a la comparación relativa de aspectos importantes del desempeño dinámico de la configuración vehicular conformada por un tractocamión, un semirremolque y un remolque con convertidor (dolly) tipo "H", conforme al empleo de llantas de base ancha Supersencillas Michelin XOne o de sencillas Michelin en arreglo dual tradicional. Las llantas de base ancha correspondieron a modelos equivalentes de las versiones de llantas sencillas que conforman el arreglo dual en ejes de carga y tracción de vehículos de carga pesada. Las pruebas que dieron lugar a los datos de comparación fueron de índole experimental, generados por la ejecución controlada de diversas maniobras de conducción en pista de pruebas, con enfoque particular al desempeño del remolque (con el dolly H) respecto a la unidad tractiva. Las maniobras fueron de tipo direccional y de frenado, para determinar aspectos de maniobrabilidad, características de desempeño dinámico y estabilidad direccional.

Las maniobras en pista se realizaron tanto con giros a izquierda como a derecha, lo que mostró una asimetría en el desempeño dinámico del vehículo, afectado, a su vez, por las condiciones geométricas propias de la pista de pruebas. No obstante, los resultados evidenciaron que el efecto del tipo de llantas empleado en la configuración con el dolly H como convertidor de acoplamiento es, en general, de características similares al utilizar llantas supersencillas Michelin XOne o llantas sencillas Michelin en arreglo dual.

De manera particular, con el empleo de la supersencilla XOne se observaron pequeñas diferencias con mejora en el control direccional ante cambios de carril y en el seguimiento de trayectorias curvas. Así mismo, con la XOne se obtuvieron trayectorias más cerradas que involucran una menor superficie en maniobras a baja velocidad, respecto a las demandadas al emplear sencillas en arreglo dual. Respecto al frenado, las llantas XOne mostraron un desempeño en piso seco similar al de las llantas sencillas en arreglo dual; en piso mojado la XOne requirió de menor distancia de frenado para velocidades de 60 y 70 km/h, mientras que a 80 km/h la distancia requerida fue un 6% mayor respecto al empleo de sencillas en arreglo dual. Para todo caso en pavimento mojado, es evidente la

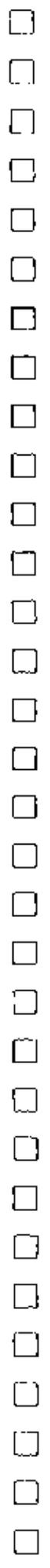
disminución de la fricción que se agudiza con velocidades altas; por tanto, son esperadas mayores distancias de frenado independientemente del tipo de llanta empleado.

El acoplamiento del dolly H al semirremolque que le precede a través de los puntos de conexión por sus dos brazos, lo transforman en el plano del movimiento como una extensión del semirremolque delantero. Esta configuración le confiere rigidez para atenuar o eliminar el movimiento de coleo del dolly, restringido por el trabajo de los dos puntos de conexión. La prueba de seguimiento de trayectoria circular con incremento en la velocidad de avance mostró que una menor demanda en el ajuste direccional promueve también una menor deformación en el extremo de conexión de los brazos del dolly. En el caso del empleo de uno y otro tipo de llantas, se requirieron menos ajustes direccionales y menores ángulos de viraje con las llantas supersencillas XOne, respecto a las sencillas en arreglo dual. La deformación registrada no es un indicador de los máximos esfuerzos que pueden presentarse en la estructura del dolly.

Los resultados presentados sólo son aplicables a las llantas con la tecnología constructiva empleada por el fabricante Michelin. Por tanto, el comportamiento de las llantas empleadas no puede ser extendido ni extrapolado al de llantas de otras marcas, con otro tipo constructivo o de tecnología diferente, que pudieran ser clasificadas como de base ancha. Si fuera el caso, llantas de otros fabricantes deben ser evaluadas para determinar las características de su efecto en el desempeño dinámico de los vehículos y de la interacción con la infraestructura del camino, entre los principales aspectos como elementos empleados por vehículos que transitan por carreteras.

REFERENCIAS

1. Priest, A. L.; Timm, D. H.; Barret, W. E. "Mechanistic Comparison of Wide-Base Single Vs Standard Dual Tire Configurations", NCAT Report 05-03, Auburn University, June 2005.
2. Al-Qadi, I. L.; Loulizi, A.; Janajreh, I.; Freeman, T. E. "Pavement response to dual tires and new wide-base tires at same tire pressure". Transportation Research Record No. 1806. Transportation Research Board. pp 38-47. 2002.
3. Elseifi, Mostafa A.; Al-Qadi, Imad L.; Yoo, Pyeong J.; Janajreh, Ibrahim. "Quantification of Pavement Damage Caused by Dual and Wide-Base Tires". Pavement Management; Monitoring, Evaluation, and Data Storage; and Accelerated Testing. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, No. 1940. Transportation Research Board. pp 125-135. 2005.
4. Minisítio web de la llanta Michelin X-One, <http://www.michelin.com.mx/minisite/xone>. Consultada en julio de 2009.
5. Fabela Gallegos, M. J.; Vázquez Vega, D.; Martínez Madrid, M.; Favela Gallegos, C. A.; Orozco Orozco, P. R. "Estudio comparativo del comportamiento de una llanta supersencilla con llantas duales convencionales" Reporte Técnico No. 036 del estudio ET-078-04. Enero 29, 2003. Instituto Mexicano del Transporte. Sanfandila, Qro.
6. Fabela Gallegos, M. J.; Hernández Jiménez, J. R.; Flores Centeno, O.; Vázquez Vega, D.; Martínez Madrid, M. "Efectos de la llanta Super Single X-One en los pavimentos". Informe Final de Investigación IF EE 12/05. 9 de junio de 2006. Coordinación de Ingeniería Vehicular e Integridad Estructural, Instituto Mexicano del Transporte. Sanfandila, Qro.
7. Secretaría de Comunicaciones y Transportes. "Autorización para el uso de las llantas súper sencilla, modelo X-ONE de Michelin, en sustitución del arreglo dual al que hace referencia la Norma Oficial Mexicana NOM-012-SCT-2-1995, Sobre el peso y dimensiones máximas con las que pueden circular los vehículos de autotransporte que transitan en los caminos y puentes de jurisdicción federal, o la que la sustituya". DIARIO OFICIAL. Miércoles 5 de marzo de 2008. México, D. F.
8. Fabela Gallegos, M. J.; Vázquez Vega, D.; Hernández Jiménez, J. R.; Flores Centeno, O.; Blake Cervantes, C. "Estudio del comportamiento de la llanta Michelin X-One en diversas configuraciones vehiculares respecto al uso de duales tradicionales". Informe de Investigación EE 09/09. 30 de septiembre de 2011. Coordinación de Ingeniería Vehicular e Integridad Estructural, Instituto Mexicano del Transporte. Sanfandila, Qro.
9. Página web Michelin. División de neumáticos para camiones. Michelin de América del Norte <http://www.espanol.michelintruck.com/michelintruck/tires-retreads/new-tires.jsp> consultada en enero 2012.



ANEXO A

CAMBIO SIMPLE DE CARRIL A IZQUIERDA

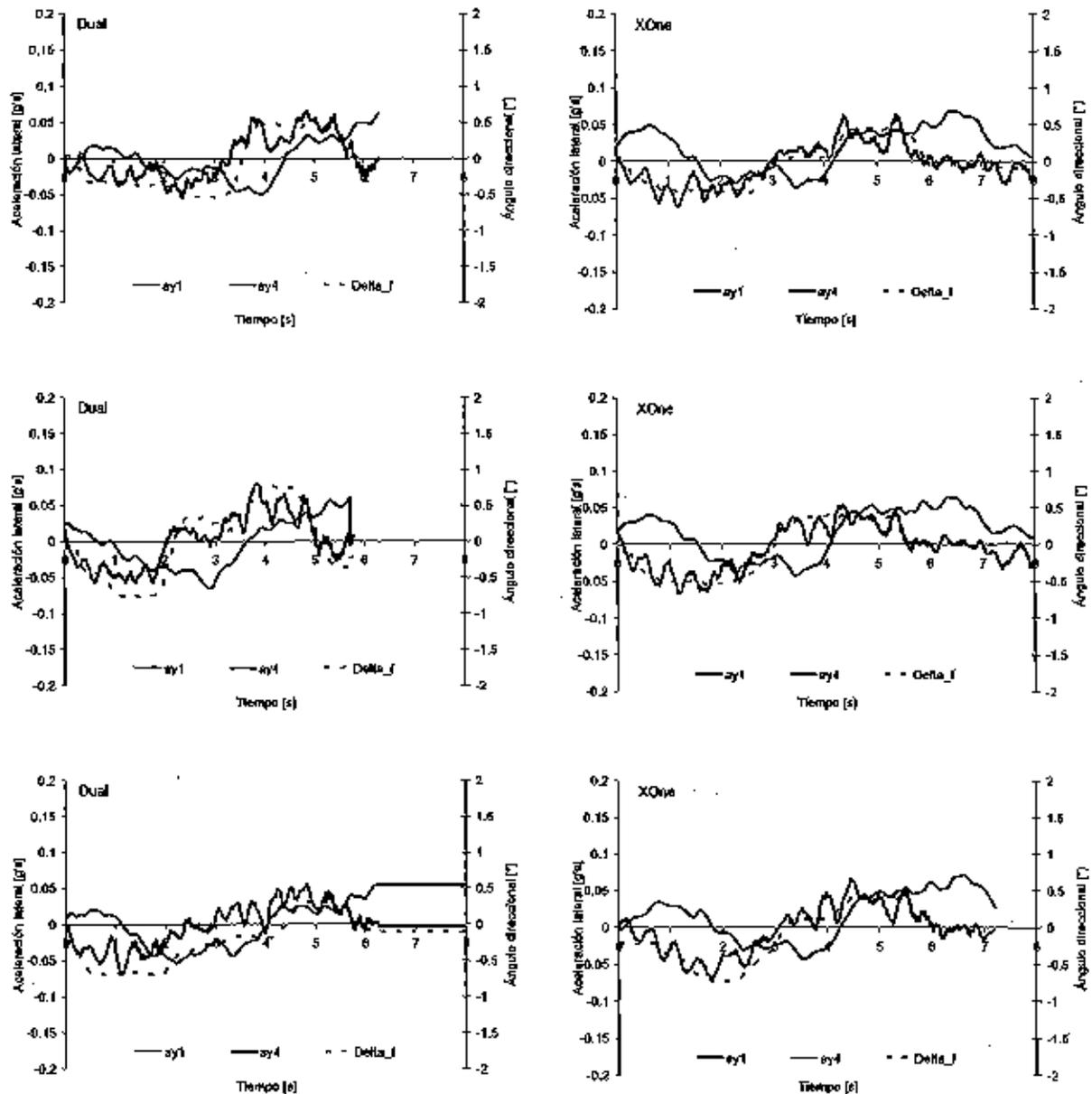


Figura A1. Aceleración lateral en la primera y última unidades durante cambio simple a carril izquierdo a 60 km/h.

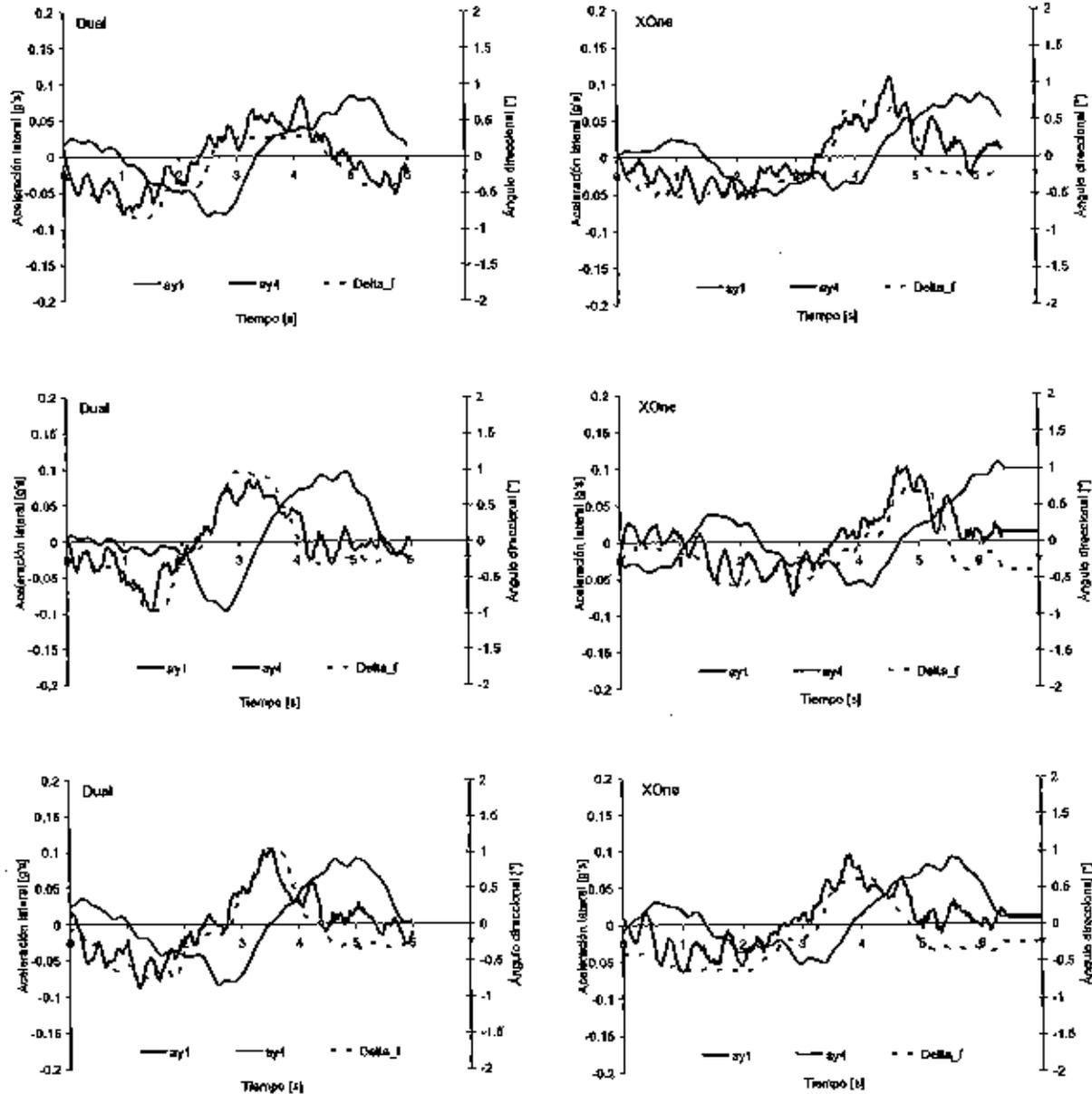


Figura A2. Aceleración lateral en la primera y última unidades durante cambio simple a carril izquierdo a 70 km/h.

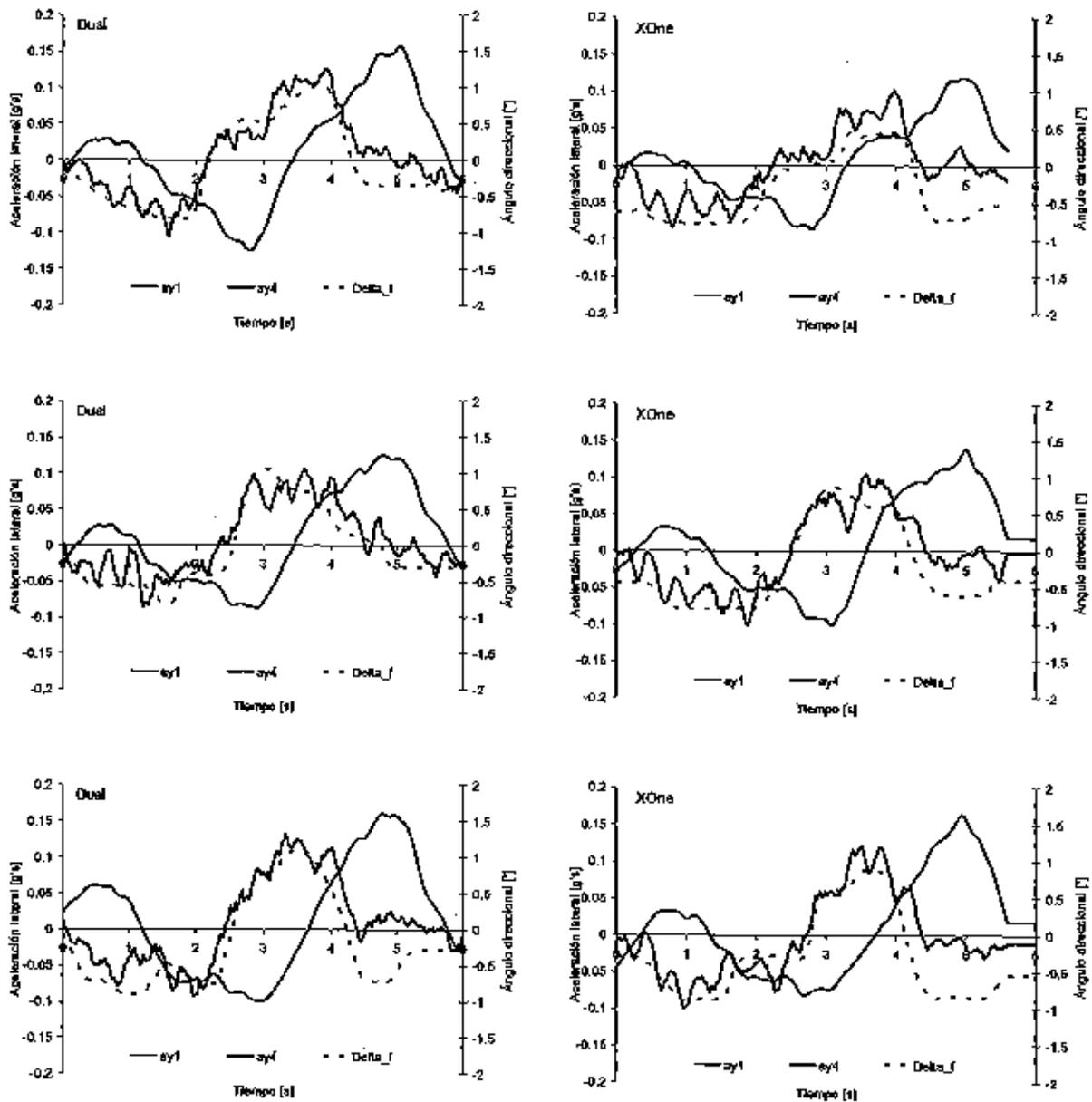


Figura A3. Aceleración lateral en la primera y última unidades durante cambio simple a carril izquierdo a 80 km/h.

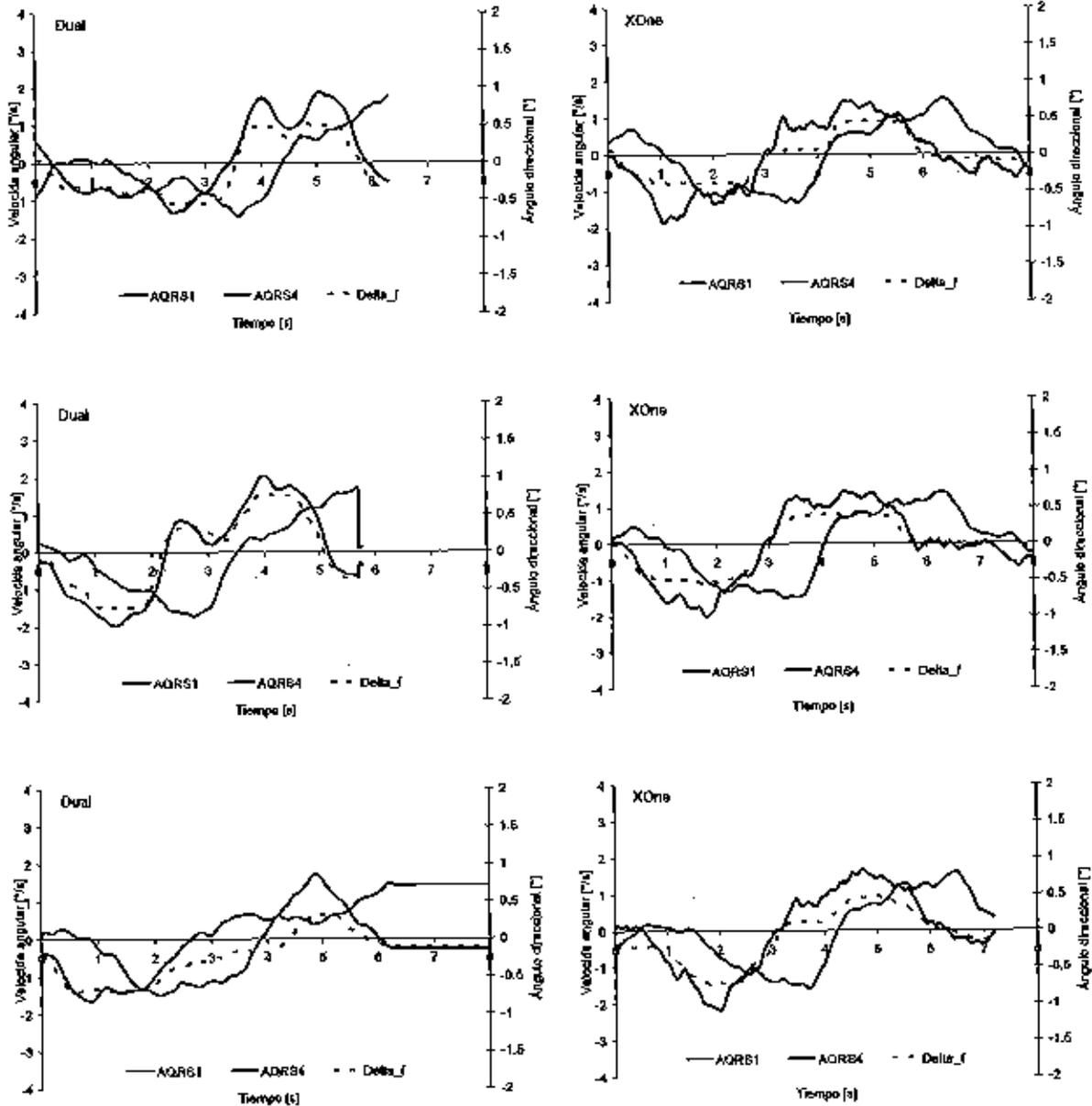


Figura A4. Velocidad angular de la primera y última unidades durante cambio simple a carril izquierdo a 60 km/h.

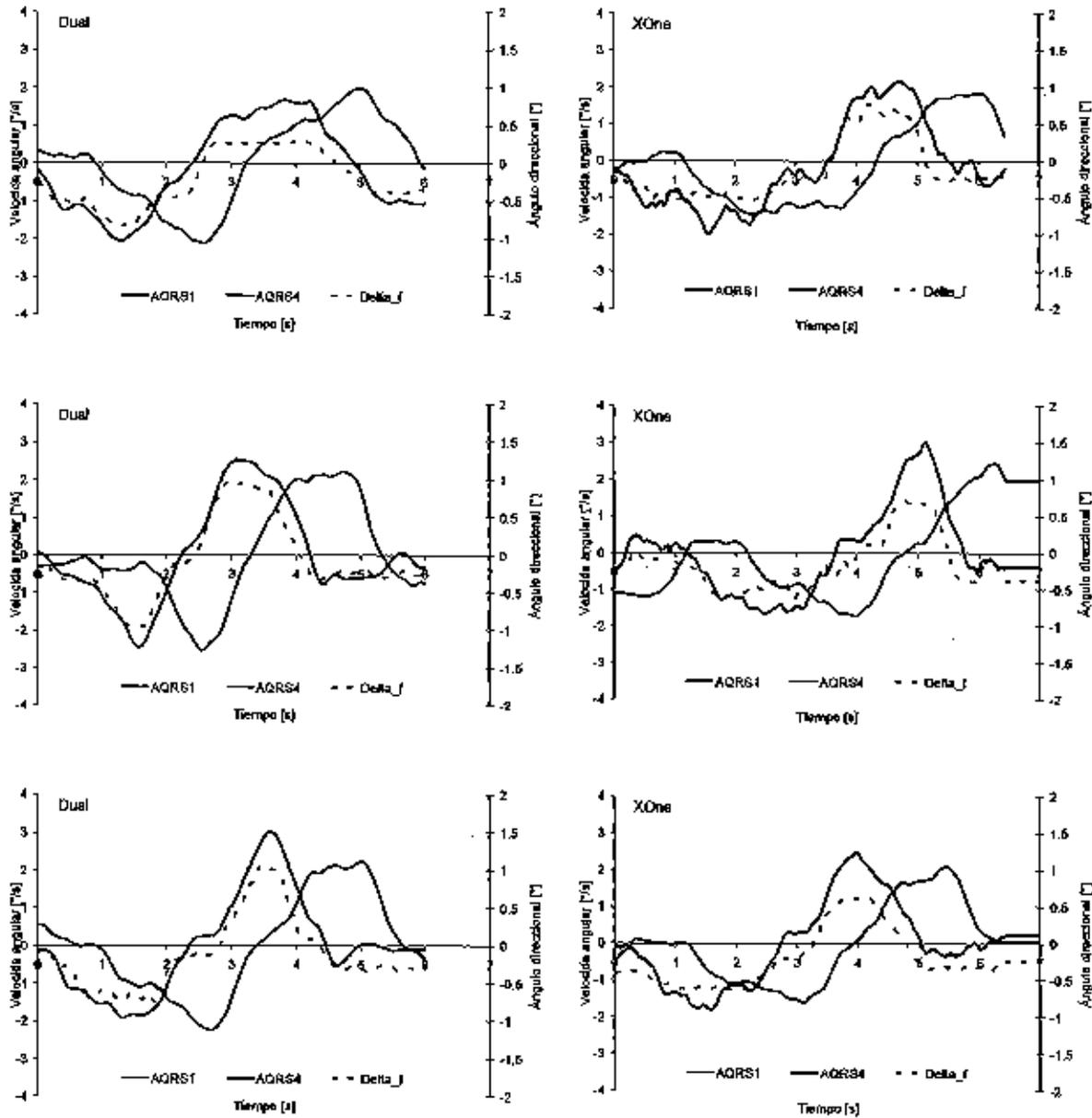


Figura A5. Velocidad angular de la primera y última unidades durante cambio simple a carril izquierdo a 70 km/h.

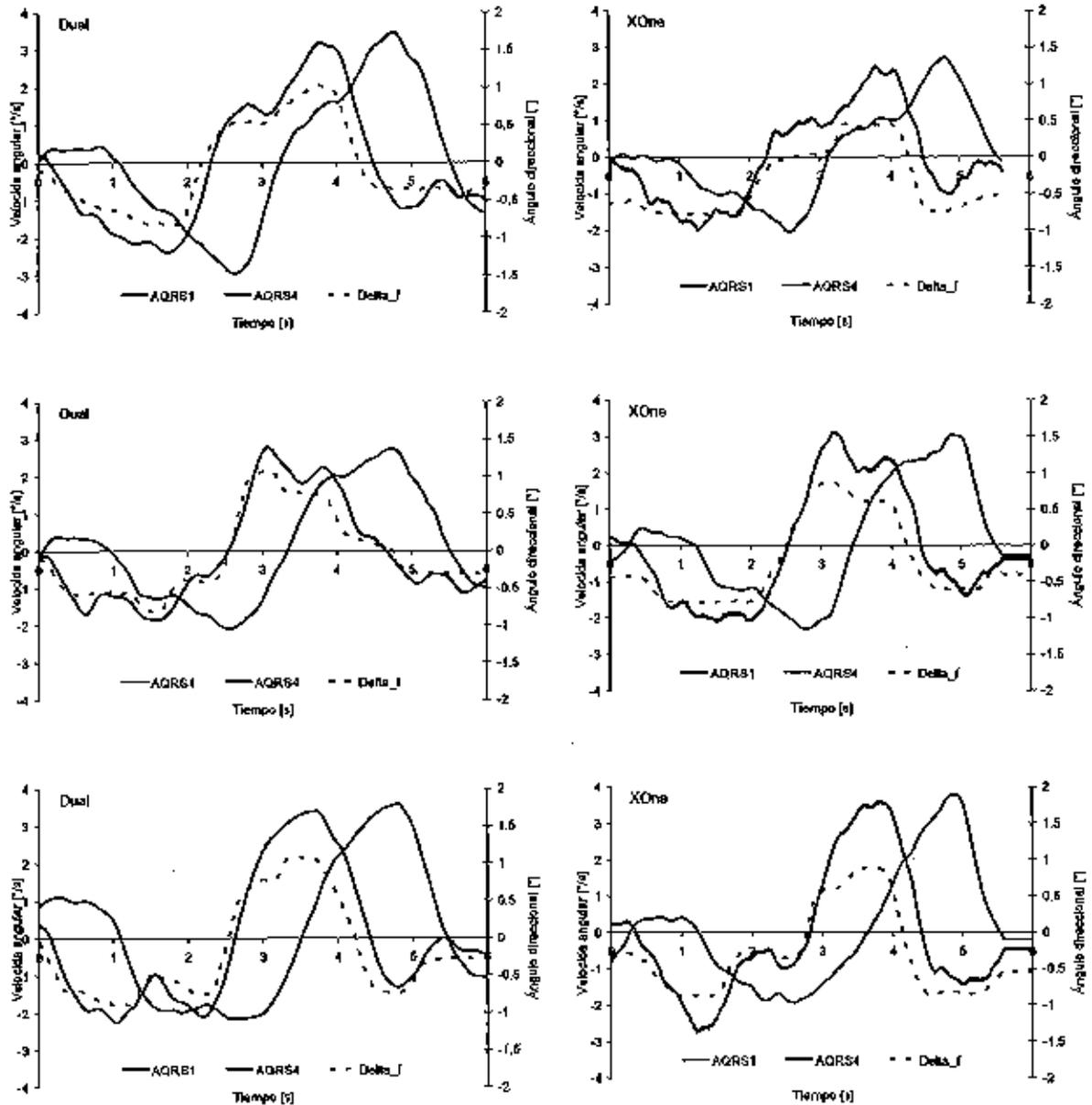


Figura A6. Velocidad angular de la primera y última unidades durante cambio simple a carril izquierdo a 80 km/h.

ANEXO B

GAMBIO SIMPLE DE CARRIL A DERECHA

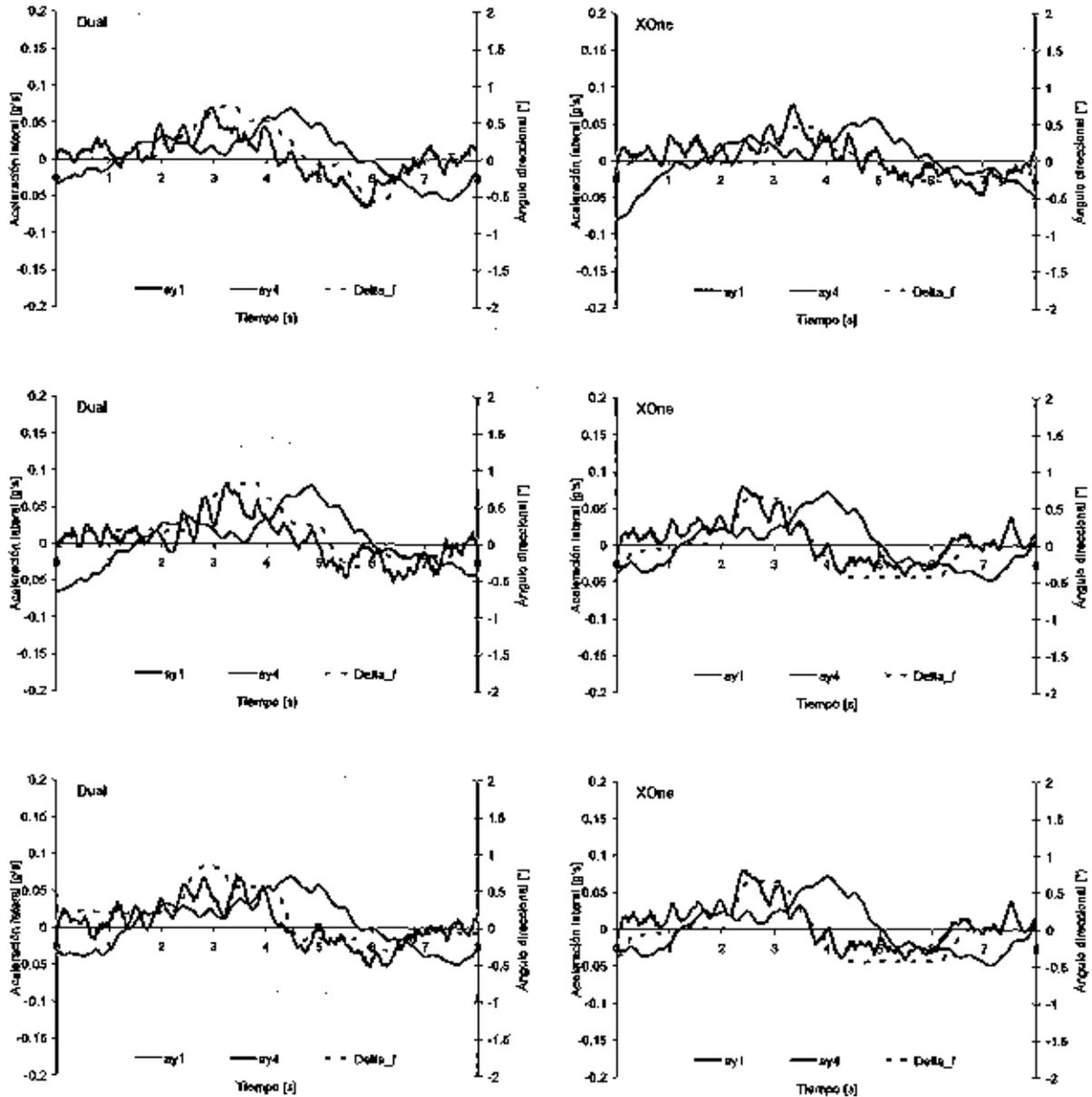


Figura B1. Aceleración lateral en la primera y última unidades durante cambio simple a carril derecho a 60 km/h.

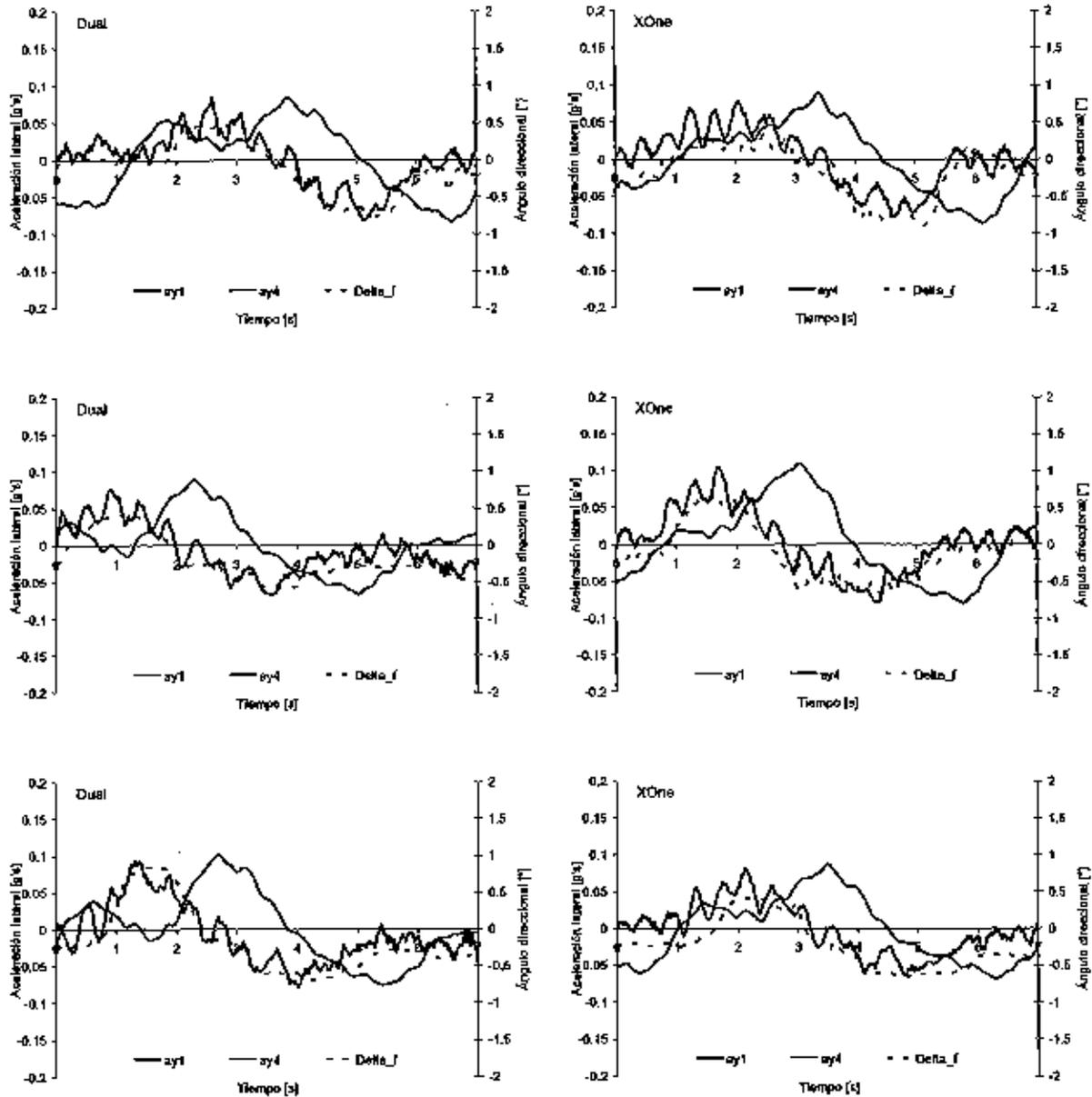


Figura B2. Aceleración lateral en la primera y última unidades durante cambio simple a carril derecho a 70 km/h.

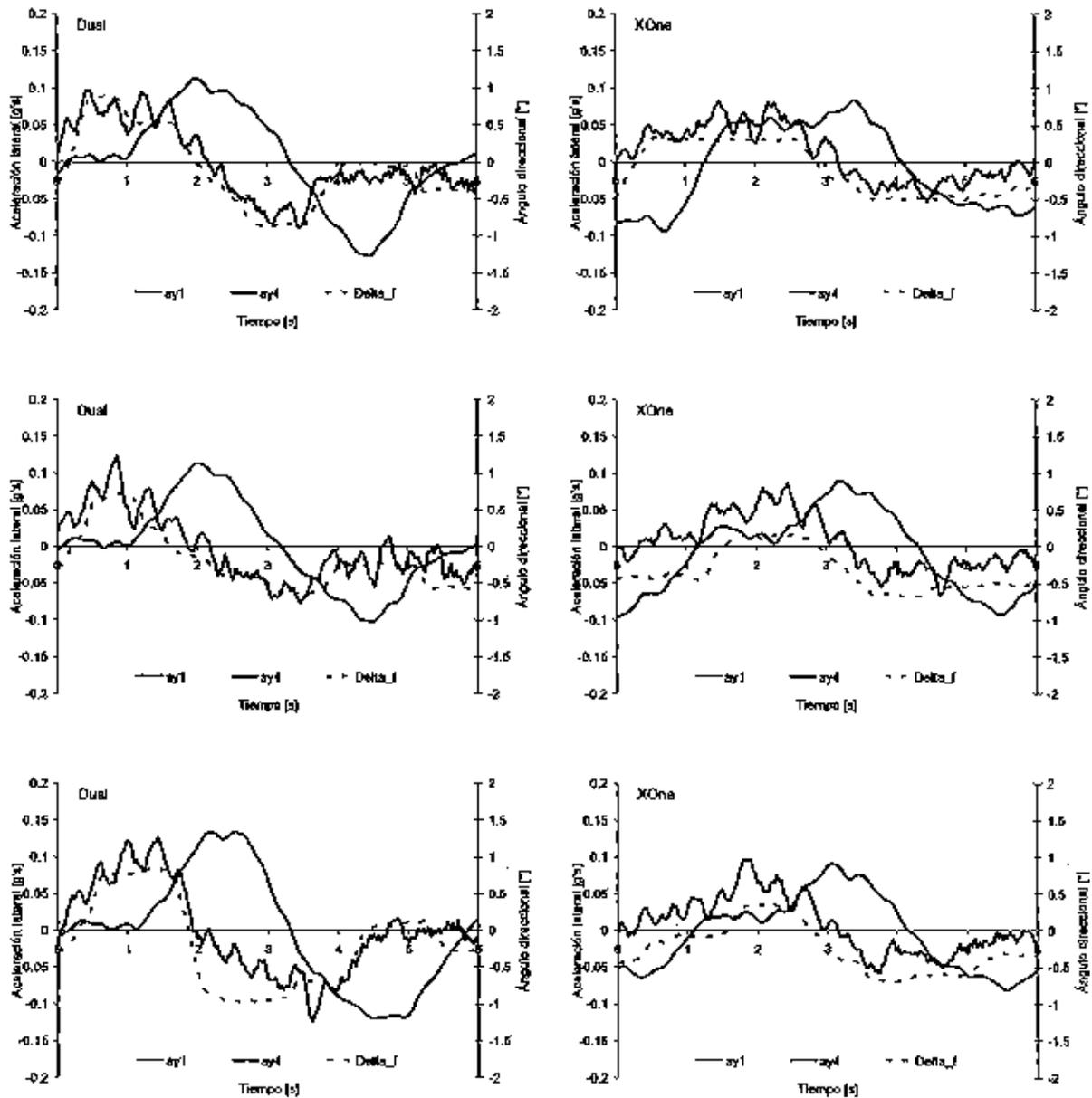


Figura B3. Aceleración lateral en la primera y última unidades durante cambio simple a carril derecho a 80 km/h.

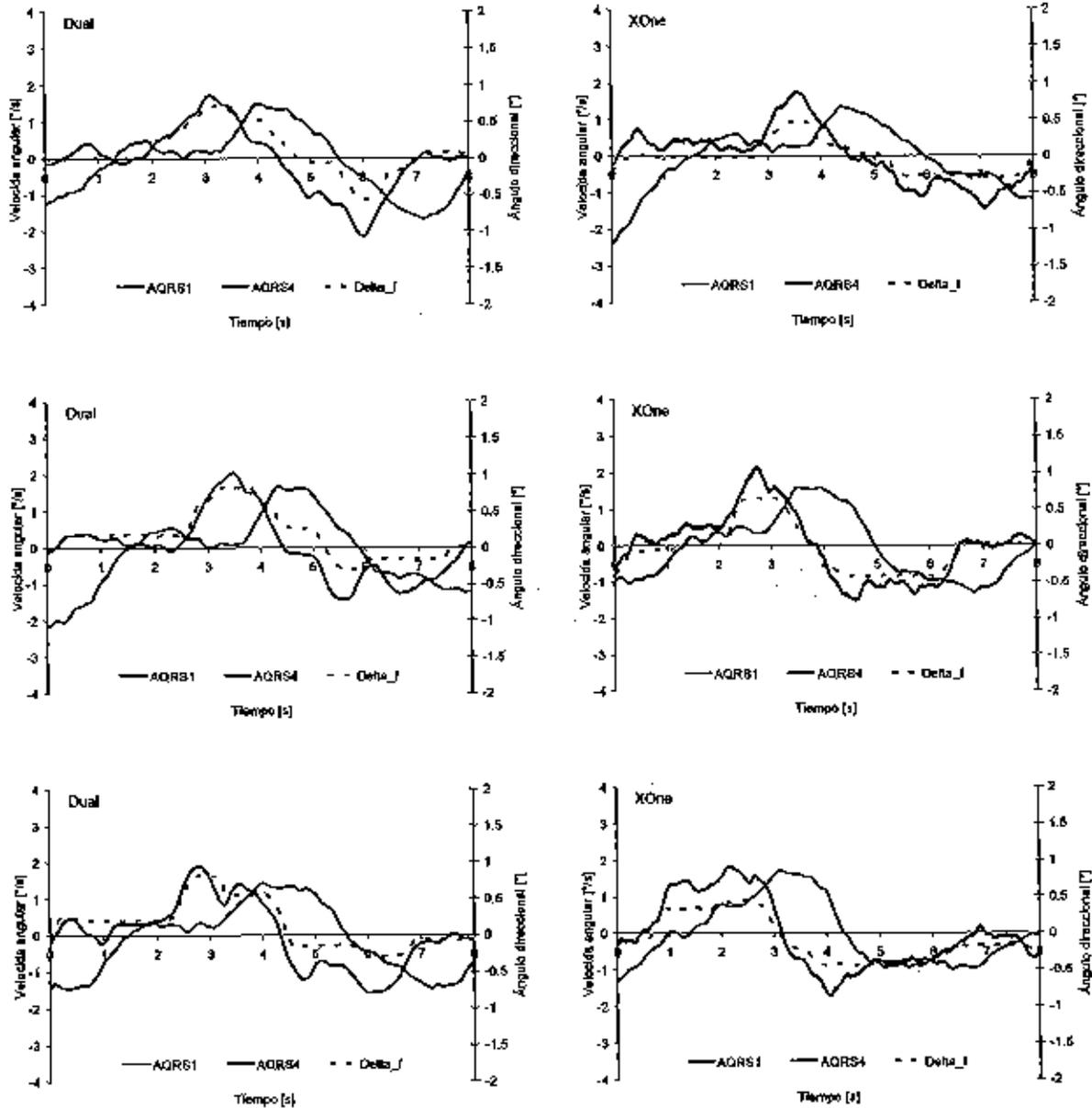


Figura B4. Velocidad angular de la primera y última unidades durante cambio simple a carril derecho a 60 km/h.

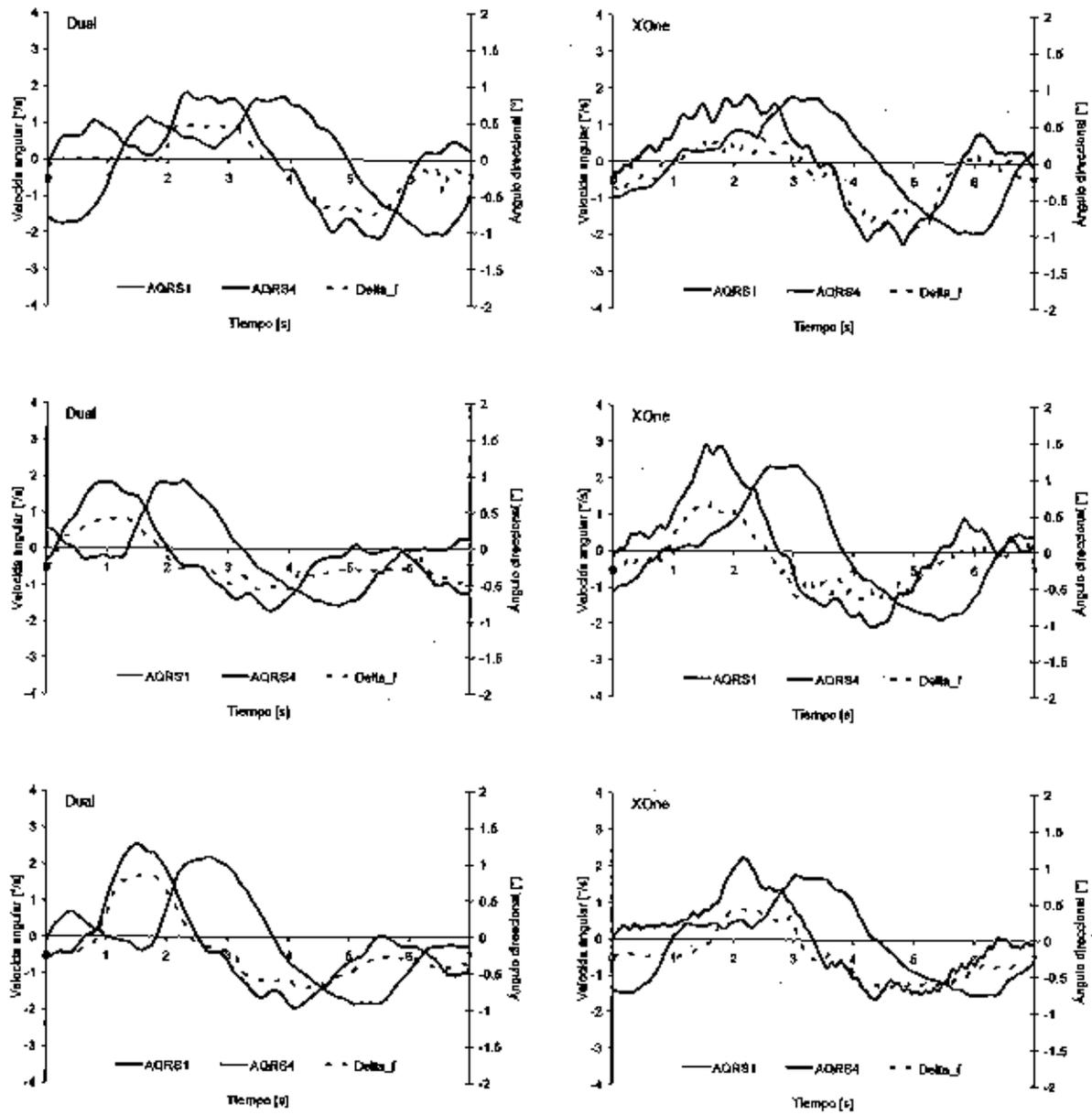


Figura B5. Velocidad angular de la primera y última unidades durante cambio simple a carril derecho a 70 km/h.

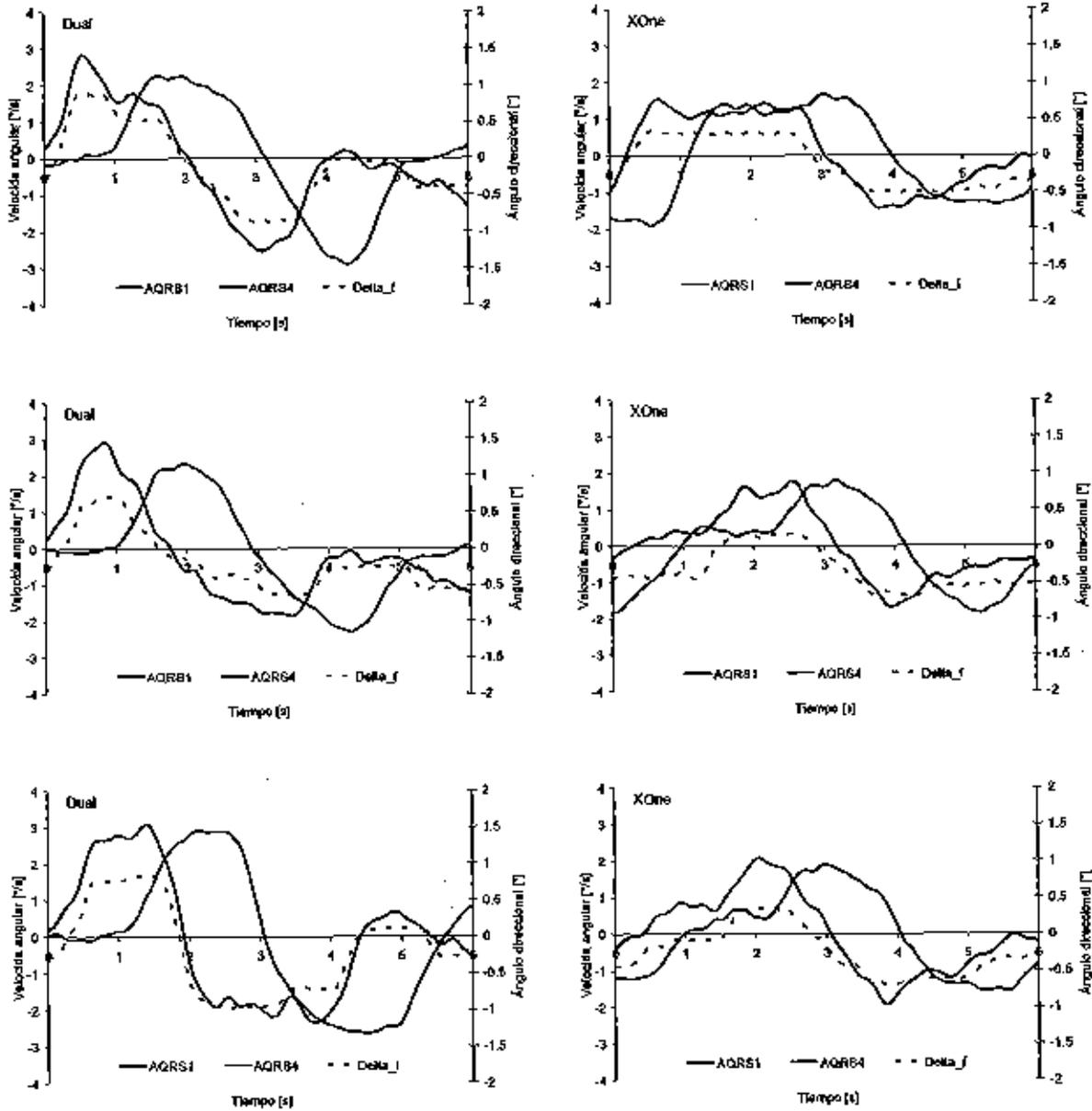


Figura B6. Velocidad angular de la primera y última unidades durante cambio simple a carril derecho a 80 km/h.

ANEXO C

CAMBIO DOBLE DE CARRIL A IZQUIERDA-DERECHA

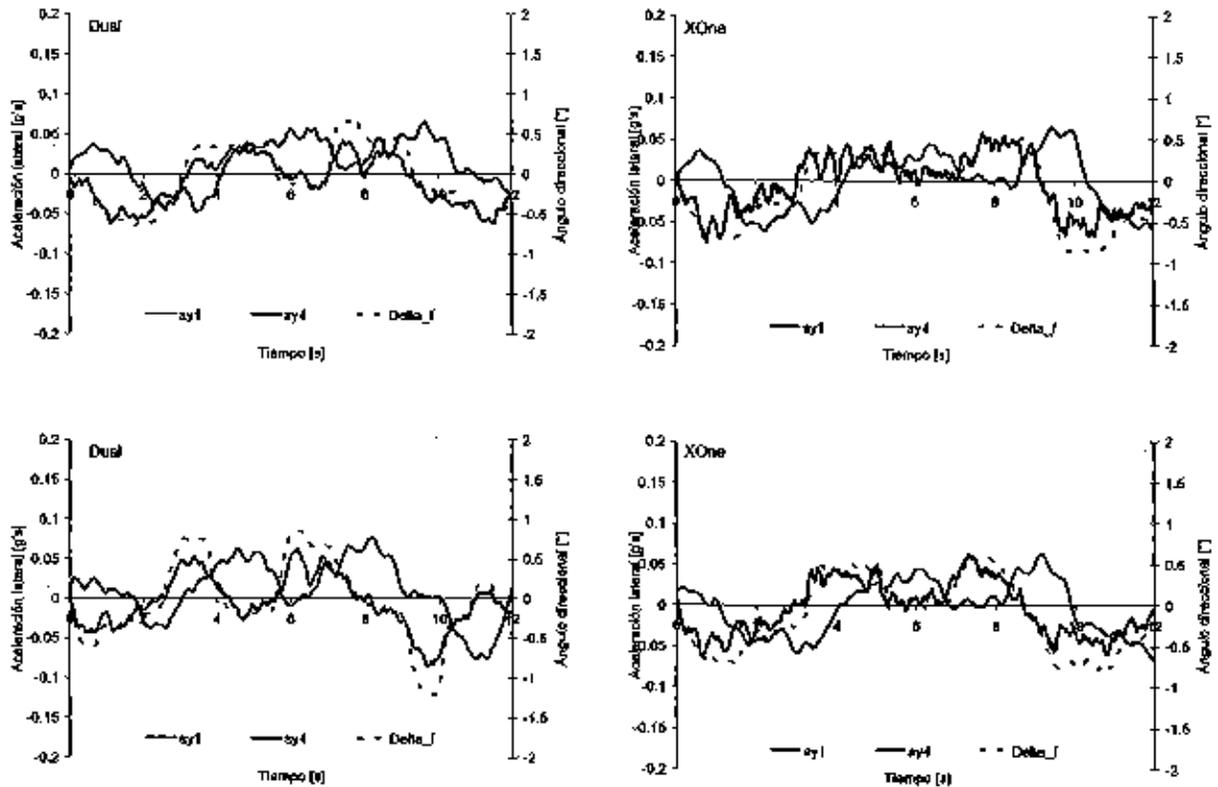


Figura C1. Aceleración lateral en la primera y última unidades durante cambio doble de carril (izquierdo-derecho) a 60 km/h.

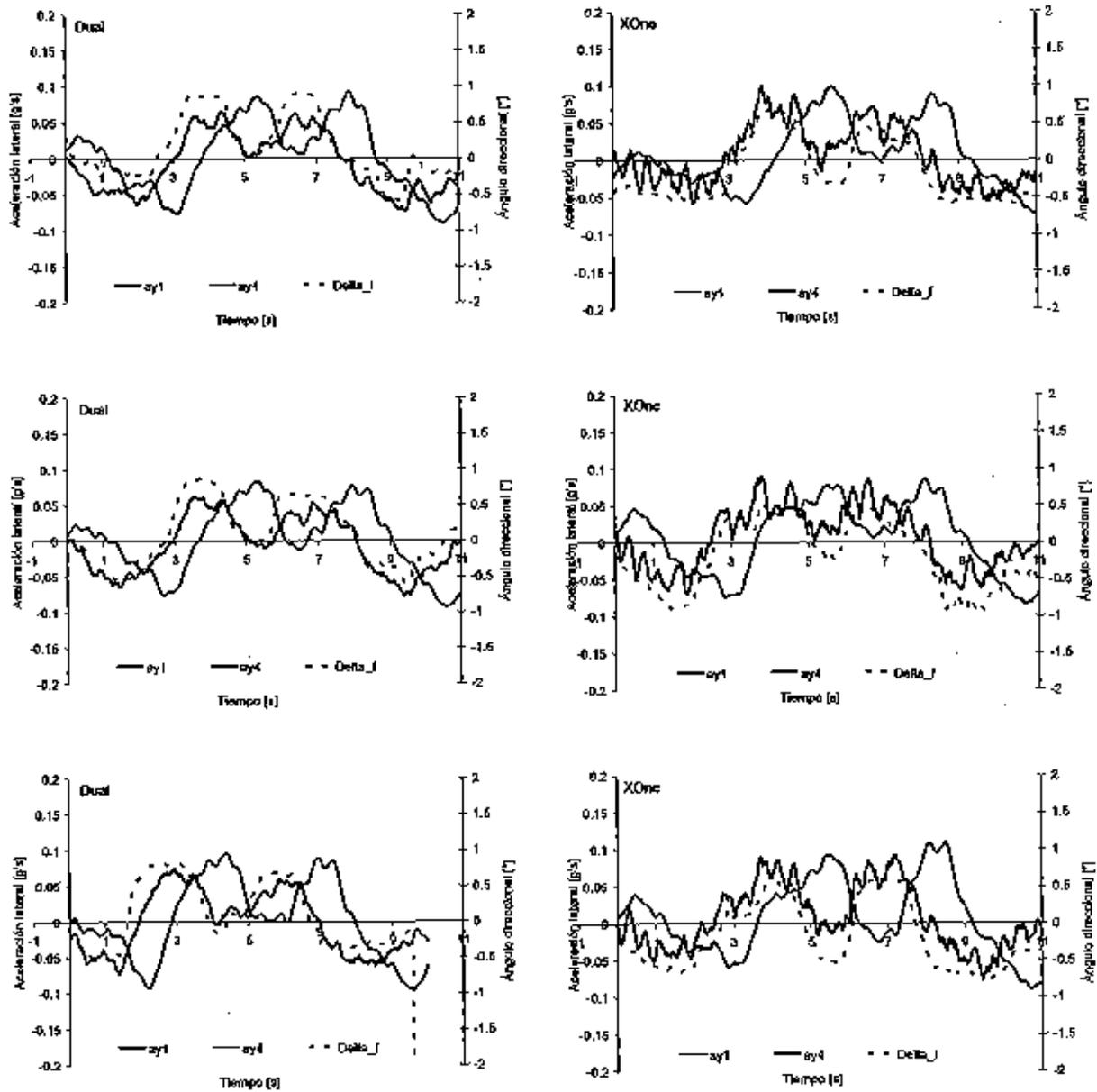


Figura C2. Aceleración lateral en la primera y última unidades durante cambio doble de carril (izquierdo-derecho) a 70 km/h.

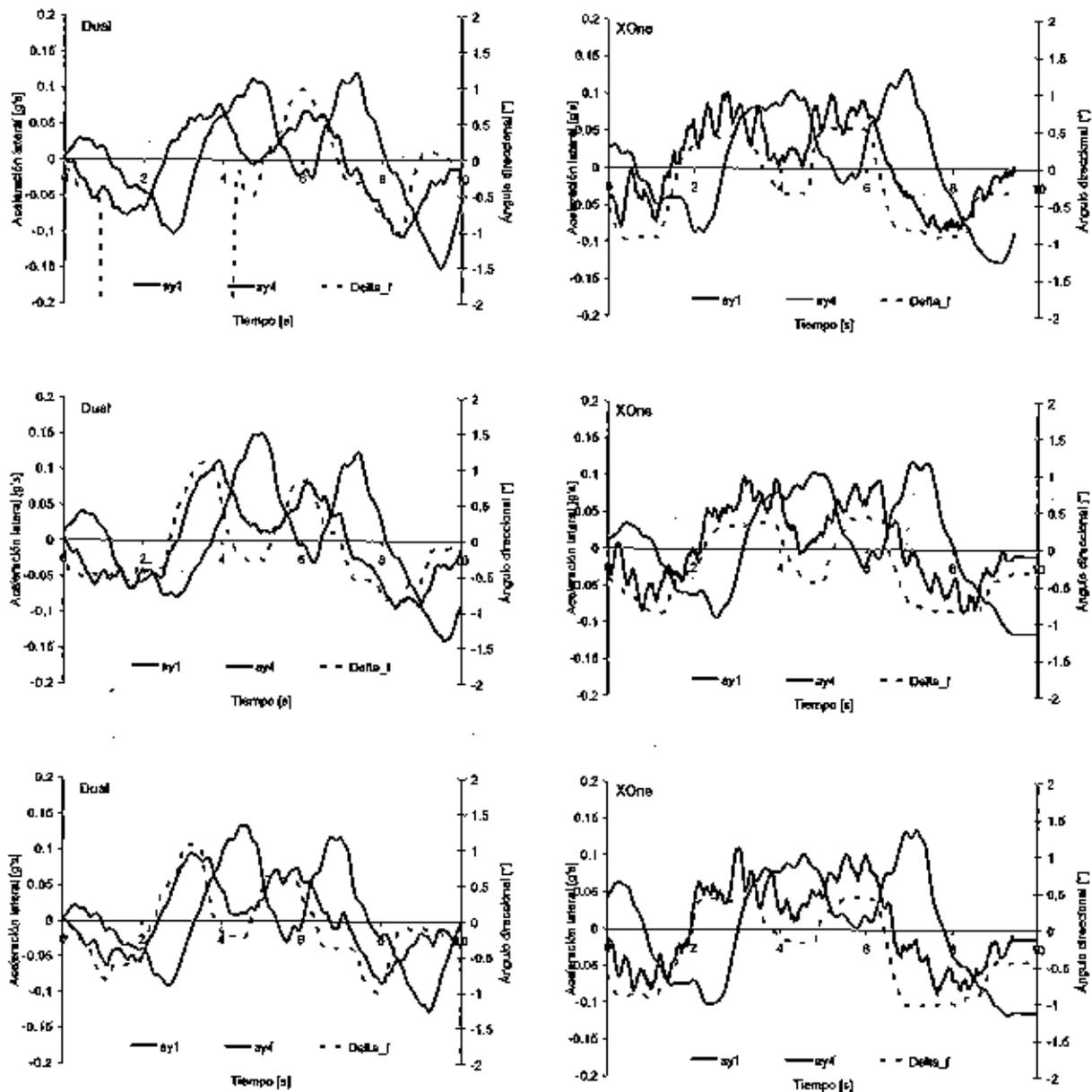


Figura C3. Aceleración lateral en la primera y última unidades durante cambio doble de carril (izquierdo-derecho) a 80 km/h.

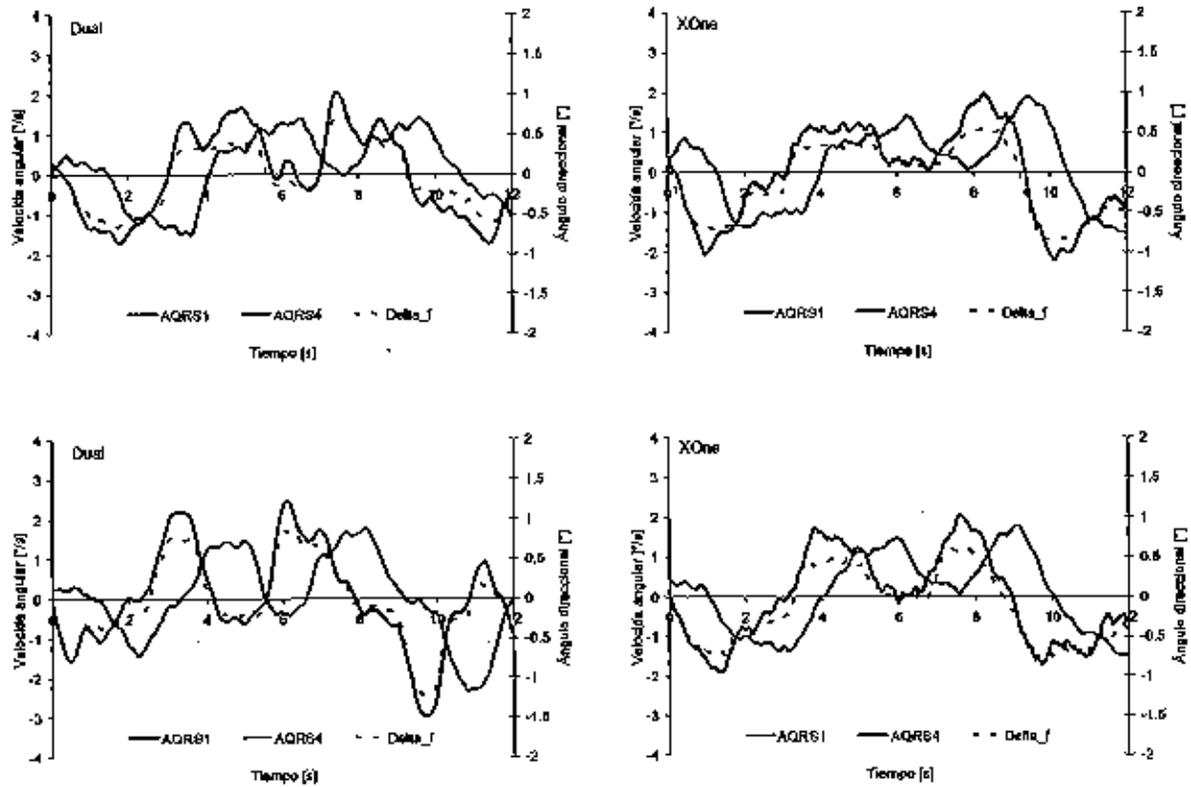


Figura C4. Velocidad angular de la primera y última unidades durante cambio doble de carril (izquierdo-derecho) a 60 km/h.

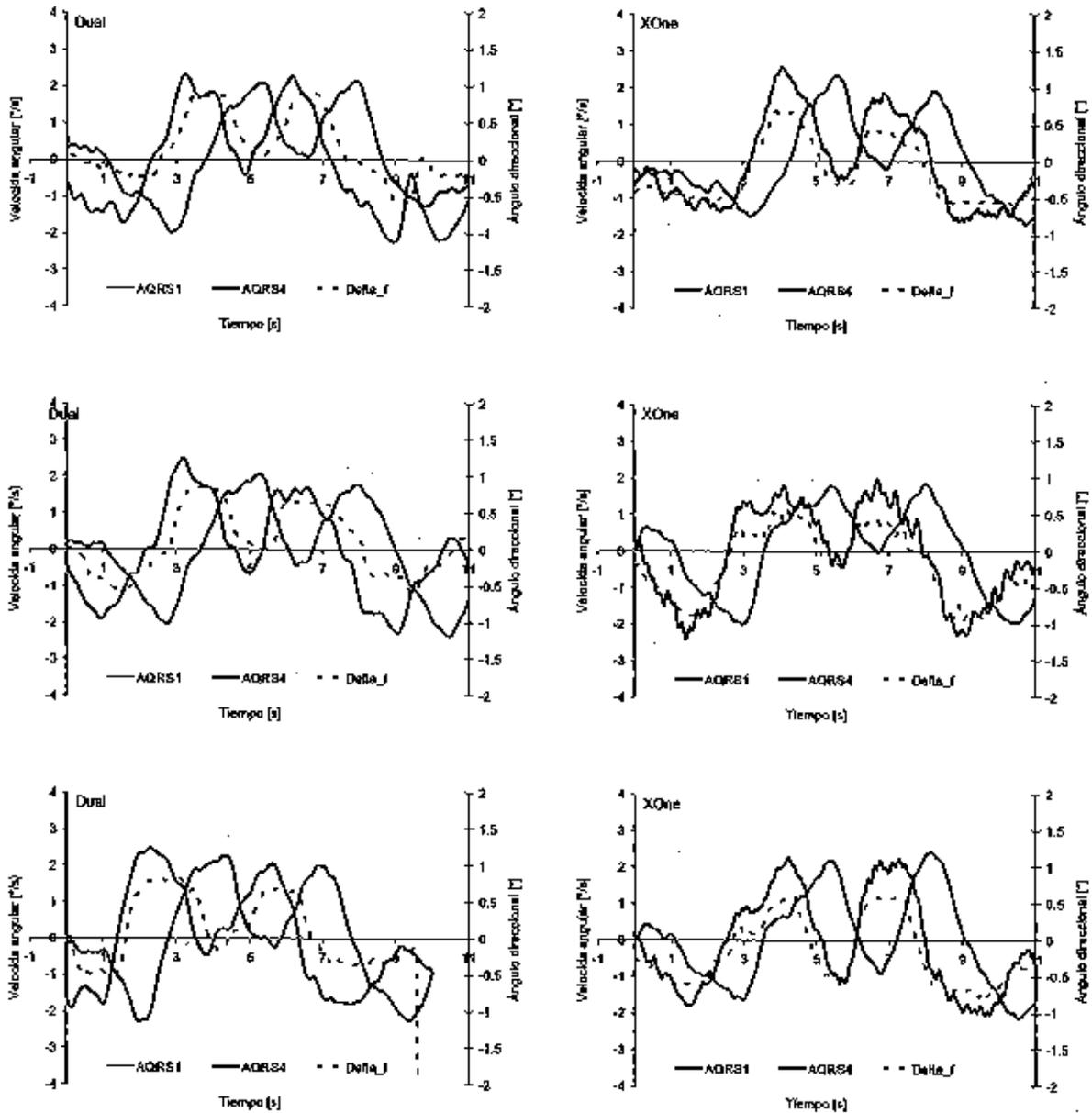


Figura C5. Velocidad angular de la primera y última unidades durante cambio doble de carril (izquierdo-derecho) a 70 km/h.

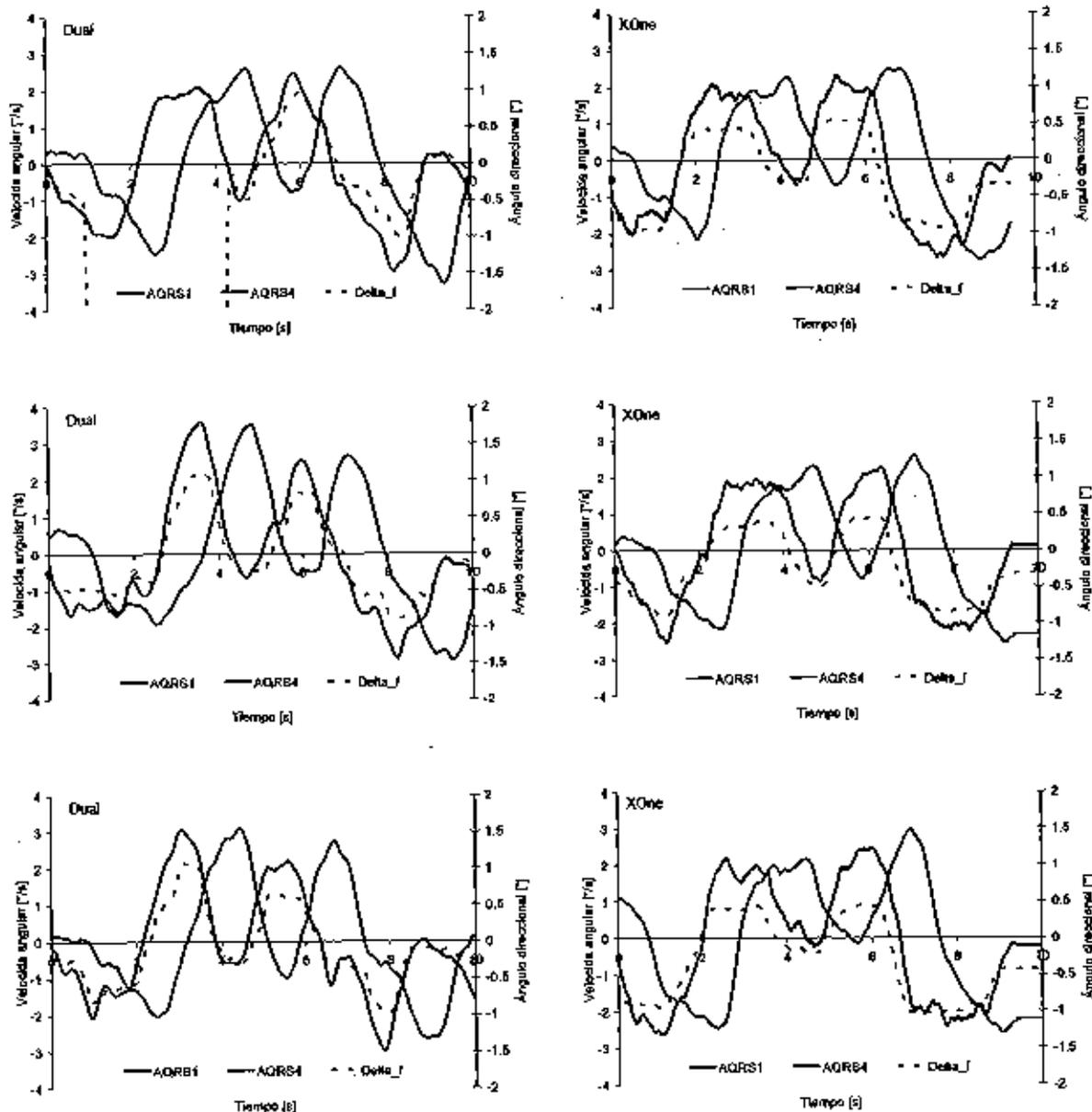


Figura C6. Velocidad angular de la primera y última unidades durante cambio doble de carril (izquierdo-derecho) a 80 km/h.

ANEXO D

CAMBIO DOBLE DE CARRIL A DERECHA-IZQUIERDA

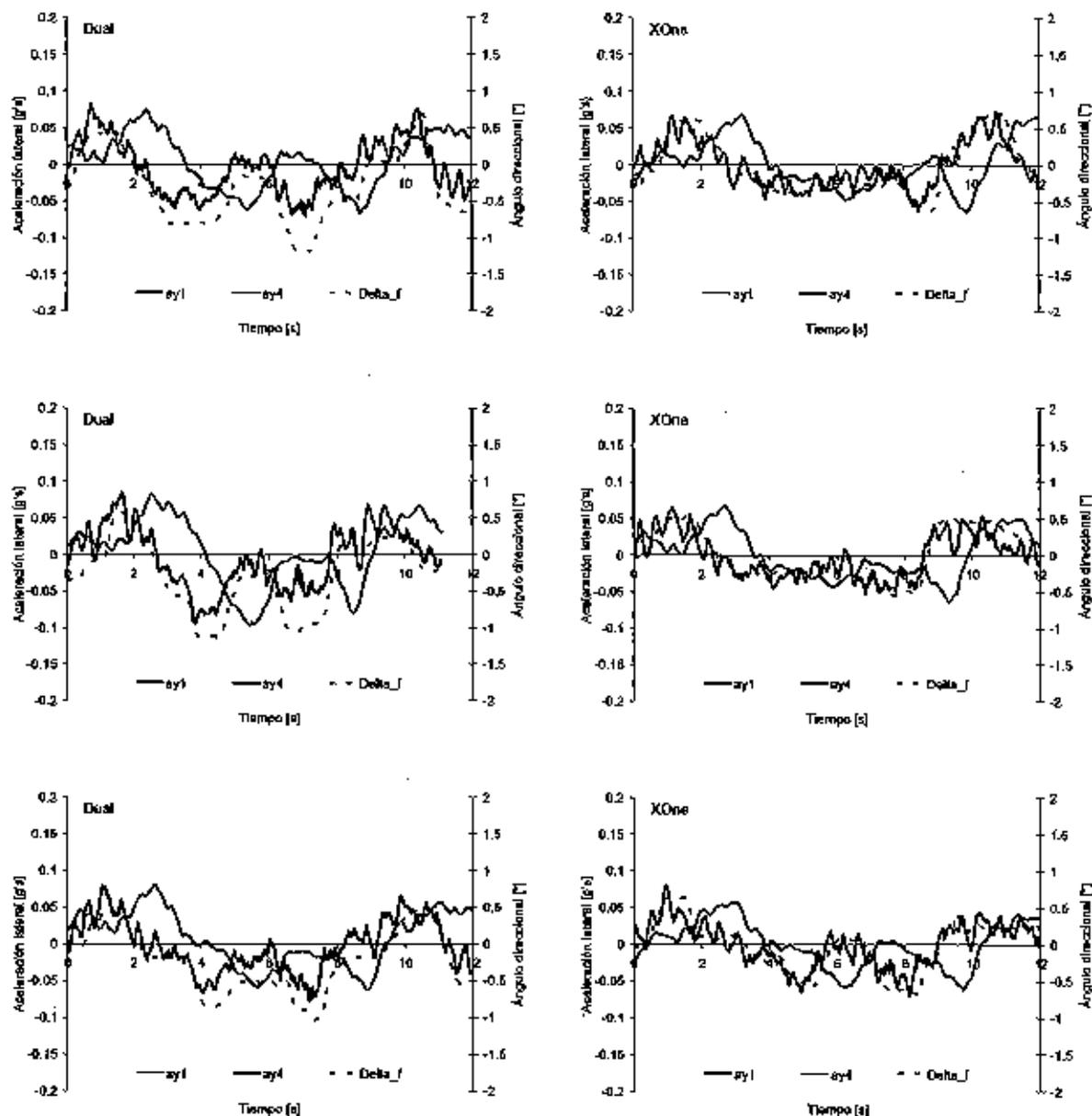


Figura D1. Aceleración lateral en la primera y última unidades durante cambio doble de carril (derecho-izquierdo) a 60 km/h.

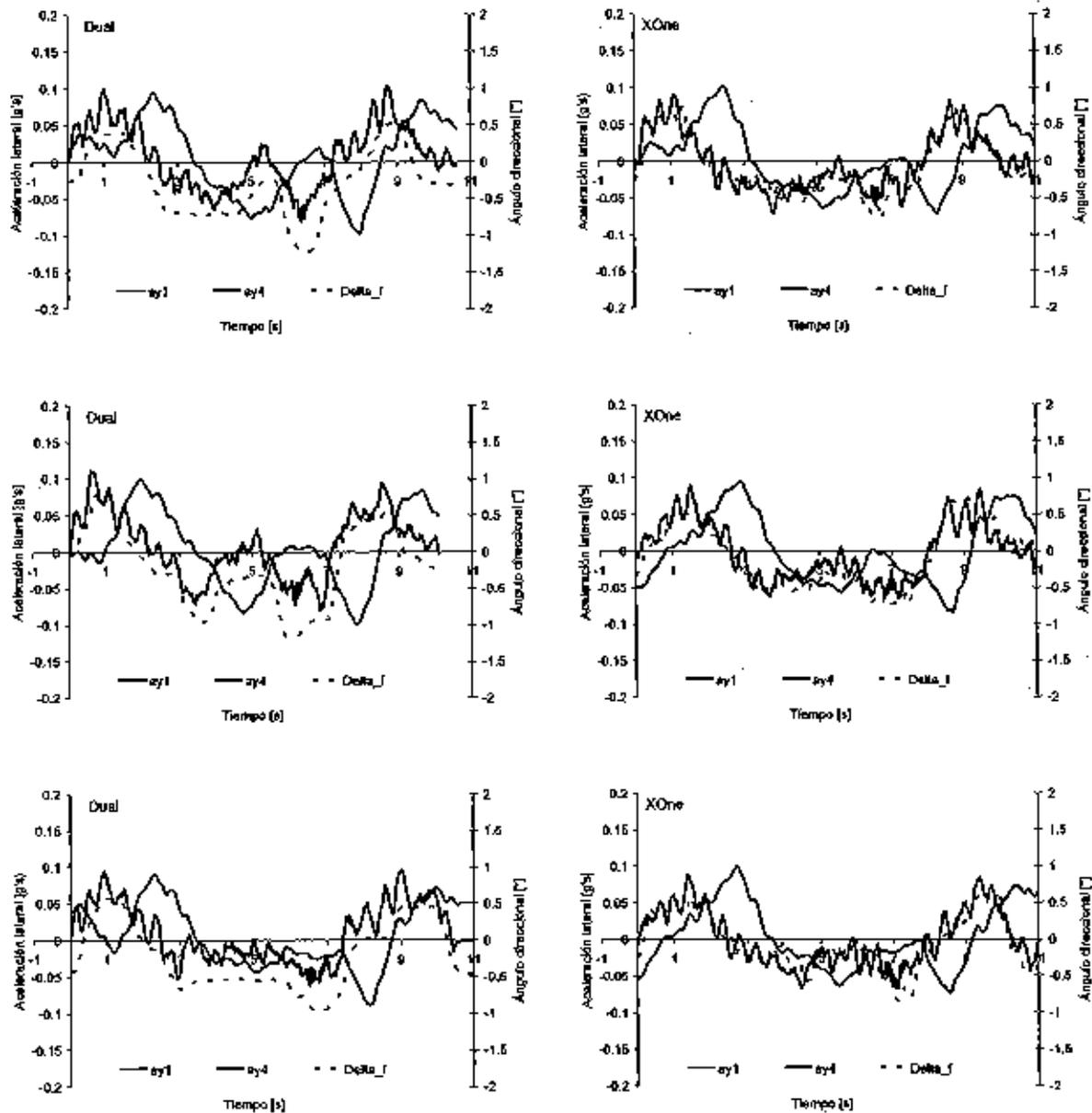


Figura D2. Aceleración lateral en la primera y última unidades durante cambio doble de carril (derecho-izquierdo) a 70 km/h.

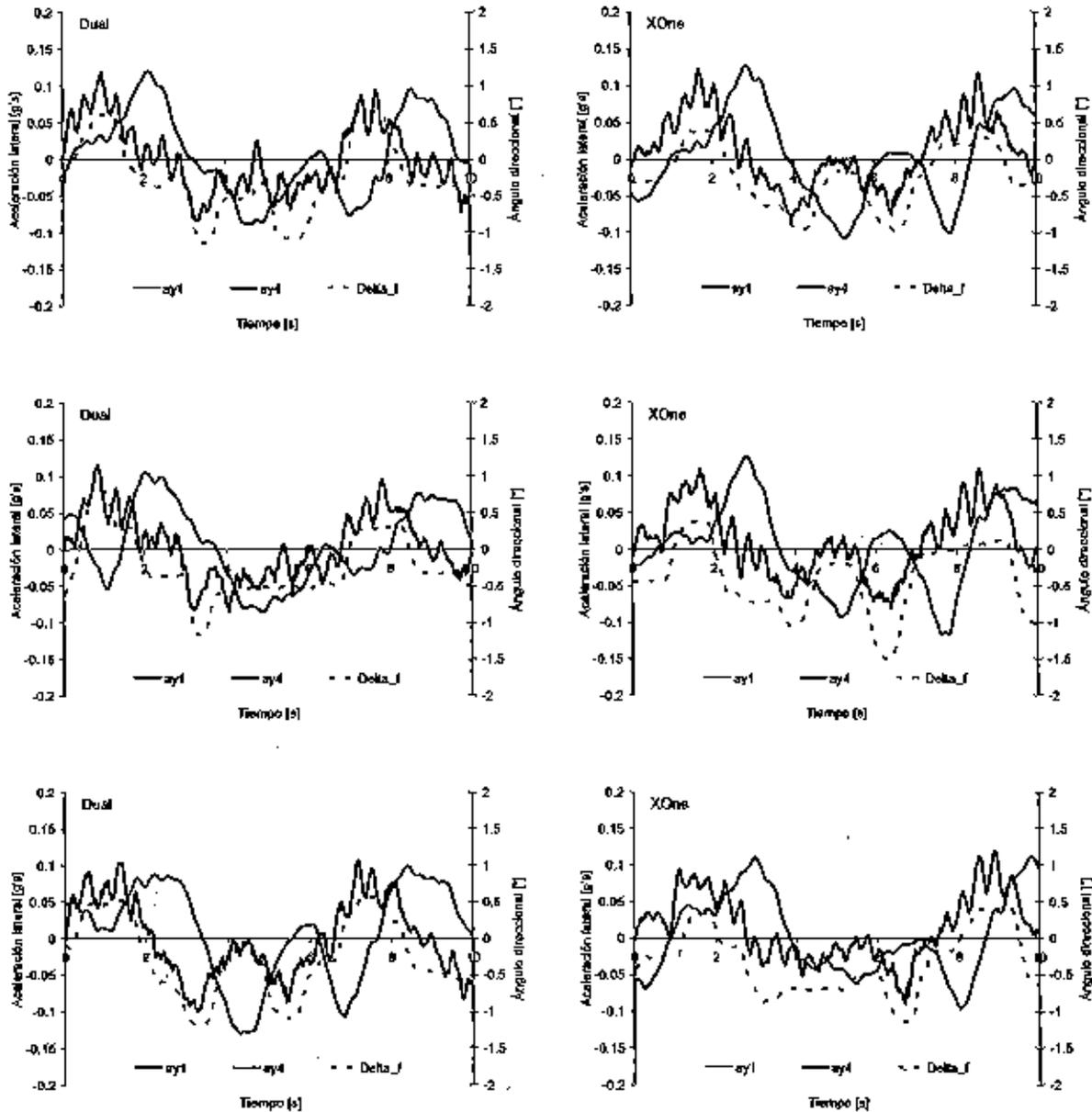


Figura D3. Aceleración lateral en la primera y última unidades durante cambio doble de carril (derecho-izquierdo) a 80 km/h.

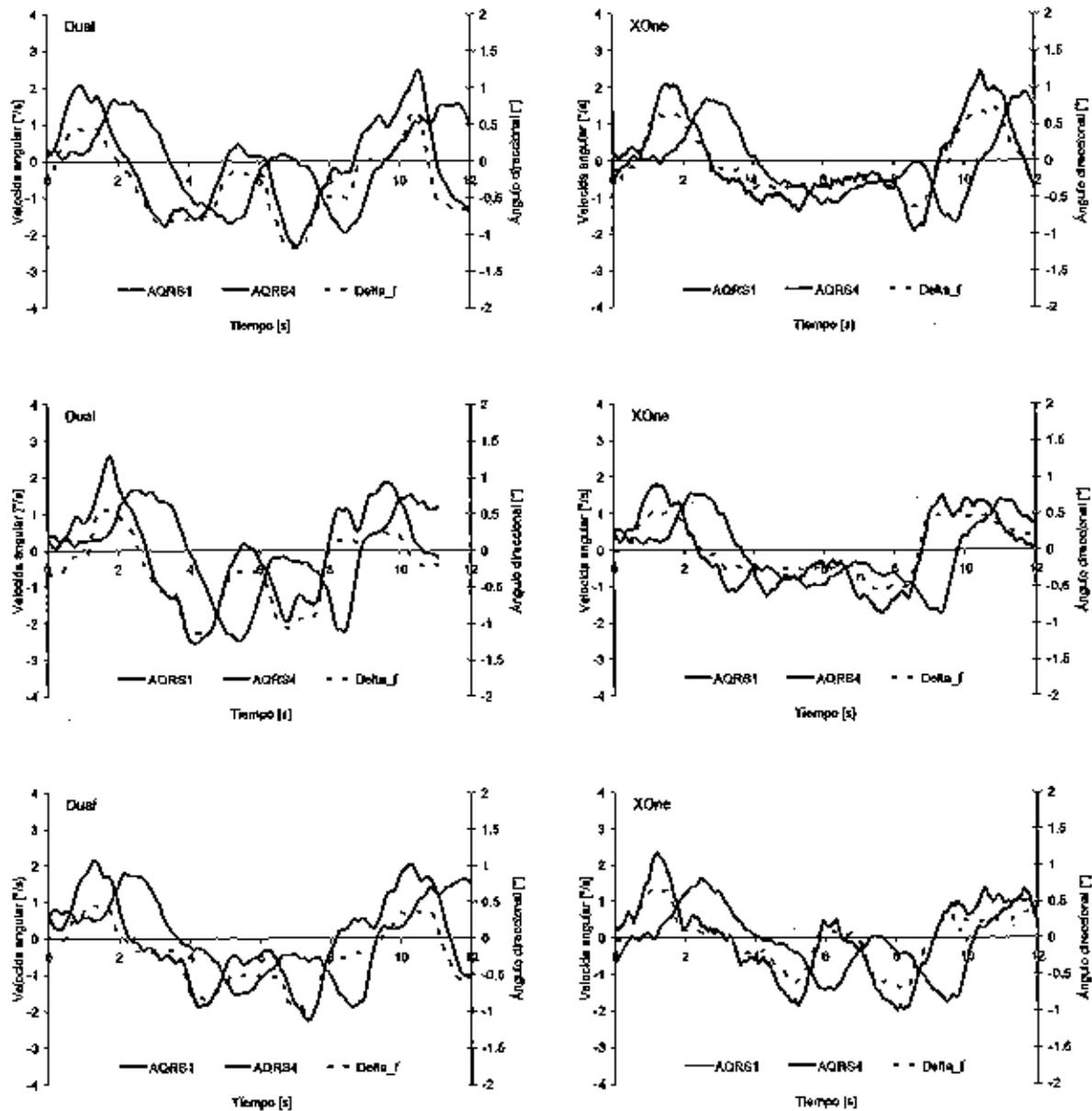


Figura D4. Velocidad angular de la primera y última unidades durante cambio doble de carril (derecho-izquierdo) a 60 km/h.

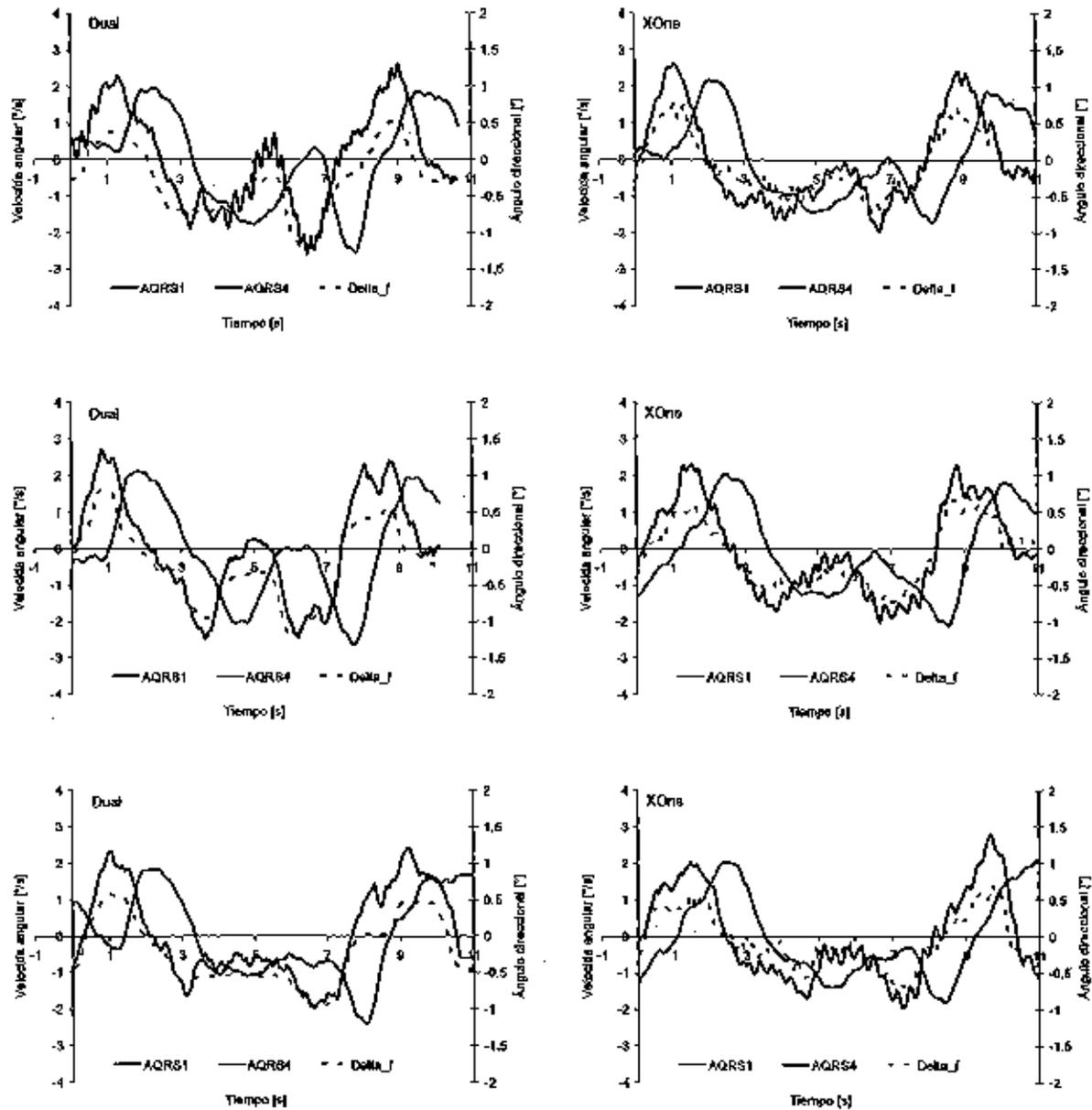


Figura D5. Velocidad angular de la primera y última unidades durante cambio doble de carril (derecho-izquierdo) a 70 km/h.

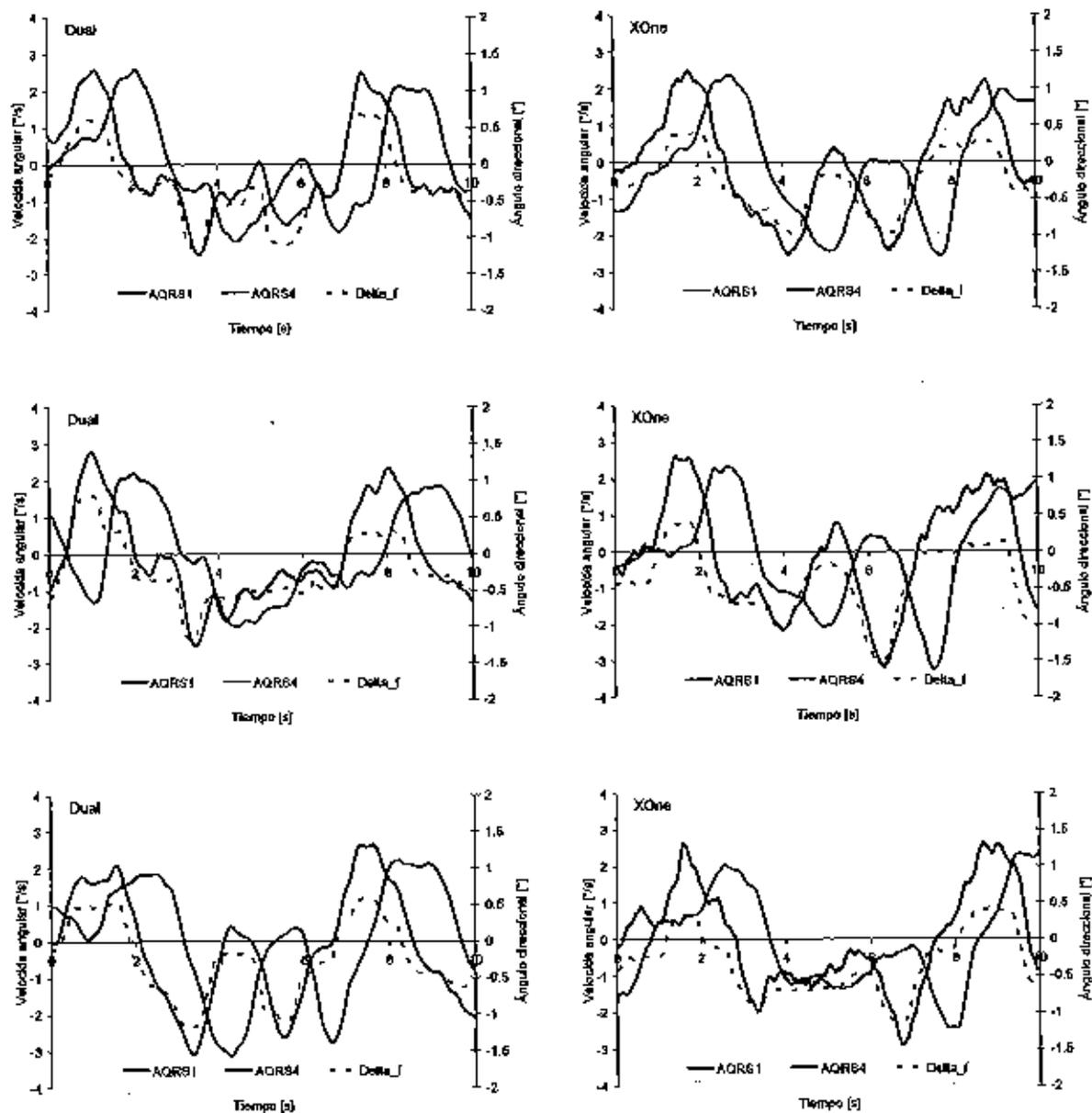


Figura D6. Velocidad angular de la primera y última unidades durante cambio doble de carril (derecho-izquierdo) a 80 km/h.