

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DEL CONTACTO RUEDA-RIEL EN SEGMENTO DE VÍA FÉRREA DEL SISTEMA METRO DE CARACAS C.A.

Presentado ante la Ilustre
Universidad Central de Venezuela
Por el Br. Alejandro Gómez
Para optar al Título de
Ingeniero Mecánico

Caracas, junio 2012

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DEL CONTACTO RUEDA-RIEL EN SEGMENTO DE VÍA FÉRREA DEL SISTEMA METRO DE CARACAS C.A.

TUTOR ACADÉMICO: Prof. Enrique Limongi

Presentado ante la Ilustre
Universidad Central de Venezuela
Por el Br. Alejandro Gómez
Para optar al Título de
Ingeniero Mecánico

Caracas, junio 2012



ACTA

Los abajo firmantes, Miembros del Jurado Examinador designado por el Consejo de Escuela de Ingeniería Mecánica para evaluar el Trabajo Especial de Grado presentado por el Bachiller

Alejandro Gómez

Titulado

“Evaluación del Comportamiento del Contacto Rueda-Riel en Segmento de Vía Férrea en el Sistema Metro de Caracas, C.A.”

Consideran que el mismo cumple con los requisitos exigidos por el Plan de Estudios conducente al Título de Ingeniero Mecánico.

Acta se levanta en la ciudad de Caracas, a los quince días del mes de junio del año dos mil doce.

Prof. Alberto Pertuz
Jurado



Prof. Enrique Limongi
Tutor

Prof. Pedro Cadenas
Jurado



UNIVERSIDAD CENTRAL DE VENEZUELA
FACULTAD DE INGENIERIA
ESCUELA DE INGENIERIA MECANICA
DEPARTAMENTO DE DISEÑO

Caracas, 15 de junio de 2012.

Prof. Gerardo Ramírez
Jefe de la División de Control de Estudios
Facultad de Ingeniería-UCV
Presente.-

Quienes suscriben, Miembros del Jurado Examinador designado por el Consejo de la Escuela de Ingeniería Mecánica, nos dirigimos a usted con la finalidad de informarle que hemos decidido otorgarle al Bachiller

Alejandro Augusto Gómez Rodríguez

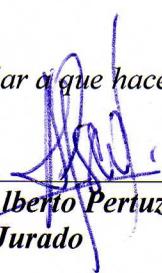
C.I. 17.982.916

MENCIÓN TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

Por la excelencia demostrada en la realización del Trabajo Especial de Grado, titulado

***“Evaluación del Comportamiento del Contacto Rueda-Riel
en Segmento de Vía Férrea en el Sistema Metro de Caracas,***

Sin otro particular a que hacer referencia, quedamos de usted.

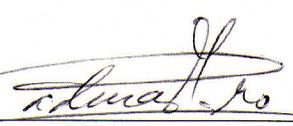


Prof. Alberto Pertuz
Jurado





Prof. Enrique Limongi
Tutor



Prof. Pedro Cadenas
Jurado

DEDICATORIA:

Para mi familia, mis amigos, profesores y compañeros...

...quienes confiaron en mí siempre...

...y que siempre estuvieron para ayudarme.

AGRADECIMIENTOS:

Al Profesor Enrique Limongi por la experiencia vivida en este trabajo, que más que una investigación, representó mi inducción al mundo laboral y un entendimiento profundo de las necesidades del Estado-Nación y mi rol como ingeniero investigador para el fortalecimiento nacional. El agradecimiento se extiende por su ardua labor como tutor.

A mis compañeros de trabajo por su apoyo durante mis actividades de pasantía en la empresa Metro de Caracas C.A, especialmente al Ing. Esteban Sánchez, a la unidad de mediciones especiales: Ing. Daniel Carvajal, Arturo Gudiño, Lic. José Quintero, Jackeline Benedetti y Javier Guzman; a la unidad de homologación y sustitución: Ing. Haysmir Gil, Ing. Mayerli Subarán, Ing. Aylsa Pérez, Ing. Victor Arreaza y Jonathan Ereipa, quienes hicieron un inmensurable esfuerzo para la realización de este trabajo.

A mis amigos, quienes me han acompañado desde nuestros inicios en la UCV.

A los más de 50 profesores que intervinieron en mi formación profesional y ejemplos a seguir. Y a todo el personal administrativo y de seguridad de la Escuela de Mecánica de la UCV –muy especialmente a Hamyit Blanco y Oneida Gutierrez

A la Dra. Cornelia M.Kalker-Kalkman, quien muy amablemente facilitó el artículo de su esposo, el Dr. Joost Kalker, que le solicité y sus buenos deseos de éxito de mi trabajo. Así mismo al Dr. Edwin Vollebregt por hacer posible el libre acceso al conocimiento sobre contacto mecánico.

Y finalmente a mi familia, en especial mi madre y mi abuela, por el apoyo de toda una vida y por creer en mí, siempre. Sin ellas hoy no hubiera llegado hasta acá.

ACKNOWLEDGEMENTS:

I would like to express my appreciation to Professor Enrique Limongi, for all the experience in this work, not only a research but my induction into the working world and a deep understanding of the Nation's needs and my contribution as a research engineer. Appreciation is extended for his hard work as my dissertation advisor.

To my colleagues for their support during my internship activities in CA Metro de Caracas, especially to Esteban Sánchez (engineer), Daniel Carvajal (engineer), Arthur Gudiño, Haysmir Gil (engineer), Mayerli Subaran (engineer), Aylsa Pérez (engineer), Victor Arreaza (engineer), Jonathan Ereipa, José Quintero, Jacqueline Benedetti and Javier Gusman who made an incalculable effort to carry out this work.

To my friends who accompanied me all along our studies at Universidad Central de Venezuela. And all the administrative and security staff of the School of Mechanical from UCV -most especially Hamyit Blanco y Oneida Gutierrez.

To Dr. Cornelia M.Kalker-Kalkman, who kindly provided me with a copy of her husband's, the Dr. Joost Kalker, paper I requested and her good wishes of success. Also to Dr. Edwin Vollebregt for making it possible the free access to knowledge in mechanical contact.

And finally to my family, especially my mother and grandmother, for the support of a lifetime and for always believing in me. Without them I would not have come this far.

ÍNDICE

Índice.....	vii
Índice de Figuras.....	xi
Índice de Tablas.....	xiv
Resumen.....	xv
Introducción.....	1
Capítulo 1. -Él Problema.....	3
1.1 Planteamiento del problema.....	3
1.2 Objetivo General.....	5
1.3 Objetivos Específicos.....	5
1.4 Justificación.....	6
1.5 Limitaciones y alcances.....	7
Capítulo 2. -Marco Referencial.....	9
2.1 Antecedentes de la investigación.....	9
2.1.1 Trabajos realizados por la empresa Metro de Caracas.....	10
2.1.2 Simulación del Contacto Rueda-Riel.....	11
2.1.3 Contacto rueda-riel y las irregularidades en la superficie de contacto.....	15
2.2 Fundamentos Teóricos.....	23
2.2.1 Contacto mecánico hertziano.....	24
2.2.2 Inicio del modelado del contacto mecánico rueda-riel.....	30
2.2.3 La rugosidad y el contacto mecánico.....	33
2.2.4 Modelado tridimensional de contacto rueda-riel.....	37
Capítulo 3. -Metodología de la Investigación.....	48
3.1 Definición de las variables de interés para el estudio del contacto rueda- riel.....	49
3.2 Estimación de las cargas mediante galgas extensiométricas.....	51

3.3 Evaluación de los resultados para la validación de los modelos de contacto rueda-riel.....	56
Capítulo 4. -Interpretación y análisis de los resultados.....	60
4.1 Modelo de la relación carga vs deformación.....	60
4.2 Actividades realizadas en campo para la evaluación del comportamiento rueda-riel en el sistema Metro de Caracas C.A.....	68
4.3 Evaluación de los resultados obtenidos en la Línea 1 de Metro de Caracas.....	74
4.3.1 Evaluación de los modelos proporcionalidad de fuga longitudinal.....	78
4.3.2 Sustitución del modelo de proporcionalidad de fuga longitudinal para incluir variaciones en el radio ideal de contacto.....	82
4.3.3 Modificación del modelo que incluye variaciones en el radio ideal de contacto para el calculo de fuga longitudinal, para considerar la geometría de la rueda.....	85
4.3.4 Consideraciones de tracción y frenado.....	86
4.4 Evaluación de los modelos de contacto rueda-riel.....	90
Capítulo 5. -Conclusiones y Recomendaciones.....	94
5.1 Conclusiones.....	94
5.2 Recomendaciones.....	95
Bibliografía.....	97
Apéndices.....	100
Apéndice A: Fuente de programas creados en Python.....	101
Apéndice B: Gráficos de los cargas longitudinales y el desplazamiento lateral en el tiempo registrados por la empresa Transportation Technology Center, Inc. en cada tramo de la Línea 1.....	108

Apéndice C: Gráficos de las cargas vs las fugas longitudinales de cada rueda mediante los resultados obtenidos por la empresa Transportation Technology Center, Inc. en cada tramo de la Línea 1.....	123
Apéndice D: Gráficos de las cargas vs las fuga longitudinal considerando un radio común de contacto bajo los resultados obtenidos por la empresa Transportation Technology Center, Inc. en cada tramo de la Línea 1.....	138
Apéndice E: Gráficos de las cargas vs la fuga longitudinal considerando la propuesta de radio comun de contacto y discretización del perfil de la rueda obtenidos mediante los resultados de la empresa Transportation Technology Center, Inc. en cada tramo de la Línea 1.....	153
Apéndice F: Gráficos de las diferencia de carga vs la fuga longitudinal según los resultados obtenidos por la empresa Transportation Technology Center, Inc. en cada tramo de la Línea 1.....	168
Apéndice G: Gráficos de la diferencia de cargas en el eje vs las fugas longitudinales considerando un radio común de contacto resultados obtenidos por la empresa Transportation Technology Center, Inc. en cada tramo de la Línea 1.....	183
Apéndice H: Gráficos de error las cargas estimadas por los modelos de contacto rueda riel y resultados obtenidos por la empresa Transportation Technology Center, Inc. en cada tramo de la Línea 1.....	198
Apéndice I: Plano de los juegos de galgas extensiométricas adheridas en la superficie de la rueda para la determinación de las cargas en la rueda.....	213

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Diferencias entre el método analítico, método euler implementado por Kalker (1982) y el método trapezoidal implementado en FASTSIM2 por Vollebregt et al (2011).....	13
Figura 2: Comparación obtenida por Kalker (1990) de la variación del área de contacto respecto a la altura de las irregularidades y a la dispersión de los mismos.....	16
Figura 3: Evolución transitoria de la distribución de la presión tangencial en el fenómeno de Cattaneo, Kalker (1990).....	17
Figura 4: Discretación de la superficie rugosa, Limongi y Gómez (2011), considerando las irregularidades como vigas cilíndricas.....	19
Figura 5: Vista del contacto entre las irregularidades rueda y riel, Limongi y Gómez (2011).	21
Figura 6: Superficies con curvatura donde el contacto se inicia en el centro de coordenadas.....	23
Figura 7: Superficies interceptadas, donde el plano de contacto es representado por $z=0$ y el desplazamiento de un punto respecto a la dirección normal w_1 y w_2	24
Figura 8: Visualización de la superficie de contacto cuando los radios de curvatura no son iguales entre si.....	28
Figura 9: Descripción de la superficie de contacto bajo deslizamiento.....	30
Figura 10: Cilindros en contacto y el flujo de la corriente a través del punto de contacto. Fuente: Bowden y Tabor (1939).....	32
Figura 11: Perfil de rugosidades, Greenwood y Williamson (1966) donde se observa la región de penetración debido a la rugosidad y la zona donde el material se comporta como medio elástico continuo.....	34
Figura 12: Geometría de la distribución de la presión tangencial Fuente: Polach (1999).....	42

Figura 13: Distribución de las deformaciones en las paredes de la rueda a partir de los resultados obtenidos por la empresa Transportation Technology Center, Inc (TTCI).	51
Figura 14: La relación entre las señales de las galgas extensiométricas para los puentes de verticales VB1, VB2, VB3 y VB4 (Vertical Bridge) contra su posición angular cuando la rueda es sometida a 180kN de carga.....	52
Figura 15: La relación entre el valor absoluto de las señales obtenidas por las galgas extensiométricas y la posición angular cuando la rueda es sometida a 180kN de carga.....	52
Figura 16: Máximos valores de las señales de galgas extensiométricas en conjunto respecto a la posición de los sensores, al igual que valor promedio de la señal conjunta.....	53
Figura 17: Tren habilitado por Metro de Caracas C.A. para la realización de pruebas en la vía de prueba, el cual se le instaló el bogie instrumentados, sin los amplificadores en los extremos del eje.....	65
Figura 18: Inspección del bogie instrumentado por el personal de mediciones especiales, a fin de garantizar el estado integral de las piezas mecánicas y el correcto aislamiento del sistema de amortiguación.....	66
Figura 19: Montaje en el tren del sistema de adquisición de datos en el vagón al igual que componentes pesado.....	67
Figura 20: Muestra de la condición de los fusibles de los amplificadores analógicos.....	67
Figura 21: Preparación de los amplificadores móviles ubicados en las ruedas, horas antes de la prueba.....	68
Figura 22: Realización de la tercera prueba con ejes instrumentados.....	69
Figura 23: Resultados de las cargas y los desplazamientos laterales y la velocidad en el tiempo, del tramo Plaza Sucre a Gato Negro de las ruedas A1 y B1, extraído del Apéndice B.2.....	71
Figura 24: Resultados de las cargas y las fugas en la dirección longitudinal y la velocidad en función del tiempo, para los tramo California a Los Cortijos y Gato Negro a Plaza Sucre.....	73

Figura 25: Relación Cargas vs Fuga en la dirección longitudinal, utilizando el modelo de fuga expresado en Iwnicki (2006) para el tramo Plaza Sucre a Gato Negro.....	74
Figura 26: Relación de Cargas vs Fuga en la dirección longitudinal, utilizando el modelo de fuga expresado en Iwnicki (2006) para el tramo California a Los Cortijo,.....	76
Figura 27: Tendencia lineal de las muestras seleccionadas en la relación de Carga vs Fuga longitudinal en la rueda A1.....	76
Figura 28: Relación Cargas vs Fuga en la dirección longitudinal, utilizando el modelo de fuga expresado en Iwnicki (2006) para el tramo Gato Negro a Plaza Sucre.....	77
Figura 29: Resultados obtenidos en el eje 1 para el tramo Plaza Sucre a Gato Negro, considerando fugas proporcionales al desplazamiento relativo de la rueda respecto a un radio común.....	79
Figura 30: Resultados obtenidos en el eje 1 para el tramo California a Los Cortijos, considerando fugas proporcionales al desplazamiento relativo de la rueda respecto a un radio común.....	79
Figura 31: Resultados obtenidos en el eje 1 para el tramo Gato Negro a Plaza Sucre, considerando fugas proporcionales al desplazamiento relativo de la rueda respecto a un radio común.....	80
Figura 32: Resultados obtenidos mediante la modificación del modelo de fuga longitudinal para incluir la totalidad de la geometría de la rueda para los tramos Plaza Sucre a Gato Negro, California a Los Cortijos y Gato Negro a Plaza Sucre.....	81
Figura 33: Resultados obtenidos mediante la consideración del despeje de cargas por tracción motriz para los tramos Plaza Sucre a Gato Negro, California a Los Cortijos y Gato Negro a Plaza Sucre.....	83
Figura 34: Resultados obtenidos mediante la consideración del despeje de cargas por tracción motriz y las consideraciones de radio común para fugas longitudinales considerando la totalidad de la geometría de la rueda, para los tramos Plaza Sucre a Gato Negro, California a Los Cortijos y Gato Negro a Plaza Sucre.....	84

Figura 35: Diferencia entre las cargas calculadas mediante los modelos de contacto rueda riel: Kalker, Shen y Polanch a lo largo del tiempo de recorrido del tramo Plaza Sucre a Gato Negro.....87

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Relación m y n respecto al ángulo θ , Hertz (1896).....	29
Tabla 2: Definición de las variables en el fenómeno de contacto rueda-riel y su dependencia en las observaciones realizadas en la validación de los modelos de contacto rueda-riel.	51
Tabla 3: Valores de relación de deformación vs carga para distintas posiciones angulares.....	62
Tabla 4: Valores de los coeficientes que relacionan las deformaciones en los puentes de galgas con las cargas para cada rueda del bogie.....	63
Tabla 5: Errores obtenidos de comparar el modelo lineal de relación carga/deformación con los valores obtenidos en las pruebas de calibración.....	64
Tabla 6: Registro de las señales de las galgas extensiométricas en los conjuntos de puente vertical y la evaluación de las cargas mediante el método propuesto y los resultados obtenidos pero el sistema de derivación de cargas para el tramo Capitolio – La Hoyada.....	66
Tabla 7: Errores porcentuales obtenidos comparando los resultados de Transportation Technology Center, Inc. frente al modelo propuesto que relacionan las deformaciones con las cargas en la rueda.	67
Tabla 8: Muestras de la relación Carga vs Posición de la rueda evaluados para cada 5 segundos.....	76

Gómez R. Alejandro A

**EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DEL CONTACTO
RUEDA-RIEL EN SEGMENTO DE VÍA FÉRREA DEL
SISTEMA METRO DE CARACAS C.A.**

**Tutor Académico: Prof. Enrique Limongi. Tesis. Caracas, U.CV. Facultad
de Ingeniería. Escuela de Ingeniería Mecánica. 2012.**

Palabras clave: Contacto Mecánico, Contacto Mecánico Rueda-Riel,
Deslizamiento, Fuga

El contacto mecánico rueda-riel es estudiado para el análisis del fenómeno de deslizamiento y sus efectos en la dinámica ferroviaria. Los aportes de Carter (1926) y Kalker (1971) permitieron la descripción del problema, apuntando sus estudios a propuestas con modelos analíticos para solucionarlo. Shen et al c.p. Kalker (1991), parten de la solución al modelo lineal de contacto propuesto por Kalker (1971) con la finalidad de mejorar la precisión para altos valores de fuga. Polach (1999) establece una solución analítica mediante la solución integral a la distribución de la presión tangencial propuesta por Kalker (1982) con el modelo FASTSIM. Estos modelos son utilizados en un gran número de simuladores, motivado a la velocidad de resolver el problema de contacto rueda-riel frente a los sistemas de elemento finito.

Este trabajo recoge el comportamiento observado mediante el uso de ejes instrumentados para la obtención de las fugas y cargas longitudinales y compararlas con los modelos de contacto rueda-riel, a fin de establecer un instrumento para el estudio del comportamiento rueda-riel en la línea 1 de Metro de Caracas.

Los resultados obtenidos se encuentran documentados en gráficas y tablas con la relación entre las cargas y las fugas longitudinales y el error de cada modelo de contacto rueda-riel frente a los resultados obtenidos en prueba de vía, permitiendo establecer los criterios para el análisis de los parámetros geométricos existentes en la vía férrea.

Introducción

Aproximadamente más de un millón de personas dependen diariamente del Metro de Caracas para transportarse dentro de la zona metropolitana. Dado que la continuidad de la prestación de servicio por parte de esta compañía de transporte es vital para la ciudad, cualquier irregularidad en el contacto mecánico rueda-riel debe ser detectada a tiempo, por lo que la evaluación de la calidad de este contacto es significativamente importante para la empresa.

En este trabajo se presentan los resultados de la investigación que se llevó a cabo para desarrollar un instrumento que permita evaluar ese contacto mecánico entre la rueda y el riel en el servicio de trenes comerciales de la Línea 1 del Metro de Caracas C.A.

En el primer capítulo se expone el contexto del problema del comportamiento contacto mecánico rueda-riel y la hipótesis de elaboración de un instrumento de evaluación del fenómeno de estudio. De igual manera se identifican los objetivos generales y específicos de la investigación y la justificación que respalda la necesidad de este trabajo.

El segundo capítulo ofrece el marco referencial que enmarca esta investigación. Expone los avances de los estudios realizados en lo que se refiere al tema del contacto rueda-riel y la base teórica en la que se fundamenta el contacto mecánico de Hertz (1896) y los modelos de contacto tangencial de Kalker (1971), Shen et al c.p. Kalker (1991) y Polach (1999). Así mismo se identifican los fundamentos teóricos de los equipos e instrumentos utilizados en este trabajo.

En lo referente al marco metodológico de la investigación, tema tratado en el tercer capítulo, se describe el tipo de estudio realizado y el diseño que se adoptó para dar respuestas a los interrogantes de la investigación sobre el

contacto rueda-riel. Se explica brevemente la instrumentación utilizada para el estudio del contacto mecánico, detallando sus componentes e identificando el modo de operación con el que se trabajó. Además, se describen las técnicas aplicadas en las distintas etapas de la investigación y el procedimiento para el análisis de la data recolectada bajo los modelos de contacto tangencial expuestos por Kalker (1971), Shen et al c.p. Kalker (1991) y Polach (1999).

En el cuarto capítulo, se exponen los datos obtenidos en pruebas realizadas en vía férrea y su análisis, identificando las variables que se relacionan o influyen directamente sobre el fenómeno, para compararlos con los modelos de contacto rueda-riel mencionados en el párrafo anterior. Finalmente en el quinto capítulo se exponen las conclusiones que resumen los resultados obtenidos en las pruebas realizadas luego de su análisis para darle respuesta a los objetivos que enmarcan esta investigación.

CAPÍTULO 1. - ÉL PROBLEMA

1.1 Planteamiento del problema

Mecánica de contacto es el área de conocimiento que estudia la interacción entre dos superficies cuando estas se tocan, así como las solicitaciones presentes en él. El fenómeno ha sido estudiado en distintos ámbitos tales como: la adhesión entre las caras, la transferencia térmica entre cuerpos y los efectos de la lubricación en la superficie mencionados por Popov (2010), pero en particular, el contacto mecánico rueda-riel.

Desde los aportes de Hertz (1896), se han determinado diferentes modelos para identificar tanto los esfuerzos como las características que inciden en el momento y lugar del contacto. La mecánica de contacto rueda-riel es punto de estudio para la tracción de los trenes, los desgastes tanto de la rueda como el riel y los fenómenos vibratorios generados por la rugosidad de la superficie; la precisión de los modelos de contacto rueda-riel aporta la información necesaria para mejorar el entendimiento de esos puntos de estudio.

En Caracas, los sistemas ferroviarios como el Metro de Caracas y el Instituto de Ferrocarriles del Estado son de importancia, dado que de ellos depende la movilización de la mayoría de sus habitantes. El Metro de Caracas provee servicio de transporte a más de un millón de usuarios, siendo en la actualidad la base del transporte de personas en toda la ciudad. El conocimiento sobre el estado del contacto mecánico permitirá tener un mejor entendimiento de las variables que inciden en el comportamiento ferroviario, pudiendo ser utilizadas en la prevención de la incidencia al desgaste por deslizamiento.

Conscientes de la importancia de la dinámica ferroviaria, el Metro de Caracas realizó pruebas a través de asesoramiento externo de la empresa Transportation Technology Center, Inc (TTCI). Como parte de la contratación se manejó la compra de un conjunto de equipos denominados "Ejes Instrumentados" que consisten en un eje cuyas ruedas fueron modificadas para determinación de las cargas verticales, laterales y longitudinales sobre la superficie de la rueda.

Metro de Caracas C.A. conjuntamente con Transportation Technology Center, Inc (TTCI) obtuvieron una serie de resultados que identificaron focos para la mejora de la prestación del servicio, sin embargo el estudio no tuvo como enfoque principal el comportamiento del contacto rueda-riel. No obstante se recogieron una extensa serie de datos con referencia a las variables que participan en el contacto mecánico (las cargas presentes sobre la superficie de la rueda y la velocidad angular de la rueda).

Este trabajo recogió los modelos de contacto mecánico rueda-riel utilizados en el análisis de la dinámica ferroviaria - en este caso los modelos de Kalker (1971), Shen et al c.p. Kalker (1991) y Polach (1999) - e incorpora la propuesta de un modelo que considera el comportamiento elástico del contacto rueda riel en función a la rugosidad de la superficie, elaborado por el tutor y autor de este trabajo. Las consideraciones que se tomen en cuenta de cada modelo permitirá consolidar un instrumento de evaluación aplicable para el testeo del contacto rueda-riel en el sistema de Metro de Caracas.

Desde este enfoque, se plantearon los siguientes interrogantes, los cuales orientaron el desarrollo de la presente investigación:

- ¿Qué condiciones influyen en la dinámica del contacto rueda riel?
- Basándose en los modelos de contacto rueda riel, ¿qué características presentes en los modelos de Kalker (1971), Shen et al c.p. Kalker (1991)

y Polach (1999) y el modelo propuesto de comportamiento elástico en la superficie rugosa, definen en mejor medida los resultados obtenidos en pruebas en vía?

- ¿Pueden ser utilizados los ejes instrumentados para el estudio del contacto rueda-riel?

En síntesis, la investigación se centró en la elaboración de un instrumento de evaluación de contacto rueda-riel, identificando características en la interacción entre estas dos superficies y sus características geométricas, elásticas, el grado de rugosidad en la superficie y principalmente los efectos del deslizamiento descritos en los modelos de contactos rueda-riel.

1.2 Objetivo General

Analizar el comportamiento del contacto rueda-riel mediante la comparación de los resultados obtenidos por Metro de Caracas contra un conjunto de modelos de fuga y de estimación de cargas tangenciales, que evalúe las condiciones de contacto en segmento de vía férrea.

1.3 Objetivos Específicos

- Elaborar una clasificación dada por la geometría del perfil de la rueda y el riel, en donde se establezcan los parámetros descritos por Hertz (1896) para la identificación del área de contacto.
- Diseñar un método para relacionar las cargas verticales y laterales y el punto de contacto respecto al perfil de la rueda, considerando las deformaciones registradas por las galgas extensiométricas de los ejes instrumentados de Metro de Caracas C.A.
- Determinar las características y el comportamiento de los modelos de Kalker (1971), Shen et al c.p. Kalker (1991) y Polach (1999) en la

dinámica ferroviaria y modelar su uso para análisis de contacto rueda-riel.

- Comparar los resultados obtenidos mediante uso de los ejes instrumentados en pruebas de segmento de vía con el instrumento de estudio del contacto rueda-riel basado en los modelos de Kalker (1971), Shen et al c.p. Kalker (1991) y Polach (1999).

1.4 Justificación

La interacción rueda riel es estudiada en el ámbito de las vibraciones ocasionadas por la rugosidad, la eficiencia en la tracción del sistema y la influencia de los deslizamientos en la dinámica de los trenes como lo definen Shabanna et al (2008) e Iwnicki (2006). En principio, la interfaz contacto rueda riel es considerada como un comportamiento de fricción simple debido al alto nivel de seguridad que posee; no obstante, desde el punto de vista ingenieril, es más complejo si se toma en cuenta la red de causas y efectos ferroviarios ya que se trata de un vínculo imperfecto como lo describe Iwnicki (2006).

Si bien el uso del elemento finito ha demostrado ser un recurso eficiente para la determinación de las cargas en el punto y momento del contacto, al igual que la distribución de presiones normales y tangenciales, a nivel de tiempo de cálculo y precisión considerable, los modelos numéricos sustituyen al elemento finito a la hora de realizar simulaciones de grandes tramos ferroviarios como lo mencionan Vollebregt et al (2011) y Kalker (1991).

La proyección de utilidad del trabajo es la elaboración de un instrumento de evaluación para el contacto rueda riel en el sistema de ferrocarriles de Venezuela (en particular el Metro de Caracas C.A.), identificando patrones que participan en el contacto rueda-riel con la finalidad de reducir aquellos que actúan de manera negativa en el vínculo rueda-riel, como por ejemplo el deslizamiento en determinados segmentos de vía.

Así mismo, ofrecerá al Metro de Caracas C.A. la posibilidad de incorporar a los ejes instrumentados como parte de un esquema de mantenimiento vial ferroviario, localizando los puntos de la vía cuyo comportamiento en la interfaz rueda-riel actúe de manera no deseada.

Este estudio aportará significativas herramientas de análisis ferroviario al Metro de Caracas C.A. a través de un mejor entendimiento del comportamiento en el vínculo entre la rueda y el riel.

1.5 Limitaciones y alcances

En este trabajo se tomaron en consideración las siguientes limitaciones y alcances:

- El comportamiento del contacto rueda-riel en el arranque y frenado no es tomado en cuenta; Kalker (2000) establece que en estas circunstancias aparece un fenómeno denominado Cattaneo, él puede ser omitido si no existe tracción inducida al eje, por lo que en las pruebas realizadas no se utilizó ningún tipo de elemento motriz, o de frenado regenerativo o mecánico.
- Se realizaron tres (3) pruebas en vías durante las actividades de este estudio; sin embargo los resultados utilizados en este trabajo se centraron en las muestras obtenidas por la empresa Transportation Technology Center, Inc (TTCI); esto motivado a que en las dos primeras pruebas no se pudo obtener información legible para su análisis y en la tercera prueba no se contó con la totalidad de las capacidades operativas del sistema de adquisición de datos.
- Las pruebas se realizaron con vagones vacíos sin mayor carga que la propia del vagón y del bogie.

El fenómeno de contacto rueda-riel, es investigado ampliamente en el desarrollo y optimización de simuladores ferroviarios, Con este trabajo de investigación se buscó lograr la correlación entre los modelos de contacto rueda-riel implementados en simulaciones para el análisis del fenómeno en la realidad a fin de permitir la generación de criterios para el análisis de segmentos de vía férrea.

CAPÍTULO 2. - MARCO REFERENCIAL

Este capítulo provee la evolución histórica del estudio del fenómeno de deslizamiento en el contacto mecánico entre las superficies de la rueda y el riel bajo rodadura que permitió interpretar los resultados obtenidos de este trabajo. Así mismo, describe los antecedentes del problema en el contexto de las investigaciones realizadas en los tópicos del contacto mecánico y la rugosidad y los trabajos realizados en la compañía Metro de Caracas C.A.

2.1 Antecedentes de la investigación

El conocimiento del contacto mecánico rueda-riel y de la rugosidad de las superficies desarrollados por Kalker (1982) y Greenwood et al (1966), se engloban dentro de los parámetros del contacto mecánico, sin embargo presentan condiciones distintas: El contacto rueda-riel estudia los esfuerzos provocados por el contacto entre las superficies, con magnitudes que rozan la barrera elástico-plástico, mientras que la rugosidad es estudiada por sus efectos vibratorios y de ruido a causa de las irregularidades de la superficie.

Los antecedentes de este proyecto se constituyen en los trabajos realizados por la empresa Corporación del Centro Tecnológico de Transporte (Transportation Technology Center, Inc. o sus siglas en inglés TTCI) en Metro de Caracas C.A documentado por Maal (2000) sobre el comportamiento en la dinámica ferroviaria en la Línea 1. Así mismo se incluyen las investigaciones realizadas referidas a la interacción de las irregularidades en la superficie de los cuerpos con el fenómeno de deslizamiento en el contacto rueda y riel y desarrollo continuo al algoritmo de FASTSIM de Kalker (1982), mejorado por Vollebregt et al (2011) como FASTSIM2.

2.1.1 Trabajos realizados por la empresa Metro de Caracas

De acuerdo a Maal (2000), en el año 1999, la compañía Metro de Caracas C.A. realizó investigaciones para determinar las condiciones del comportamiento dinámico del sistema ferroviario con la finalidad de mejorar las condiciones del servicio, tanto en el ámbito estructural como en el confort para los usuarios. Para ello, Metro de Caracas solicitó el asesoramiento de la Corporación del Centro Tecnológico de Transporte (Transportation Technology Center, Inc. o sus siglas en inglés TTCI) González (2001), mediante un convenio, que no solo implicaba la contratación de los servicios de TTCI para la realización de pruebas experimentales, sino además, la compra de la instrumentación utilizada en las pruebas.

Las pruebas realizadas por Transportation Technology Center, Inc (TTCI), consistieron en la evaluación de la dinámica del bogie y de los componentes motrices del que está compuesto (motor, caja de engranajes, chasis) y la dinámica del vagón y el tiempo estimado de vida del bogie sometido a cargas alternantes.

Maal (2000) refiere que durante las pruebas ferroviarias se utilizó una serie de instrumentos de medición conformados por acelerómetros, manómetros y sensores de posición para interpretar el comportamiento vibratorio de los distintos componentes del bogie. Adicionalmente se incorporó a la instrumentación, un bogie de Metro de Caracas C.A. cuyas ruedas fueron modificadas con un juego de galgas extensiométricas para la detección de las cargas verticales, laterales y longitudinales en la superficie de la rueda; (adicionalmente se incluyó una serie de galgas para la determinación de la posición del punto de contacto.

Pese a que el uso de ejes instrumentados fue destinado a la evaluación del comportamiento vibratorio de los componentes motrices y del bogie, la empresa

Transportation Technology Center, Inc (TTCI) comparó los resultados obtenidos con simulaciones realizadas mediante el software NUCARS (software creado por la Transportation Technology Center, Inc (TTCI) para la simulación de la dinámica multicuerpo de vehículos). NUCARS, incluye dentro de sus rutinas de operación, la simulación del contacto rueda riel para las cargas laterales, longitudinales de acuerdo al comportamiento del eje.

En los informes presentados por la Transportation Technology Center, Inc (TTCI) a la empresa Metro de Caracas, elaborados por Maal (2000), el comportamiento del deslizamiento en la superficie de la rueda no fue punto de interés para el análisis de la dinámica ferroviaria. No obstante los informes entregados por Transportation Technology Center, Inc (2001) incluyen descripciones sobre el uso, construcción de la instrumentación utilizada y la logística emprendida por la empresa para la recolección de datos, además de los datos mismos obtenidos en pruebas en vía que fueron utilizados para la elaboración del instrumento.

2.1.2 Simulación del Contacto Rueda-Riel

Sobre la dinámica de los sistemas ferroviarios, Kalker (1991) indica que existen numerosos algoritmos para el cálculo de las cargas tangenciales. El más utilizado comercialmente es la teoría lineal del contacto rueda-riel, propuesta por Kalker (1971), luego el modelo de Shen-Hedrick-Elkins para deslizamientos no lineales mencionado por Kalker (1991) y Pombo et al (2008) y el modelo de Polach (1999).

Para la simulación del contacto rueda riel, es necesario conocer con precisión el punto de contacto, el cual resulta complejo debido al perfil geométrico de la rueda y el riel y al movimiento propio de los componentes del vehículo. Es por ello, que fue necesario establecer un modelo para determinar el punto de contacto introduciendo los parámetros geométricos de la vía. Además

el modelo definido por Pombo et al (2008) predice cuando existen dos puntos de contactos simultáneos en una misma rueda.

Las conclusiones obtenidas por Pombo et al (2008) establecen que ante grandes curvaturas, el modelo de Kalker no es viable debido a que las cargas tangenciales se aproximan al límite de la fricción propuesto por Coloumb. El modelo de Shen et al da resultados pocos precisos cuando existen cambios de concavidad en puntos de la rueda cuya geometría posee grandes diferencias, dejando el modelo de Polach (1999) como el modelo que mejor aceptación tiene con bajos radios de curvatura.

Pese a las conclusiones de Pombo et al (2008), el modelo Kalker es efectivo para tramos longitudinales o de curvaturas suaves, siendo óptimo para trenes de alta velocidad o cuya geometría así lo sugiere. En este caso Vollebregt et al (2011) continúan las investigaciones de Kalker (1982) para obtener una respuesta al problema de contacto mecánico con mayor aproximación a los valores teóricos.

La base del algoritmo de Kalker en FASTSIM utiliza métodos de primer orden para solucionar ecuaciones diferenciales y determinar el comportamiento del contacto mecánico a cargas tangenciales dentro de la zona de adhesión. Vollebregt et al (2011) propone un algoritmo distinto utilizando métodos de segundo orden, al cual denomina 'FASTSIM2'.

El contacto rueda riel, dado por las cargas tangenciales, se centra principalmente en distinguir el deslizamiento rígido del deslizamiento elástico. Esta interacción se hace presente en la dinámica provocada por el roce, tal como es mencionada por Coulomb: directamente proporcional a la compresión que se aplica en la superficie. Considerando que el modelo de Hertz (1896) establece el perfil de presiones normales, se puede obtener entonces los límites de las cargas tangenciales dentro del rango de adhesión denominado como de saturación.

El principio de Kalker (1982) se define por la deformación normal de la superficie en la dirección de traslación; la diferencia entre el deslizamiento rígido $s(x)$ y el deslizamiento elástico $w(x)$ es por tanto la deformación normal du_x/dx , tal como se define en la ecuación (1):

$$\frac{d u_x}{d x}=w(x)-s(x) \quad (1)$$

El método de Euler original propuesto por Kalker (1982) es utilizado en FASTSIM, define con gran precisión el deslizamiento elástico, sin embargo la definición del área de adhesión no es del todo precisa según lo define Vollebregt et al (2011) y tiene cierto grado de error como se observa en la Figura 1 donde se muestra la diferencia entre los resultados obtenidos por el método de Euler y un método trapezoidal, utilizado en FASTSIM2 para solucionar la ecuación diferencial de contacto rueda-riel (1).

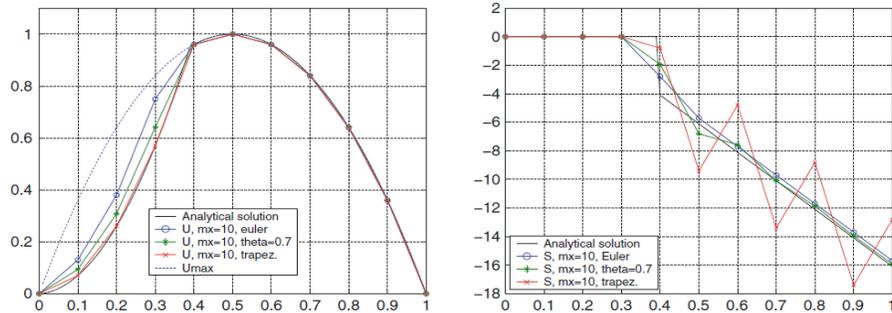


Figura 1: Diferencias entre el método analítico, método euler implementado por Kalker (1982) y el método trapezoidal implementado en FASTSIM2 por Vollebregt et al (2011).

FASTSIM2 sigue el siguiente algoritmo para resolver la ecuación diferencial (1) a partir de la solución (2) dada por Vollebregt et al (2011):

$$u_i=u_{i-1}+\frac{\delta x}{2}\left(s_i+s_{i-1}\right)-\frac{\delta x}{2}\left(w_i+w_{i-1}\right) \quad (2)$$

El algoritmo FASTSIM2 considera que la relación entre los esfuerzos tangenciales τ y el desplazamiento u en la superficie viene dada por una constante elástica L propuesta por Kalker (1971):

$$\tau_i = L^{-1} u_i \quad (3)$$

- Inicialmente se asume que tanto los esfuerzos tangenciales y los desplazamientos nulos ($\tau_o=0$ y $u_o=0$) en el borde de la superficie de contacto, en la dirección del movimiento, se estima $s_o = (|w_o| - L \mu Pn) w_o / |w_o|$. Donde μ y Pn son el coeficiente de roce y la presión normal sobre la superficie.
- Para cada valor de x_i se calcula previamente los valores de desplazamiento y esfuerzo tangencial suponiendo que se encuentra en adhesión (u_i^{adh} y τ_i^{adh}) y considerando el deslizamiento elástico ($s_i=0$).
- Donde la presión tangencial en adhesión es menor al domo de saturación $\tau_i^{adh} < \mu Pn$, se confirma que el deslizamiento elástico es igual a cero $s_i=0$ y por lo tanto $u_i^{adh} = u_i$ y $\tau_i^{adh} = \tau_i$.
- Si la presión tangencial en adhesión es mayor al domo de saturación $\tau_i^{adh} > \mu Pn$, entonces la presión tangencial real es igual al domo de saturación $\tau_i = \mu Pn (\tau_i^{adh} / |\tau_i^{adh}|)$ y se deduce el desplazamiento tangencial u_i , y el desplazamiento elástico como: $s_i = 2(u_i - u_i^{adh}) / \delta x$. Y se repite el proceso para $i+1$.

El algoritmo elaborado por Vollebregt et al (2011), FASTSIM2 se implementó para evaluar problemas de contacto mecánico rueda-riel a fin de mejorar la propuesta original FASTSIM y el modelo CONTACT. Los resultados fueron descritos por el autor como certeros al evaluar una superficie

subdividida en 100 segmentos por diferencias finitas y mejorando en la medida que se incrementa las subdivisiones en la superficie. FASTSIM2 en las pruebas realizadas supera en mejor medida la precisión de FASTSIM al comparar en cada simulación con CONTACT.

2.1.3 Contacto rueda-riel y las irregularidades en la superficie de contacto.

Los modelos de contacto rueda riel parten de la consideración de que ambas superficies son lisas, existiendo entre ellas únicamente un fenómeno denominado fricción. Considerando que la superficie real de ambos cuerpos, está constituido por una superficie irregular, Kalker (1990) planteó la modificación del algoritmo de contacto rueda-riel "CONTACT" con la finalidad de incluir las irregularidades de la superficie y su interacción en la distribución de presión tangencial de la misma.

Los trabajos realizados por Greenwood et al (1966) establecieron la diferencia entre el área real y el área nominal de contacto, siendo el área real menor a la nominal e incrementando la presión normal sobre la superficie. Kalker (1990) propuso estudiar el área real de contacto mediante la utilización de modelo CONTACT para identificar el área de contacto, y mediante la simulación de un contacto elástico sin fricción en una superficie rugosa.

Se establece las características de aleatoriedad de una superficie rugosa mediante un modelo que realiza esta tarea logrando un plano ondular descrito por Johnson (1987). Esto se logra considerando las alturas de las superficies como:

$$Z_{(x,y)} = \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N a_{mn} y^{m+n-1} \cos\left(\frac{2\pi mx}{lx} + \varphi_{mn}\right) \cos\left(\frac{2\pi ny}{ly} + \theta_{mn}\right) \quad (4)$$

Donde:

- a_{mn} : corresponde a una amplitud aleatoria para distintos valores de m y n $[0,A]$.
- φ_{mn} y θ_{mn} : son valores aleatorios entre $[0,2\pi]$ de fase de la ondulación de la irregularidad.
- Y : es un factor que atenúa las rugosidades en la superficie con rango $[0,1]$.
- M y N : indica el número de irregularidades en la superficie.
- lx y ly : establece la longitud de la superficie de estudio.

A partir de la altura de las irregularidades, se procesa el promedio cuadrado de las alturas R_q^2 mismas, valor que viene representado como la desviación estándar de las irregularidades, $\sigma = \sqrt{R_q^2}$. Este valor al tratarse de una constante en la superficie, los valores de fase de la ondulación φ_{mn} y θ_{mn} no son tomados en cuenta, dando como resultado:

$$R_q^2 = \frac{1}{4} \cdot \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N a_{mn} y^{2m+2n-4} \quad (5)$$

Al realizar la tarea de cómputo, se observó que el área de contacto obtenida mediante la inclusión de las irregularidades de la superficie variaban según la desviación estándar de la altura de las rugosidades; para una desviación estándar igual a 0, la superficie se considera lisa, obteniendo un área de contacto real cercana al área de contacto nominal. Su geometría no se ve afectada por la aleatoriedad de la superficie, manteniendo una forma circular. En la medida que se incrementa la desviación de las irregularidades, se observa como disminuye la superficie de contacto y a su vez, la geometría del punto de contacto se vuelve más abstracta y aleatoria.

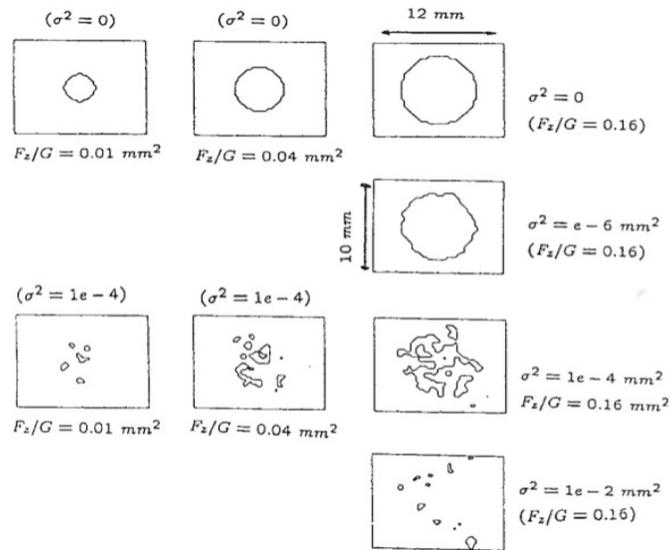


Figura 2: Comparación obtenida por Kalker (1990) de la variación del área de contacto respecto a la altura de las irregularidades y a la dispersión de los mismos.

En lo que respecta a la tracción, Kalker (1990) simuló la distribución de presiones tangenciales para el caso de dos cilindros en contacto, a los cuales se aplica torque para el análisis del comportamiento tangencial de la superficie rugosa. Se simularon dos casos, el primero consistió en una superficie lisa con fricción mientras que la segunda, una superficie rugosa sin fricción con una desviación estándar de las irregularidades igual a 0.1.

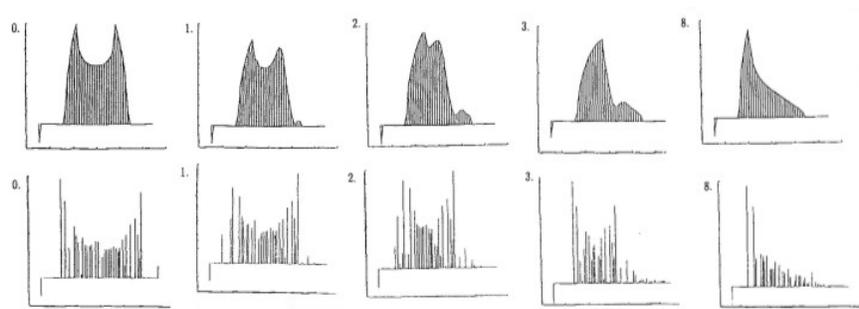


Figura 3: Evolución transitoria de la distribución de la presión tangencial en el fenómeno de Cattaneo, Kalker (1990). En la gráfica superior se considera la superficie lisa bajo el fenómeno de fricción mientras que en la gráfica inferior se considera la superficie rugosa sin fricción.

Al evaluar las consideraciones de rugosidad frente a la fricción, Kalker se obtuvo como resultado que las observaciones realizadas, pese a la existencia de concentraciones de presión más altas, fueron similares en ambos casos. Para los casos estáticos y casi-estáticos se obtuvo una distribución de presión tangencial cercana tanto en superficie lisa como en rugosa. No obstante, aunque en menor medida, se observaron diferencias en el comportamiento de la distribución de presión tangencial, principalmente motivado a la no homogeneidad de la superficie rugosa.

Kalker (1990) concluye que se obtuvo una aproximación a la simulación de una superficie rugosa en dos dimensiones con contacto elástico. En el procedimiento utilizado en CONTACT para la determinación de la distribución normal, se pudo modificar la geometría de la superficie con la finalidad de incluir las irregularidades. En lo que respecta a la distribución de la presión tangencial, se remarcó el hecho de que una superficie ondulatoria corresponde a un modelo de aproximación a las irregularidades de la superficie pero esto no implica que afecta el deslizamiento.

Considerando los estudios de Kalker (1990), el autor de este trabajo de grado en conjunto con el tutor, Limongi y Gómez (2011), elaboraron una

propuesta de un modelo del comportamiento elástico del contacto rueda riel en función a la rugosidad de la superficie. Este modelo plantea la modificación del límite de la distribución de la presión tangencial propuesta por Kalker (1971), por un domo de saturación, que aborde el comportamiento elástico de las irregularidades de la superficie.

En principio, los modelos de contacto rueda-riel presentados por Kalker (1971) y Carter (1926), establecen que ambas superficies son lisas, existiendo entre las superficies de contacto un fenómeno denominado fricción que limita la presión tangencial máxima de los cuerpos en contacto. No obstante, el coeficiente de fricción es una aproximación a la adhesión, a la rugosidad y la elasticidad en la superficie, y que en conjunto ejercen un fenómeno de contraposición al movimiento.

Los planteamientos de Limongi y Gómez (2011) consisten en tratar a los cuerpos en contacto como elásticos y de geometría irregular en la superficie que fue presentado en el VI Conferencia Internacional del Aprovechamiento de los Recursos Minerales (CINAREM 2011). Estas irregularidades poseen comportamiento elástico de tres (3) dimensiones la cual es modelada como una serie de vigas empotradas, donde la carga axial y la flexión son los componentes que determinan las presiones normales y tangenciales del modelo.

Sea una viga elástica, que representa una irregularidad en la superficie de contacto, con forma cilindra y empotrada, de altura promedio Ra y módulo elástico E' sometida a una presión normal $Pn' = Pn/Yc$ donde Pn' es la presión normal real en la viga, Yc un factor de proporcionalidad entre el área transversal de viga contra el área del contorno y Pn la presión normal ejercida entre ambas superficies superponiéndolas lisas. Por lo que el desplazamiento de la viga, homogeneizado en un punto (x,y) de la superficie viene dado por Δh .

$$\Delta h \approx Ra \cdot (\varepsilon_z) = Ra \cdot \left(\frac{\sigma_z}{E} \right) \approx Ra \cdot \left(\frac{P_N(x, y)}{Y_C \cdot E'} \right) \quad (6)$$

Deformada la superficie que representa las irregularidades, se calcula entonces el límite de la presión tangencial sobre la superficie de contacto. Para ello la viga elástica es sometida a una carga paralela a la superficie correspondiente a las cargas tangenciales entre las superficies de contacto.

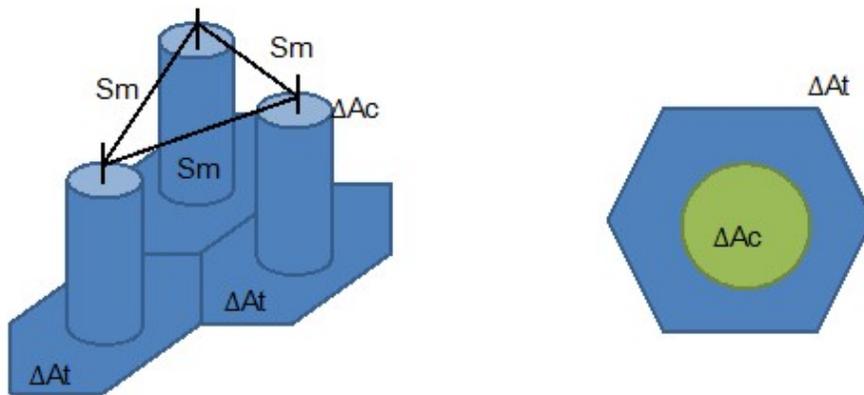


Figura 4: Discretación de la superficie rugosa, Limongi y Gómez (2011), considerando las irregularidades como vigas cilíndricas separadas entre si a una distancia S_m , la cara que hace contacto definida como A_c mientras que el área de disipación de la presión A_t .

Para ello se asume una distribución hexagonal de las irregularidades, asegurando que se encuentren equidistantes entre si, cuya área infinitesimal viene dada por $\Delta A_T = \sqrt{3} S_m^2 / 2$ y el área transversal del cilindro viene dada por el radio de la sección cilíndrica R_c al igual que en su forma proporcional mediante el factor de proporcionalidad Y_C dando como resultado que el área de la sección cilíndrica viene dado por $\Delta A_T = \pi R_c^2 = Y_C \cdot \sqrt{3} S_m^2 / 2$.

Considerando la relación entre el segmento de área lisa contra el área transversal de la sección cilindra, se deduce la relación entre la distancia de las irregularidades y el radio de la superficie irregular.

$$Rc = Sm \cdot \sqrt{Y_C \cdot \frac{\sqrt{3}}{2 \cdot \pi}} \quad (7)$$

Conociendo el radio de la superficie cilindra de las irregularidades, se puede estimar de igual manera la inercia de las mismas.

$$Ic = \frac{1}{4} \cdot \pi \cdot Rc^4 = \frac{3}{16\pi} Sm^4 \cdot Y_C^2 \quad (8)$$

Es entonces cuando se superpone una carga tangencial $\Delta F_T = P_T \Delta A_T$ en el punto medio de la viga elástica deformada normalmente, de longitud $hf = Ra - \Delta h$ para modelar la deflexión de la viga.

$$\frac{d^2 w}{dx^2} = \frac{M}{Ic \cdot E} = \frac{3 \cdot F_T \cdot \Delta A_T (0,5 \cdot hf - x)}{16 \pi \cdot Sm^4 Y_C^2 E} \quad (9)$$

Lo que da lugar a deflexión en función de la presión tangencial como:

$$\frac{d^2 w}{dx^2} = \frac{\pi 8}{\sqrt{3}} \frac{P_T (0,5 \cdot hf - x)}{Sm^2 Y_C^2 E} \quad (10)$$

Al integrar la deflexión de la viga elástica, se obtiene la pendiente de la misma, así mismo al evaluarla en el punto de aplicación de la carga $hf/2$ se obtiene entonces la pendiente de inclinación en el punto de contacto.

$$\theta = \frac{\pi}{\sqrt{3}} \frac{P_T \cdot hf^2}{Sm^2 Y_C^2 E} \quad (11)$$

Siendo la viga lisa, en toda su superficie, el punto de deslizamiento se logra una vez que la relación entre la carga normal y la carga tangencial alcancen un punto tal que la viga se incline, permitiendo que la viga superior se traslade fuera del punto de estabilidad. Es entonces cuando se relaciona un límite en la presión tangencial de un punto al cual se define como límite de saturación.

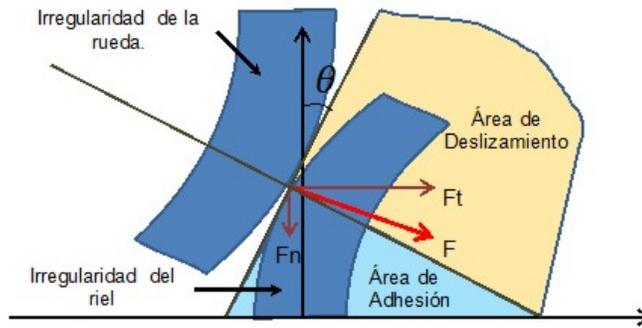


Figura 5: Vista del contacto entre las irregularidades rueda y riel, Limongi y Gómez (2011). El deslizamiento ocurre cuando la dirección de la fuerza de contacto F es superior a la normal del ángulo de contacto.

Por lo tanto la relación entre la carga normal y la carga tangencial viene dada por:

$$\frac{\Delta F_N}{\Delta F_T} \approx \frac{P_N}{P_T} \geq \theta = \frac{\pi}{\sqrt{3}} \cdot \frac{P_T h f^2}{S m^2 Y c^2 \cdot E} \quad (12)$$

Finalmente, el domo de saturación o límite de presión tangencial, se obtiene deduciendo la presión tangencial P_T de la relación entre la carga normal y tangencial:

$$P_T \leq \sqrt{P_N \cdot \frac{\sqrt{3}}{\pi} \cdot \frac{S m^2 \cdot Y c^2 \cdot E}{h f^2}} \quad (13)$$

No obstante, como la altura de las irregularidades se ve influenciada por la compresión, el término hf cambia a lo largo de la superficie y este cambio es proporcional a la presión normal en la superficie, por lo que el domo de saturación se expresa como:

$$P_T \leq \sqrt{\frac{P_N}{(Y_C \cdot E - P_N)^2} \cdot \frac{\sqrt{3}}{\pi} \cdot \frac{Sm^2 \cdot Y_C^4 \cdot E^3}{Ra^2}} \quad (14)$$

Al comparar la propuesta del modelo de contacto rueda riel considerando el comportamiento elástico de las rugosidades, respecto a los modelos de contacto rueda-riel propuestos por Carter (1926), Kalker (1982) y Polach (1999), e mantiene el comportamiento exponencial acotándose al límite del valor teórico de coulomb.

El algoritmo planteado por Limongi y Gómez (2011), permite determinar la carga máxima tangencial de contacto rueda riel, esta utilidad permite que la integración del domo de saturación pueda ser utilizada en conjunto con el modelo de Polach o modelos que relacionen directamente el deslizamiento con las cargas tangenciales. Así mismo, puede ser utilizado para la determinación del coeficiente de roce aproximado.

2.2 Fundamentos Teóricos

En la teoría de la elasticidad de los materiales, las deformaciones son producto de la interacción de fuerzas con el cuerpo, tanto en su superficie como dentro de su volumen. Así lo define Hertz (1896) para introducir la mecánica de contacto al estudio de la teoría de cuerpos elásticos.

2.2.1 Contacto mecánico hertziano

El modelo de Hertz (1896) tuvo dos objetivos: determinar una distribución de presión que se aproximara al contacto real entre ambas superficies y el dimensionamiento de esta distribución. Para cumplir estos objetivos, Hertz modela las superficies de contacto en función de las curvaturas y la profundidad de las mismas, como se observa en la Figura 6:

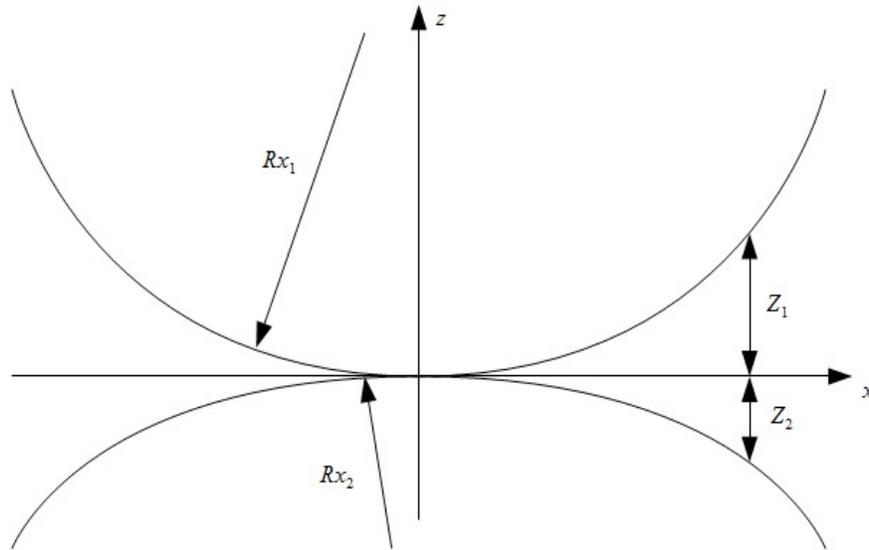


Figura 6: Superficies con curvatura donde el contacto se inicia en el centro de coordenadas.

Estas superficies pueden ser descritas considerando los radios de curvatura R_x y R_y de cada cuerpo $i=1,2$:

$$A_i = \frac{1}{2R_{x_i}} \quad ; \quad B_i = \frac{1}{2R_{y_i}} \quad (15)$$

Por lo tanto se puede describir una superficie en coordenadas x,y como:

$$Z_i = A_{ix}^2 + B_{ix}^2 \quad (16)$$

De modo que la distancia entre dos puntos cuando el contacto entre las dos superficies se da en un punto $z=0$.

$$Z_1 - Z_2 = Ax^2 - By^2 \quad (17)$$

Donde los términos A y B son constantes basadas en las curvaturas de ambas superficies $A=1/R_{x1}+1/R_{x2}$ y $B=1/R_{y1}+1/R_{y2}$. Y Z_1 y Z_2 la profundidad de penetración entre el plano de contacto y la superficie.

Al tratarse de dos cuerpos elásticos, la elasticidad de ambas superficies permite una deformación normal al plano de contacto, de modo que ambas superficies forman una superficie plana de contacto:

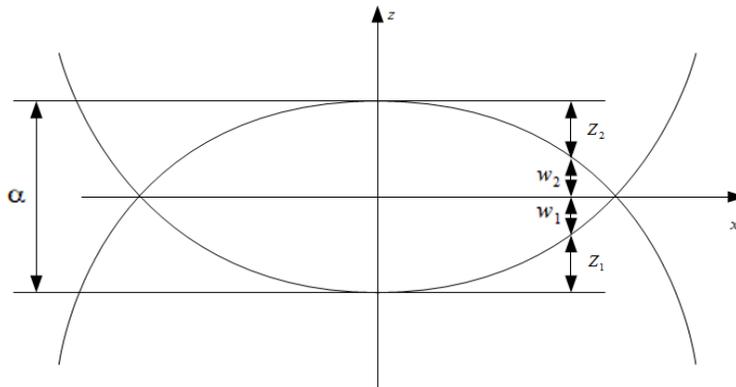


Figura 7: Superficies interceptadas, donde el plano de contacto es representado por $z = 0$ y el desplazamiento de un punto respecto a la dirección normal w_1 y w_2 .

La distancia entre los puntos de máxima curvatura α viene dado por la suma de la distancia de la profundidad de penetración Z_i y la compresión de las superficies de ambos cuerpos w_i :

$$Z_1 + Z_2 + w_1 + w_2 = \alpha \quad (18)$$

Tal como se visualiza en la Figura 7, α es la deformación máxima en la dirección normal, w_1 y w_2 la deformación a lo largo del eje z en un punto de coordenadas (x, y) .

La solución planteada por Lamor c.p. Timoshenko (1970) para el desplazamiento radial de partículas en una superficie a una distancia r cuando se aplica una carga puntual P sobre un plano cuyo espacio inferior es elástico, y cuyas propiedades elásticas son definidas por el módulo de Young E y el módulo de Poisson ν , se puede definir como:

$$w = \frac{P \cdot (1 - \nu^2)}{\pi \cdot E \cdot r} \quad (19)$$

Al evaluar el desplazamiento de una partícula ubicada en el centro de aplicación de la carga en una superficie ($r=0$), tanto los esfuerzos como los desplazamientos son infinitos. Se puede evitar esta discontinuidad, considerando P como una carga distribuida a lo largo de un radio pequeño r de modo que el término P/r se reduce a q como la distribución radial de cargas, tal como lo expresa Timoshenko (1970). Esta interpretación permite expresar el desplazamiento normal de una partícula (w) para el contacto mecánico como:

$$w = \frac{(1 - \nu^2)}{\pi \cdot E} \int_A q \, ds \, d\psi \quad (20)$$

Para simplificar el desplazamiento de una partícula expresada en forma integral (20) se plantea una constante de compresión que viene dada por:

$$k = \frac{(1 - \nu^2)}{\pi \cdot E} \quad (21)$$

La forma analítica de intersección entre dos superficies (18) puede ser expresada como la suma de las integrales del desplazamiento normal de una

partícula (w) en función del desplazamiento de partículas en la dirección normal (20), obteniendo:

$$(k_1+k_2) \int q ds d \psi = \alpha - A_x^2 - B_y^2 \quad (22)$$

Para poder resolver la integral del desplazamiento de partículas en la superficie (22) se estudia el contacto para superficies cuyas curvaturas son proporcionales $R_{x_1}=R_{y_1}$ y $R_{x_2}=R_{y_2}$ entre si, permitiendo definir la geometría de las superficies en coordenadas cilíndricas, de modo que $A=B=\beta$ y se plantea la forma analítica de los cuerpos interceptados (22) en coordenadas cilíndricas.

$$(k_1+k_2) \int q ds d \psi = \alpha - \beta r^2 \quad (23)$$

Para la distribución de cargas q que satisfaga la integral de los desplazamientos en la dirección normal (23) se puede establecer que la presión máxima es proporcional al radio máximo de la superficie de contacto, $k=q_o/R_{max}$ donde q_o es la presión máxima y R_{max} el radio máximo de zona de contacto. Obteniendo una solución para la primera integral de los desplazamientos de las partículas en la superficie.

$$(k_1+k_2) \int \frac{q_o}{a} \pi (R_{max}^2 - r^2 \cdot \sin^2(\psi)) d \psi = \alpha - \beta r^2 \quad (24)$$

La solución de la ecuación (24) es finalmente:

$$(k_1+k_2) \frac{q_o \pi^2}{4R_{max}} (2R_{max}^2 - r^2) d \psi = \alpha - \beta r^2 \quad (25)$$

Esta solución permite obtener los valores de α y R_{max} de acuerdo a la proporción de ambos términos con el lado opuesto de la ecuación, obteniendo finalmente:

$$\alpha = (k_1 + k_2) \frac{q_o}{2} \pi^2 R_{max} \quad (26)$$

$$R_{max} = (k_1 + k_2) \frac{q_o}{4\beta} \pi^2$$

Recordando que la presión máxima en el centro de coordenadas es q_o y que la distribución de presión q se expresa como una semiesfera, cuyo volumen representa el total de la fuerza o carga aplicada:

$$P = \frac{1}{2} \left(\frac{4}{3} \pi a^2 \frac{q_o}{a} a \right) = \frac{2}{3} \pi a^2 q_o \quad (27)$$

De este modo se obtiene que el radio máximo de contacto R_{max} y la suma de los desplazamientos de ambos cuerpos α en el origen de coordenadas está definido por:

$$R_{max} = \sqrt[3]{\frac{3\pi}{8} \frac{P(k_1 + k_2)}{\beta}} \quad (28)$$

$$\alpha = \sqrt[3]{\frac{9\pi^2}{8} P^2 (k_1 + k_2) \beta} \quad (29)$$

Cuando las curvaturas de los cuerpos son distintas con respecto a los ejes de coordenadas ($R_{xi} \neq R_{yi}$), la sumatoria de las curvaturas principales (β) se expresa como la suma de todas las curvaturas:

$$\beta = A + B = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{R_{x_1}} + \frac{1}{R_{x_2}} + \frac{1}{R_{y_1}} + \frac{1}{R_{y_2}} \right) \quad (30)$$

Para los casos en que las dos superficies no poseen radios de curvaturas semejantes ($R_{xi} \neq R_{yi}$) el radio máximo propuesto no es viable, ya que la forma del área de contacto mecánico tiende a ser similar a la de una elipse con diámetros principales a y b como se ve en la Figura 8. La magnitud del radio máximo, se define como un radio promedio denominado radio primitivo r_m .

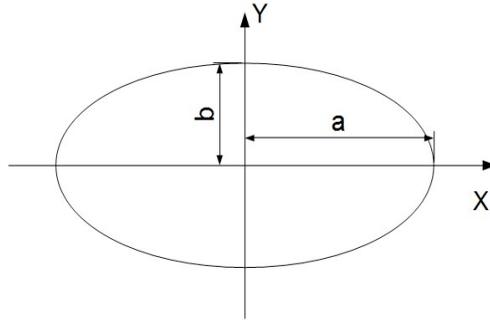


Figura 8: Visualización de la superficie de contacto cuando los radios de curvatura no son iguales entre si.

$$r_m = \sqrt[3]{\frac{3\pi}{8} \frac{P(k_1 + k_2)}{\beta}} \quad (31)$$

Determinado el valor del radio promedio del contacto, los diámetros principales vienen definidos de acuerdo a una regla de proporcionalidad. Los valores m y n se definen por medio de la excentricidad angular de la elipse de contacto:

$$\begin{aligned} a &= m \cdot r_m \\ b &= n \cdot r_m \end{aligned} \quad (32)$$

La excentricidad angular de la elipse de contacto, fue definida por Hertz (1896) según relaciones geométricas en función de la curvatura de las superficies. Conocidos los radios de curvaturas y expresados como A y B , la excentricidad angular se determina mediante la Tabla 1 descrita a continuación:

Tabla 1: Relación m y n respecto al ángulo θ , Hertz (1896)

θ	90°	80°	70°	60°	50°	40°	30°
m	1	1.128	1.285	1.486	1.754	2.136	2.731
n	1	0.8927	0.8000	0.7171	0.6407	0.5673	0.4931

El ángulo θ que permite establecer la relación entre las curvaturas de las superficies con la proporción de los diámetros principales se calcula:

$$\theta = a \cos\left(\frac{B-A}{A+B}\right) \quad (33)$$

Definidos m y n , la distribución normal de presiones se conjuga como una superficie elipsoidal de ejes principales a , b y presión máxima q_0 :

$$q = \frac{3}{2} \frac{P}{\pi a b} \sqrt{1 - \left(\frac{x}{a}\right)^2 - \left(\frac{y}{b}\right)^2} = q_0 \sqrt{1 - \left(\frac{x}{a}\right)^2 - \left(\frac{y}{b}\right)^2} \quad (34)$$

La metodología de Hertz (1896) es ampliamente utilizada para describir tanto los esfuerzos como los desplazamientos normales en el contacto entre dos cuerpos de superficies curvas. En el marco de los estudios de contacto mecánico rueda-riel, este método es la base de los sistemas de análisis dinámico de vehículos a la hora de estudiar la distribución de las presiones normales en la superficie de contacto simple.

La base de este modelo continúa con el estudio del comportamiento de las presiones tangenciales en el contacto rueda-riel; sin embargo todas las investigaciones posteriores mantienen el modelo de Hertz (1896) intacto.

2.2.2 Inicio del modelado del contacto mecánico rueda-riel

Debido al auge de los sistemas ferroviarios, se emprenden investigaciones sobre el fenómeno de rozamiento en contacto mecánico, en concreto para los sistemas rueda-riel. Para ello se introduce un nuevo término denominado como “fuga” o “deslizamiento”, como la separación entre las partículas de la rueda y el riel, tal como lo define Carter (1926). Este modelo es considerado como la teoría exacta para las presiones tangenciales, sin considerar el deslizamiento distinto a la dirección de deslizamiento.

El estudio de las cargas tangenciales parte de la relación entre la fuerza tangencial y el límite de las cargas tangenciales representado por la ley de Coulomb para la fricción. Esta relación viene dada en función del deslizamiento expresado como:

$$\frac{F_T}{\mu P} = -k \xi + \frac{1}{4} \cdot k^2 \xi |\xi| \quad (35)$$

Donde el término k es el coeficiente de deslizamiento de Carter ($4Rw/\mu a$) y ξ el deslizamiento longitudinal $2 \cdot (V_t - V_c)/(V_t + V_c)$.

Suponiendo que no exista deslizamiento, los esfuerzos tangenciales y la presión entre las caras en el contacto rueda-riel ha de ser la misma en ambas superficies y la distribución de esfuerzos no se ve afectada por la tracción entre las mismas.

Considerando que el radio de la rueda es mayor que la circunferencia del contacto en s , se puede asumir que el radio de la rueda es infinito. En la superficie de contacto se puede considerar que se trata de un medio finito elástico sujeto a un plano, donde existe una distribución de presiones y esfuerzos tangenciales debido a la tracción. Los esfuerzos y deformaciones debido a la presión son conocidas y no son discutidas más que para la transmisión de las fuerzas de tracción.

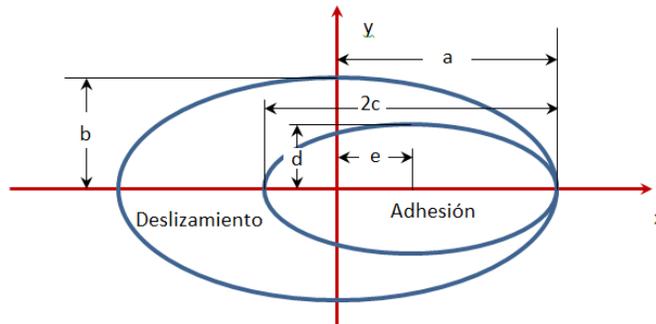


Figura 9: Descripción de la superficie de contacto bajo deslizamiento.

Donde las distancias c y d son las magnitudes de los ejes del área de adherencia y e la distancia entre el centro de la elipse de Hertz (1896) respecto al centro de la elipse de adhesión $e = a - c$.

Primero se establece la existencia de dos áreas tal como se muestra en la Figura 9. Un área de deslizamiento, donde la presión tangencial supera el límite de fricción estática dado por el roce entre la rueda y el riel y un área de adhesión, donde las deformaciones en la superficie de la rueda, no superan los límites de saturación, por lo que no ocurre deslizamiento según el modelo de Carter (1926).

La relación entre la geometría del área de adhesión y del deslizamiento con respecto a la fuerza de roce, parte de la ecuación (35) obteniendo:

$$\frac{c}{a} = \frac{d}{b} = \sqrt[3]{1 - \frac{F_T}{\mu P}} \quad (36)$$

En este caso la presión tangencial en el área de adhesión viene expresada como:

$$\tau(x, y) = \mu \cdot p_{n_{\max}} \sqrt{1 - \left(\frac{x}{a}\right)^2 - \left(\frac{y}{b}\right)^2} + \frac{\mu \cdot c \cdot p_{n_{\max}}}{a} \sqrt{1 - \left(\frac{x-e}{c}\right)^2 - \left(\frac{y}{d}\right)^2} \quad (37)$$

El modelo de Carter (1926) fue la motivación para una línea de investigación basada en este caso especial de contacto mecánico. El modelo analítico propuesto tiene la desventaja de sólo poder estudiar el caso bidimensional. Investigaciones realizadas en el campo del contacto rueda-riel como la de Kalker (1971) permitieron describir la distribución de presión tangencial para el problema tridimensional, describiendo la distribución de presión lateral y longitudinal; en este trabajo se consideró el caso

tridimensional, no obstante es necesario conocer las bases teóricas que llevaron al análisis del contacto rueda-riel.

2.2.3 La rugosidad y el contacto mecánico

El estudio del contacto mecánico continuó; las investigaciones posteriores a Hertz (1896) se centraron en determinar el comportamiento del área de contacto. Hertz (1896) consideró las superficies de contacto lisas, sin ningún tipo de imperfecciones, esta consideración fue vista por Bowden y Tabor (1939) como una limitación al modelo.

Bowden y Tabor (1939) emprenden investigaciones sobre el comportamiento del área de contacto con los resultados de Meyer (1898), por ellos citado, que estableció una relación entre la resistencia eléctrica del metal y la presión que se ejercía. También hacen referencia a que años después, Auren (1903) y Browning (1906) presentaron resultados que demostraban lo contrario a las investigaciones de Meyer, lo cual llevó a concluir que podían presentar discordancias si no se limpiaba la superficie correctamente. Refieren también a las observaciones de Blinder (1912) quien repitió los ensayos realizados por los autores antes mencionados, arrojando que la conductancia eléctrica era menor a lo esperado y que por lo tanto el contacto era un área menor. Finalmente mencionan a Holms (1922), quien señala que los resultados obtenidos se deben a dispersiones en la conductancia eléctrica, lo que sugiere que sobre la superficie plana existen varias áreas pequeñas de contacto.

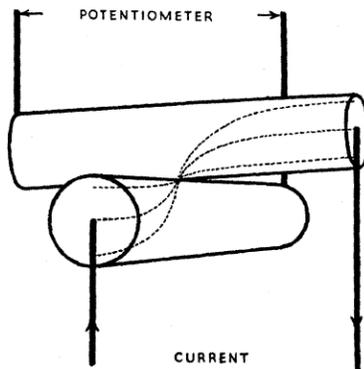


Figura 10: Cilindros en contacto y el flujo de la corriente a través del punto de contacto. Fuente: Bowden y Tabor (1939).

Bowden y Tabor (1939) deciden realizar experimentos con cilindros metálicos ubicados de manera transversal, con el fin de poder calcular el área de contacto mediante la conductancia, replicando los experimentos de Meyer (1898) como se muestra en la Figura 10. El resultado obtenido fueron descritos como variable en el tiempo ante cargas ligeras. Al aumentar la presión entre los cuerpos, aumentaba de manera considerable la conductancia eléctrica entre los cuerpos; al llevarse a cabo el experimento con cargas altas, se obtuvieron los resultados más estables, pero la dispersión se hacía presente ante ligeras vibraciones.

El comportamiento de las variaciones en la conductancia es reproducible. En un principio se atribuyeron los resultados a la formación de óxido sobre la superficie. Al repetirse el experimento tomando en cuenta el movimiento entre los cuerpos, se verificó que se daba aún el comportamiento variante de la conductancia por lo que Bowden y Tabor (1939) expresan la importancia de la fricción como factor influyente en las dimensiones de la superficie de contacto; adicionalmente especifica que el área de contacto durante el movimiento presenta grandes fluctuaciones que sustentan la importancia de la fricción. Las

fluctuaciones, de acuerdo con Bowden y Tabor (1939), dependerán de las propiedades de los materiales en contacto que determinan la velocidad con la que se forman y se rompen los contactos metálicos.

Gracias al desarrollo tecnológico en el estudio de superficies, nace una nueva teoría en el contacto elástico considerando que la topografía de la superficie de estudio está directamente relacionada con el contacto superficial propuesta por Greenwood y Williamson (1966). La investigación se inicia mediante un análisis estadístico del enlace; en primera instancia analizaron la distribución de irregularidades en la superficie, que limitan el contacto pleno entre los sólidos, asumiendo que el número de picos en contacto está directamente relacionado con el número de áreas en contacto.

$$prob(z > d) = \int_d^{\infty} \Phi(z) dz \quad (38)$$

Donde los términos de la probabilidad de penetración de las rugosidades son:

- La altura z es utilizada para las irregularidades.
- La distancia d entre las dos superficies en contacto.
- La distribución $\Phi(z)$ de las alturas de las irregularidades.

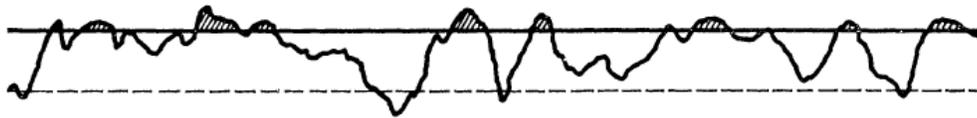


Figura 11: Perfil de rugosidades, Greenwood y Williamson (1966) donde se observa la región de penetración debido a la rugosidad y la zona donde el material se comporta como medio elástico continuo.

En segundo plano, a partir del número de áreas en contacto de acuerdo a la ecuación (39) se puede determinar el área total de las superficies, como se

describe en la ecuación (40), que se encuentra realmente en contacto para luego poder determinar la conductancia y la carga aplicada en el experimento como se observa finalmente en las ecuaciones (41) y (42).

$$n = N \int_d^{\infty} \Phi(z) dz \quad (39)$$

Donde el número de asperezas en contactos se expresa n y N es la cantidad de asperezas. A partir de esta hipótesis se establece que el área de contacto viene definido por el número de asperezas en contacto por la sección de área δA que éstas posean. La sección de área depende de la sumatoria de las curvaturas de las superficies en contacto β y por el grado de penetración de la irregularidad al cuerpo opuesto $(z-d)$:

$$A = \delta A \cdot n = \pi N \beta \int_d^{\infty} (z-d) \Phi(z) dz \quad (40)$$

Siguiendo bajo el modelo de contacto mecánico de Hertz (1896), la carga total P entre las dos superficies viene dado por la integración de las distribuciones de presiones de cada punto de una superficie con coeficientes elásticos de contacto k_i .

$$P = \frac{4}{3} \pi N (k_1 + k_2) \sqrt{\beta} \int_d^{\infty} (z-d)^{3/2} \Phi(z) dz \quad (41)$$

Ya que la conducción eléctrica G depende del área contacto e impedancia del material ρ y ésta a su vez depende de la carga, a partir de (41), se obtiene:

$$G = \frac{2N(k_1 + k_2) \sqrt{\beta}}{\rho} \int_d^{\infty} \sqrt{(z-d)} \Phi(z) dz \quad (42)$$

Se debe añadir que Greenwood y Williamson (1966), definen un criterio para determinar un contacto elástico o plástico, denominado índice de plasticidad, definido en la ecuación (43). Este índice establece los rangos de dureza elástica y dureza real. Si el índice de plasticidad es bajo, es poco probable que el modo de deformación cambie por efecto de la carga, por lo cual es incorrecto alegar que si un cuerpo no sufre deformaciones permanentes en su superficie, éste las sufrirá aumentando la carga.

$$\psi = \frac{(k_1 + k_2) \cdot h}{S_y} \quad (43)$$

Donde:

- El índice de plasticidad es ψ .
- El promedio de las alturas de las rugosidades h .
- La resistencia del material S_y .

Las respuestas encontradas por Greenwood y Williamson (1966), determinaron la diferencia entre el área nominal de contacto (ejercida por una carga nominal) y el área de contacto real dado por la distribución de cargas en los micro-contactos en las superficies; la comparación de los resultados determinó que la separación entre los cuerpos obtuvieron una desviación estándar de 1 o 2; según lo expresaron los autores, la separación real entre las superficies, para amplios rangos de cargas, son semejantes al distanciamiento promedio estimado.

2.2.4 Modelado tridimensional de contacto rueda-riel

En el campo de estudio del modelo de la fuerzas tangenciales en el contacto rueda-riel, se partió de la propuesta de Carter (1926), para la determinación de las cargas laterales en el contacto rueda-riel. En conjunto con

las cargas longitudinales y normales, las cargas laterales fundamentaron los modelos de contacto rueda-riel tridimensionales.

2.2.4.1 Modelo Simplificado de Kalker

La relación entre las fuerzas tangenciales y el límite de roce estático entre las superficies de la rueda y el riel respecto al deslizamiento propuesto por presentadas inicialmente por Carter (1926), fue simplificada por Kalker (1971), dando a lugar como resultado:

$$\frac{F_T}{\mu P} = -k \xi \quad (44)$$

Esta simplificación permitió la creación de la teoría lineal de contacto rueda-riel para establecer un modelo donde los enlaces elásticos en la superficie de contacto son sustituidos por resortes equivalentes de constante elástica L . Este modelo se denomina teoría simplificada de Kalker (1971) y permite el estudio tridimensional de las presiones presentes en el contacto rueda riel. Para ello es necesario definir dos nuevos deslizamientos, denominados deslizamiento lateral y rotacional.

Una de las limitaciones del modelo de Carter (1926) es la dificultad que parte de estudiar el contacto para el caso tridimensional. La linealidad del modelo de Kalker (1971) permite considerar los deslizamientos en distintas direcciones, en especial, los deslizamientos longitudinales, lateral y rotacionales.

La determinación del deslizamiento longitudinal, lateral y rotacional ξ , η y φ viene dada por la ubicación o posición de la rueda respecto al conjunto del eje y ruedas como cuerpo rígido. La geometría de la rueda juega un rol importante en la determinación de los deslizamientos longitudinales:

$$\xi = \frac{V - r\omega}{0.5(V + r\omega)} = \frac{-\Delta r}{r_o} = -\gamma \frac{y}{r_o} \quad (45)$$

Donde el deslizamiento longitudinal ξ viene dado por la velocidad rotacional de la rueda ω , el radio de la rueda en el punto de contacto r y la velocidad en el eje V . Considerando la conicidad de la rueda γ , se puede estimar el deslizamiento longitudinal mediante el movimiento lateral de la rueda y , respecto al radio de la rueda en su posición ideal r_o .

El deslizamiento lateral φ , depende del ángulo que forma la rueda respecto a su dirección de traslación α :

$$\eta = \alpha \quad (46)$$

Y con respecto al deslizamiento rotacional, φ en cambio depende de la geometría de la rueda en el punto de contacto y la conicidad de la rueda.

$$\varphi = \frac{\sin(\gamma)}{r} \quad (47)$$

Conocidos los deslizamientos, y considerando la linealidad de la Teoría Simplificada, se puede establecer una relación directamente proporcional de las cargas en las coordenadas (x, y) obteniendo:

$$F_x = -Gabc_{11}\xi \quad (48)$$

$$F_{y_{lat}} = -Gabc_{22}\eta \quad (49)$$

$$F_{y_{rot}} = -Gabc_{23}\sqrt{ab}\varphi \quad (50)$$

El modelo propuesto por Kalker (1971) converge para valores de fuga mucho menores al 1%. Sin embargo la base del modelo tridimensional sirvió

para la formación de modelos de contacto rueda-riel para valores de fuga que converjan para altos valores de fuga.

2.2.4.2 *Modelo de distribución de presiones tangenciales de Kalker.*

Es a partir del conocimiento de las fuerzas laterales y longitudinales Kalker (1982) estableció un modelo que supone un cuerpo elástico como un conjunto de resortes conectados a puntos rígidos del cuerpo. Para ello, se asume que cada resorte en el momento del contacto mecánico tiene una constante L_m donde m es la dirección del deslizamiento.

$$L_{\xi} = \frac{8 \cdot a}{3 \cdot c_{11} \cdot G} \quad (51)$$

$$L_{\eta} = \frac{8 \cdot a}{3 \cdot c_{22} \cdot G} \quad (52)$$

$$L_{\varphi} = \frac{8 \cdot a \sqrt{a/b}}{4 \cdot c_{23} \cdot G} \quad (53)$$

Conocidos los valores de L_m mediante (51), (52) y (53), se puede obtener un valor de L general, proyectando las componentes de cada constante a la dirección del deslizamiento, de modo que se transforma el problema tridimensional, en un problema bidimensional:

$$L = \frac{(|\xi| L_{\xi} + |\eta| L_{\eta} + \sqrt{ab} |\varphi| L_{\varphi})}{\sqrt{\xi^2 + \eta^2 + ab(\varphi^2)}} \quad (54)$$

Conocido L como la constante elástica por unidad de presión tangencial para las deformaciones normales colineales con el movimiento de la rueda, se puede abordar el problema del contacto mecánico rueda riel mediante las deformaciones de la rueda y el riel:

$$u_x = L \cdot \tau \quad (55)$$

El concepto de domo de saturación, o la máxima presión tangencial debido a la presión normal p_n , establece los límites del desplazamiento de las partículas en dirección del movimiento del eje:

$$u_{max} = L \cdot \mu \cdot p_n \quad (56)$$

Por último, si se estudia la relación entre el deslizamiento rígido y el deslizamiento elástico, se hacen presentes las deformaciones en la superficie del contacto obteniendo la base de la teoría de Kalker (1971):

$$\frac{du_x}{dx} = s(x) - w(x) \quad (57)$$

Donde: du_x/dx las deformaciones en la dirección de traslación de la rueda, $w(x)$ es el deslizamiento rígido de la rueda y $s(x)$ el deslizamiento elástico de la rueda.

La ecuación (57) tiene solución analítica al derivar el domo de saturación, donde $s(x)$ es diferente de cero cuando $w(x) > du_{max}/dx$. Sin embargo Kalker (1982) propuso una solución mediante diferencias finitas utilizando el método de euler. Esto se debe a que la ecuación (57) solo considera las deformaciones en la dirección de traslación, pudiendo aceptar otros modelos de contacto mecánico normal, diferentes a la geometría de Hertz. La solución entonces es:

$$u_i = u_{i-1} + \Delta x \cdot s_i - \Delta x \cdot w(x_i) \quad (58)$$

Donde Δx es el espesor de grilla elegido para el cálculo mediante diferencias finitas.

El algoritmo inicia con $u_0 = 0$ y $s_0 = 0$ y en $x_0 = -a$ y evalúa en cada iteración si $u_i > u_{max}$ se define: $u_i = u_{max}$ y $s_i = (u_i - u_{i-1})/\Delta x + w_i$.

La solución de Kalker (1982) es denominada FASTSIM y es ampliamente utilizada en el estudio del contacto rueda riel por su rapidez comparada con los modelos de elemento finito al igual que por su sencillez de uso y su efectividad cuando los deslizamientos son cercanos a los límites de la fricción pura bajo las consideraciones lineales.

2.2.4.3 Modelo empírico tridimensional de contacto rueda-riel.

Para altos valores de fuga, el modelo de Shen-Hedrick-Elkins c.p. Kalker (1991) permite definir con mejor precisión el comportamiento no lineal del contacto mecánico rueda-riel sometido a valores cercanos al límite de coloumb sin la determinación de la distribución de presiones tangenciales, esto con el fin de determinar las cargas en la dirección longitudinal y lateral en tiempos menores a los adquiridos por FASTSIM. Shen et al. parten del modelo de Kalker (1971) para el cálculo de cargas en la dirección del movimiento y la dirección lateral (59) y (60):

$$F_x = -Gabc_{11}\xi \quad (59)$$

$$F_y = -Gabc_{22}\eta - Gabc_{23}\sqrt{ab}\varphi \quad (60)$$

El módulo de la suma vectorial de estas dos fuerzas viene dada por:

$$F_t = \sqrt{F_x^2 + F_y^2} \quad (61)$$

El modelo por tanto se logra aproximando la relación entre carga tangencial y carga máxima por un polinomio de tercer grado:

$$F_t' = \begin{cases} \mu N \left[\left(\frac{F_t}{\mu N} \right) - \frac{1}{3} \left(\frac{F_t}{\mu N} \right)^2 + \frac{1}{27} \left(\frac{F_t}{\mu N} \right)^3 \right] & F_t \leq 3\mu N \\ \mu N & F_t > 3\mu N \end{cases} \quad (62)$$

Donde F_t' es el módulo de la carga tangencial aplicada, corregido según el modelo de Shen-Hedrick-Elkins. Para calcular las fuerzas tangenciales en la dirección longitudinal y lateral se obtiene:

$$F_{x'} = F_t' \frac{F_x}{F_t} \quad (63)$$

$$F_{y'} = F_t' \frac{F_y}{F_t} \quad (64)$$

Una de las características del modelo radica en que el momento por rotación no se toma en cuenta. Este resultado es más preciso que el modelo de Kalker (1971) fuera del rango lineal pero no es recomendable para altos valores de deslizamiento tal como lo menciona Pombo et al (2008).

2.2.4.4 Modelo de rápido computo de Polach

Ante la necesidad de un método fiable y continuo para parámetros de deslizamiento altos y que además considere el momento rotacional, se estableció un modelo basado en una solución estandarizada de la totalidad de fuerzas tangenciales, conocido como la formulación de Polach (1999).

El modelo Polach (1999) parte de una geometría conocida de presiones tangenciales siendo el gradiente de presiones tangenciales, en la zona de adhesión, lineal respecto la dirección de movimiento, tal como se muestra en la Figura 12.

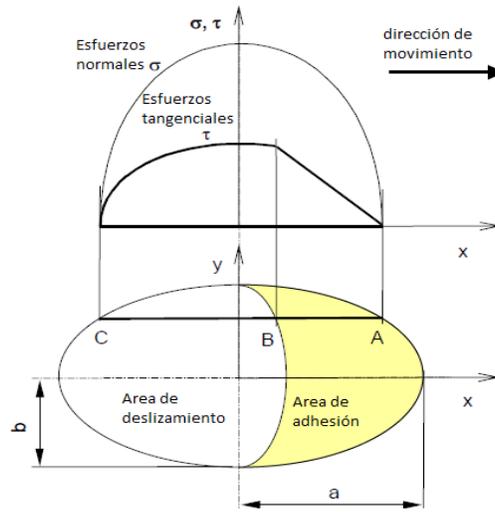


Figura 12: Geometría de la distribución de la presión tangencial Fuente: Polach (1999)

La integración de esta geometría fue calculada por Freibauer como menciona Polach (1999). Para ello es necesario transformar el elipsoide de contacto en una esfera de radio a .

$$y' = \frac{a}{b} \cdot y \quad \tau' = \frac{a}{\tau_0} \cdot \tau \quad (65)$$

Donde: y' es la transformación a escala de las dimensiones en el eje y . a y b es la magnitud de los diámetros principales de la superficie de contacto, τ la presión tangencial, τ_0 la presión tangencial máxima y τ' la presión tangencial máxima a escala.

Definiendo la nueva geometría de la presión tangencial de contacto a escala, la integración de la presión tangencial da como resultado la carga tangencial aplicada.

$$F_T = \iint \tau \, dx \, dy = \tau_0 \frac{b}{a^2} \iint \tau' \, dx \, dy' \quad (66)$$

Dando como resultado:

$$F_T = -\tau_0 \frac{b}{a^3} \frac{4}{3} a^3 \left(\frac{\epsilon}{1+\epsilon^2} + \arctan \epsilon \right) \quad (67)$$

Donde ϵ es el gradiente de los esfuerzos tangenciales en el área de adhesión y está definido como:

$$\epsilon = \frac{2}{3} \frac{C \pi a^2 b}{\pi N} v \quad (68)$$

Para lo cual, la constante de proporcionalidad C viene dada por la elasticidad de los cuerpos y $v = \sqrt{\xi^2 + v_y^2}$ el deslizamiento total. La ecuación (67) puede ser simplificada mediante la relación $\tau_0 = \mu P n_{max}$, de esta manera se obtiene:

$$F_T = \frac{-2\mu N}{\pi} \left(\frac{\epsilon}{1+\epsilon^2} + \arctan \epsilon \right) \quad (69)$$

Desde este punto las cargas longitudinales pueden ser calculadas considerando el deslizamiento longitudinal ξ como:

$$F_x = F_T \frac{\xi}{v} \quad (70)$$

Para determinar la magnitud de las cargas laterales F_y hay que descomponer esta carga por las componentes del deslizamiento lateral y rotacional, las cuales tendrán la nomenclatura F_{y_η} y F_{y_φ} . El cálculo parte desde la determinación del deslizamiento lateral total:

$$v = \begin{cases} \eta + \varphi \cdot a & \text{si } |\eta + \varphi| > |\eta| \\ \eta & \text{si } |\eta + \varphi| \leq |\eta| \end{cases} \quad (71)$$

Para el caso de las cargas laterales motivado a la inclinación de la rueda respecto al riel F_{y_η} , el cálculo es el mismo que las cargas longitudinales F_x ,

sin embargo las cargas laterales motivados al giro de la rueda respecto a la normal de la superficie de contacto Fy_ϕ es un valor específico calculado por la misma metodología implementada en la ecuación (67) obteniendo:

$$Fy_\phi = \frac{-9}{16} a \mu N K_M \left[1 + 6.3 \left(1 - e^{\frac{a}{b}} \right) \right] \frac{\phi}{v} \quad (72)$$

Donde K_M se define:

$$K_M = |\epsilon| \left(\frac{\delta^3}{3} + \frac{\delta^2}{2} + \frac{1}{6} \right) - \frac{1}{3} \sqrt{(1 - \delta^2)^3} \quad (73)$$

Y δ como:

$$\delta = \frac{\epsilon_s^2 - 1}{\epsilon_s^2 + 1} \quad (74)$$

Donde la modificación de ϵ_s es descrita como:

$$\epsilon_s = \frac{2}{3} \frac{C \pi a^2 b}{\mu N} \frac{S_{yC}}{\left[1 + 6.3 \left(1 - e^{\frac{-a}{b}} \right) \right]} \quad (75)$$

La determinación de la constante C de elasticidad, puede ser calculada mediante pruebas experimentales o relacionándola con la teoría de Kalker (1971) evaluándola en $\epsilon \rightarrow 0$ de modo que ϵ y ϵ_s se pueden definir gracias a las constantes de kalker como:

$$\epsilon = \frac{1}{4} G \pi a b c_{jj} \mu N v \quad (76)$$

Donde la constante geométrica viene dado $c_{jj} = \sqrt{(c_{11} \xi / v)^2 + (c_{22} \eta / v)^2}$ mientras que ϵ_s :

$$\epsilon_s = \frac{8}{3} \frac{G b \sqrt{a \cdot b}}{\mu N} \frac{c_{23} u_y}{\left[1 + 6.3 \left(1 - e^{\frac{a}{b}}\right)\right]} \quad (77)$$

Las constantes de elasticidad c_{11} , c_{22} y c_{23} fueron definidas por Kalker (1991) anexas a este trabajo.

El propósito de la propuesta Polach (1999) fue obtener un algoritmo para calcular rápidamente las cargas laterales y longitudinales, siendo lo más exacto posible cuando el modelo lineal no determina con precisión el comportamiento de las cargas tangenciales.

De esta manera se hace una revisión de los cuatro métodos implementados para el estudio del contacto rueda riel, siendo Kalker (1971) y Polach (1999) los más utilizados comercialmente.

Considerando los antecedentes en los cuales está enmarcada la presente investigación, los aportes de Vollebregt et al (2011) y de Kalker (1991) amplían los conocimientos sobre el contacto rueda-riel referidos por Kalker (1971). Las contribuciones de Iwnicki (2006) y Shabanna et al (2008) sobre el manejo de las fugas, esclarecen los aspectos metodológicos que son utilizados en el capítulo 3, Metodología de investigación.

CAPÍTULO 3. - METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

El presente capítulo explica la metodología empleada en la investigación. Muestra la aplicación de los conocimientos teóricos sobre los modelos de contacto rueda-riel con la finalidad de establecer la relación de los mismos con las observaciones realizadas en el tramo de prueba de Metro de Caracas. Para ello se siguieron una serie de pasos para el manejo de la información cuyos procedimientos y basamentos son explicados a continuación.

Se definen primeramente las variables implicadas directa e indirectamente en el contacto rueda-riel que fueron observadas durante una serie de tomas de datos realizadas mediante el uso de “ejes instrumentados” en la vía de prueba de Metro de Caracas. Estas variables son las cargas en el punto de contacto en los tres ejes de coordenadas, el desplazamiento lateral de la rueda y la velocidad de traslación del eje. Siendo las cargas variables directamente relacionadas con el fenómeno de deslizamiento, la traslación de la rueda y la velocidad son variables indirectas en el fenómeno, pero que se relacionan directamente con las fugas tangenciales y son estimadas mediante los procedimientos de Kalker (1991) y ratificados por Iwnicki (2006).

En relación a las cargas que interactúan en la rueda, los ejes instrumentados permiten su estudio mediante las deformaciones en la pared interior de la misma. La interacción de las cargas con respecto a las deformaciones en la rueda, fueron recogidas por la empresa Transportation Technology Center, Inc (TTCI) para la calibración del equipo. Esta información fue utilizada en este trabajo de investigación para elaborar un procedimiento para el manejo de las señales de los ejes instrumentados.

Las cargas en la rueda y las fugas tangenciales en su superficie, son constatadas con la finalidad de observar la relación entre ambas variables según los modelos de contacto rueda riel. Para ello, los valores teóricos de fricción y rugosidad, son utilizados para comparar los modelos de contacto rueda-riel y evaluar su viabilidad para el análisis de las influencias de las características de la rueda y el riel en el comportamiento dinámico ferroviario.

3.1 Definición de las variables de interés para el estudio del contacto rueda-riel.

El estudio de la mecánica de contacto rueda-riel se enfoca en el fenómeno de fuga, siendo éste la variación entre la velocidad absoluta de la rueda y la velocidad relativa respecto al centro de la rueda en el punto de contacto y sus efectos sobre la dinámica ferroviaria. Carter (1926) es quien inicialmente expone la relación entre las fugas longitudinales y las cargas por deslizamiento. Iwnicki (2006) expone cómo aspectos espaciales y cinemáticos influyen en la fuga de la rueda, consideraciones tomadas en cuenta para el procesamiento de las variables manejadas en esta investigación.

De acuerdo a Hernández et al (1991), se definen las variables dependientes como aquellas que se ven afectadas por las causas del fenómeno bajo observación. En este caso las cargas tangenciales de las ruedas en el punto de contacto son consideradas dependientes de las fugas tangenciales de la rueda y que se espera partan del principio de deslizamiento expuesto en los modelos de contacto rueda riel.

Las cargas tangenciales seleccionadas son las longitudinales que están contenidas en la dirección del movimiento del tren; su magnitud y sentido son dependientes de las fugas longitudinales cuando el tren se encuentra bajo un comportamiento de velocidad constante. No obstante, el fenómeno de Catteneo,

establece que en los arranques y frenados se incorpora una condición adicional que viene dada por la aceleración rotacional de la rueda.

Estas cargas tangenciales se manejaron en kilo Newton (kN), por ser el sistema internacional de medida usado a lo largo de todo el presente trabajo.

En lo que respecta a las variables independientes, definidas como las causas de la variación del comportamiento de las variables dependientes, de acuerdo a Hernández et al (1991), éstas son las referidas a las fugas longitudinales que se ganan esta clasificación motivado a que inciden en como se conducen las cargas tangenciales; sin embargo éstas a su vez son dependientes de la posición de la rueda, por lo que siguiendo las bases del tratamiento de trabajo con estas variables indicado por Iwinichi, se manejaron como variables obtenidas indirectamente mediante el desplazamiento lateral de la rueda.

Las fugas son adimensionales, pues es una relación de proporcionalidad entre la velocidad absoluta de traslación de la rueda en contraposición a la velocidad relativa tangencial de la misma.

Existen de igual manera variables intervinientes, concepto manejado por Hernández et al (1991) para referirse a aquellas en el entorno del problema que afectan el comportamiento del fenómeno. Dentro de este concepto se engloban las cargas normales a la superficie de la rueda. Estas cargas, si bien mantienen relación con las cargas provocadas por el deslizamiento, influyen en su carácter de proporcionalidad al establecer el límite de la carga máxima teórica que puede existir tangencialmente en la superficie de contacto y que no debe ser superior a la carga normal por el coeficiente de roce de la superficie establecida por Coloumb. Estas cargas vienen dadas en kilo Newton (kN).

Una serie de variables, como la fricción y la rugosidad de la superficie son tomadas en cuenta mediante valores teóricos. Para la magnitud de estos

valores se usaron como referencia los datos recogidos por la empresa Transportation Technology Center, Inc (TTCI) y por lo tanto se manejaron como variables intervinientes en el desarrollo de este trabajo de investigación.

Se tomaron en cuenta las cargas tangenciales y normales en el punto de contacto; así mismo las fugas tangenciales de manera indirecta mediante la cinemática de la rueda respecto al riel y por último, se consideraron los valores de la rugosidad y la fricción aunque de manera teórica ó a fin de ajustar el comportamiento del modelo a la realidad de los resultados.

A continuación, se muestra una tabla resumen (tabla 2) que expone las variables de estudio en esta investigación:

Tabla 2: Definición de las variables en el fenómeno de contacto rueda-riel y su dependencia en las observaciones realizadas en la validación de los modelos de contacto rueda-riel.

	Nomenclatura*	Unidades	Dependencia
Carga Normales	FZ_C	[kN]	Interviniente
Cargas Longitudinales	FX_C	[kN]	Dependiente de ξ_C
Fuga longitudinal	ξ_C	[...]	Independiente
Coefficiente de fricción	μ	[...]	Interviniente

3.2 Estimación de las cargas mediante galgas extensiométricas.

La determinación de las cargas en el punto de contacto conlleva un análisis particular considerando la ubicación especial del fenómeno de estudio. El uso de ejes instrumentados permite una observación dinámica sin intervenir en el funcionamiento regular del componente mecánico.

La rueda objeto de este estudio, no se ve interferida de manera significativa por el uso de las galgas extensiométricas dentro del fenómeno estudiado. Sin embargo, el hecho de tratarse de una prueba dinámica cuyo

punto de aplicación de la carga no puede observarse desde una perspectiva fija, existen consideraciones adicionales que deben tomarse en cuenta en el momento de relacionar las deformaciones con las cargas, motivado a la naturaleza sinusoidal de la disposición de galgas extensiométricas en las paredes de la rueda.

El procedimiento que se aplicó en cada señal fue manejado de la siguiente manera:

1. Se verificó el estado de cada señal con la finalidad de que las ganancias fuesen adecuadamente seleccionadas.
2. Se tomó el juego de señales del eje instrumentado y se utilizaron los valores máximos de la señal absoluta de cada señal para generar una sola señal de deformación.
3. Se multiplicó la señal de deformación por el factor de relación calculado para esa rueda y conjunto de señal. El resultado fue la señal de carga neta.

En una primera etapa, se consideró el campo de deformaciones de la rueda una vez sometida a una carga de magnitud conocida. La empresa Transportation Technology Center, Inc (TTCI) elaboró un mapeo del campo de deformación mediante una hilera de galgas extensiométricas identificadas con el código EA-XX031MF-120 en determinadas áreas de interés en la rueda.

Esta data fue recogida y procesada, para elaborar nuevamente un mapeo del campo de deformación de la rueda la cual fue sometida a 180kN verticalmente en su posición central (a 67,28 mm con respecto al flanco de la rueda) y en los extremos de la rueda (a 51,87mm en ambos lados de la posición central), y con 90kN de carga lateral en la posición lateral.

Para procesar la extensa serie de datos (2880 muestras de las deformaciones en la pared de la rueda al ser sometida a una carga vertical en 3

posiciones del perfil rueda, más un ensayo con carga lateral) se elaboró un programa que representó gráficamente y numéricamente el campo de deformación en la pared inferior de la rueda. Este programa, elaborado en el lenguaje de programación Python, se denominó PySignalWheel. El campo de desplazamiento se representa en la Figura 13:

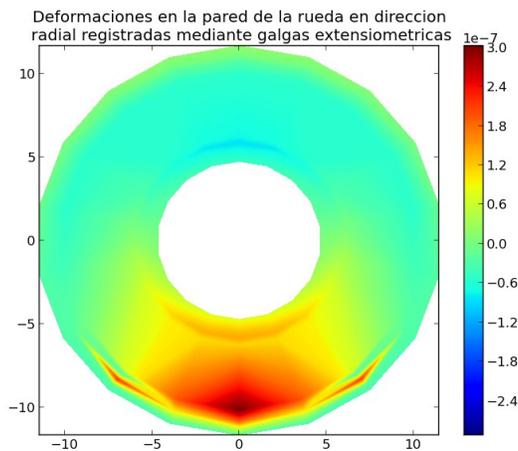


Figura 13: Distribución de las deformaciones en la paredes de la rueda a partir de los resultados obtenidos por la empresa Transportation Technology Center, Inc (TTCI). La escala de colores es positiva a compresión y negativa a tracción.

Conocidas las deformaciones de la rueda en toda su superficie al ser sometida a una carga puntal de 180kN, se determinó el comportamiento de la señal de salida respecto a la posición rotacional de la rueda y según la posición de las galgas adheridas y las interconexiones realizadas mediante puentes de whetstone. Se pudo observar que existe una leve homogeneidad de al menos 20 grados de longitud radial, tomando como centro el punto de aplicación de la carga. De esta manera se estimó que los puntos de máxima amplitud de la señal sinusoidal de los ejes instrumentados pudieran ser linealizados, considerando la totalidad de las señales que lo componen.

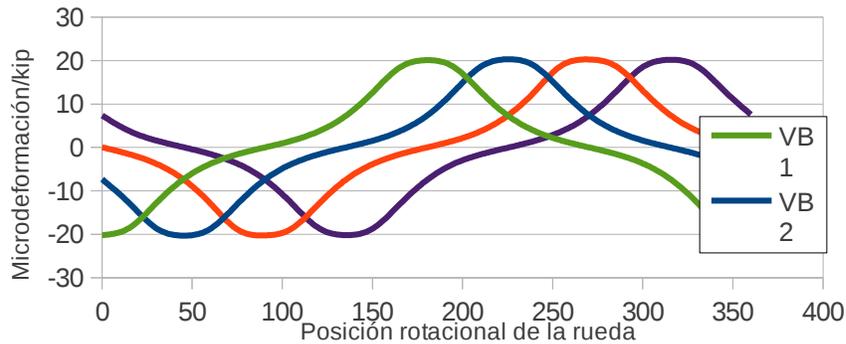


Figura 14: La relación entre las señales de las galgas extensiométricas para los puentes de verticales VB1, VB2, VB3 y VB4 (Vertical Bridge) contra su posición angular cuando la rueda es sometida a 180kN de carga.

Tomando en cuenta que las deformaciones en la superficie de la rueda, son siempre a compresión, éstas tienen el mismo signo pese a que su disposición en el circuito de whetstone hace que su señal sea negativa en determinadas posiciones de la rueda. En este caso, el valor absoluto de todas las señales daría como resultado un comportamiento más adecuado a la realidad.

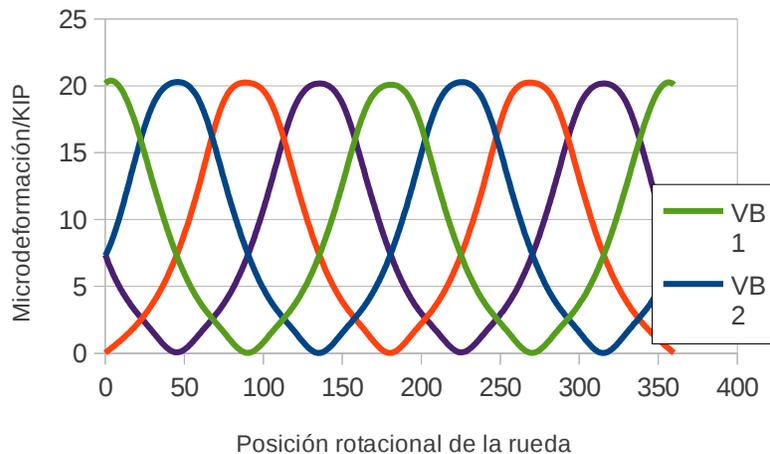


Figura 15: La relación entre el valor absoluto de las señales obtenidas por las galgas extensiométricas y la posición angular cuando la rueda es sometida a 180kN de carga.

Al considerar los valores de mayor deformación de cada señal sinusoidal, una curva sinusoidal de menor amplitud se hace presente. Este valor promedio de las deformaciones máximas de la rueda se utilizaron para una relación directa entre las cargas verticales y las deformaciones en la rueda.

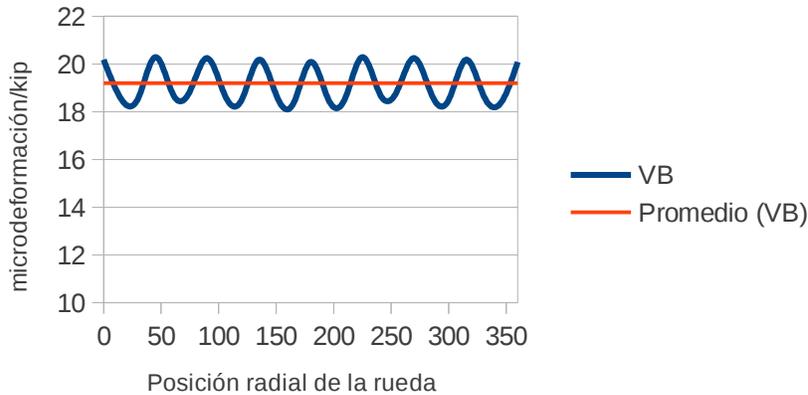


Figura 16: Máximos valores de las señales de galgas extensiométricas en conjunto respecto a la posición de los sensores, al igual que valor promedio de la señal conjunta.

Al realizar una evaluación de prueba, se obtuvo que la relación entre una señal compuesta de solo valores máximos de las señales absolutas de deformación de las galgas con respecto a las cargas, tenía un valor promedio 19,191 μ /kip, lo que expresado en kN es 4,312 μ /kN con un error promedio de 3,76% y un error máximo de 5,71%. Este método fue evaluado y los resultados mostrados en el Capítulo 4: Interpretación y análisis de resultados.

Este procedimiento analítico puede ser mejorado mediante métodos numéricos para tomar mediciones más precisas con instrumentación de mejor resolución y muestreo. Este tema está incluido en las recomendaciones de este trabajo de investigación, ya que la obtención y procesamiento de las cargas es un paso fundamental para relacionar la fuga con las cargas normales y tangenciales en el estudio y análisis del comportamiento del contacto rueda-riel.

3.3 Evaluación de los resultados para la validación de los modelos de contacto rueda-riel.

Con la finalidad de estudiar la viabilidad de los modelos de contacto rueda-riel para su uso en el análisis del fenómeno en los tramos de Metro de Caracas C.A, el flujo de la data recogida debió pasar por una serie de estadios para ser procesada , analizada y finalmente interpretada.

La primera etapa consistió en realizar observaciones dinámicas en la vía de prueba. Para ello, el equipo de ejes instrumentados fue instalado en un tren disponible de la Línea 2. Se incorporaron amplificadores de escobilla en los extremos de los juegos de ejes instrumentados. Finalmente, estos amplificadores fueron conectados a un sistema de amplificación y filtrado para luego ser incorporados al sistema de adquisición de datos.

El sistema de adquisición de datos y los ejes instrumentados se caracterizan por tener una tasa de muestreo de 256 hz con resolución de 16 bit. Se recogieron un total de 11 señales por rueda, y una señal por eje, logrando un total de 46 señales analógicas en total conformadas por:

- Deformación del puente de galgas extensiométricas para cargas verticales (4 señales por rueda, un total de 16 señales).
- Deformación del puente de galgas extensiométricas para cargas laterales (2 señales por rueda, un total de 8 señales).
- Deformación del puente de galgas extensiométricas para posición lateral (4 señales por rueda, un total de 16 señales).
- Deformación del puente de galgas extensiométricas para cargas longitudinales (1 señal por rueda, un total de 4 señales).
- Velocidad tangencial (1 señal por eje, 2 señales)

Una vez recopilada la información en el sistema de adquisición de datos, éste lo comprimió en un archivo, que luego fue descomprimido y exportado a un archivo de texto de valores separados por coma o CSV. Este archivo fue transferido luego a otro componente que analizó la data y determinó tanto las cargas como las fugas.

En cuando a la estimación de las cargas en el punto de contacto, primeramente se incorporaron las señales de deformación y la estimación por deformación/carga realizada previamente mediante los valores de calibración obtenidos por la empresa Transportation Technology Center, Inc (TTCI) para preparación del equipo. De igual manera se determinó la posición lateral de la rueda respecto al punto de radio ideal en el contacto rueda-riel. No obstante, para la obtención de las cargas normales y tangenciales, fue necesario la determinación de la dirección de las cargas, mediante la utilización de los procedimientos de Iwnicki (2006) sobre rotación de cargas en el eje al punto de contacto:

$$N = Q \cdot \cos(\gamma) + L \cdot \sin(\gamma) \quad (78)$$

$$T_L = -Q \cdot \sin(\gamma) + L \cdot \cos(\gamma) \quad (79)$$

Una vez descompuesta la carga normal N a la superficie y la carga tangencial T_L lateral de la superficie, se describieron todos los componentes de la carga en la rueda respecto al plano tangencial de contacto. La carga tangencial longitudinal es en todo igual a la carga longitudinal ya que el plano de contacto es paralela a la dirección del vector al que pertenece.

Luego de computar todas las cargas, se procedió a estimar las fugas; para ello se recurrió al modelo de fuga dinámico establecido en Iwnicki (2006) donde la fuga en cada dirección viene dada por la conicidad de la rueda γ , el desplazamiento lateral y y el radio ideal de contacto r_o .

$$\xi = \frac{y y}{r_o} \quad (80)$$

Para el estudio del fenómeno, se separaron los datos en dos bloques, siendo el criterio de separación, la velocidad de traslación del eje. Por un lado se manejaron los datos obtenidos durante el arranque y frenado, en cuyo caso el análisis no estuvo sujeto a los modelos de contacto rueda riel motivado a los efectos de Cattaneo. Para los datos recogidos a velocidad constante se usaron los modelos de contacto rueda-riel de Kalker (1971), Shen et al c.p. Kalker (1991) y Polach (1999).

Una vez procesada las cargas normales y tangenciales, al igual que las fugas tangenciales, se procedió a la identificación de la correlación entre las cargas tangenciales y las fugas correspondientes a cada fenómeno. Se relacionaron las cargas tangenciales longitudinales con las fugas longitudinales. El contraste de las variables permitió evaluar aspectos consolidados de cada modelo para bajos valores de fuga donde la pendiente está definida por el modelo lineal de contacto rueda-riel de Kalker (2000) y para altos valores de fuga, siendo el punto de contraste para los distintos modelos de contacto rueda-riel.

En la evaluación del comportamiento del contacto rueda-riel, se calculó la diferencia porcentual entre los modelos Kalker (1971), Shen et al c.p. Kalker (1991) y Polach (1999) frente a los resultados obtenidos en pruebas de vía, a fin de establecer su comportamiento en relación a desplazamiento reales de la rueda. Basándose en esto se evaluaron también las consideraciones en las cuales los modelos de contacto rueda riel no se ajustaron a la realidad.

Finalmente, a través de la metodología aplicada, se lograron definir los procedimientos para el análisis de la correlación entre los modelos de contacto rueda-riel en relación a los resultados obtenidos en prueba de vía férrea que se analizan en el Capítulo 4; Interpretación y análisis de los resultados.

CAPÍTULO 4. - INTERPRETACIÓN Y ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS.

En este capítulo se describen los resultados obtenidos a través de la información recopilada durante pruebas en vía férrea mediante el uso de ejes instrumentados para la validación y comparación de los modelos de contacto rueda-riel en contraste con la dinámica ferroviaria observada en la vía de prueba. Para su análisis se elaboró un modelo para relacionar las deformaciones registradas mediante el uso de galgas extensiométricas con las cargas a las que se encuentra sometida la rueda del eje instrumentado. En segunda instancia se procedió al procesamiento de la data con la finalidad de estudiar el comportamiento de las fugas a lo largo de la vía mediante la interpretación cinemática del desplazamiento lateral y longitudinal del eje y las cargas aplicadas en la rueda. Y por último, se estableció la correlación entre las cargas presentes en el eje y las fugas y los indicadores mencionados en el capítulo 3 para determinar el comportamiento en vía en contraste con un modelo de contacto rueda-riel.

4.1 Modelo de la relación carga vs deformación.

En el procesamiento de las señales del eje instrumentado, fueron digitalizadas y procesadas una serie de datos manejados por la empresa Transportation Technology Center, Inc (TTCI) para la calibración del equipo. La data consiste en una serie de mediciones realizadas a la salida de las señales de los puentes de galgas verticales, laterales, de posición y de torque para una carga vertical de 177,83 kN (40.000 lbf) en el punto ideal de contacto (67,28mm de la cara interna de la rueda), en el área extrema de la rueda (103,91

mm de la cara interna), en el área extrema interna (15,42mm de la cara interna) y para una carga lateral de 88,96 kN (20.000 lbf) en el punto ideal de contacto.

Se obtuvieron los valores que relacionan las cargas verticales con las señales máximas absolutas para cada rueda en los puentes de galgas verticales, laterales y de posición en los puntos de estudio, para determinar la correlación entre la posición y la sensibilidad de las galgas. Se estima entonces un modelo lineal aproximación para relacionar las deformaciones absolutas con las cargas:

$$F_V = m_V \cdot \varepsilon_V \quad (81)$$

$$F_L = m_L \cdot \varepsilon_L \quad (82)$$

$$P_L = m_P \cdot \left(\frac{\varepsilon_P}{F_V} - \varepsilon_{PO} \right) \quad (83)$$

Se evaluaron los coeficientes elásticos para cargas verticales m_V , para cargas laterales m_L y para la posición del punto de contacto m_P y la constante ε_{PO} para cada rueda a partir de los datos de calibración, con la finalidad de poder procesar la información recolectada en pruebas de vías. Los coeficientes también fueron contrastados con los mismos resultados de calibración para determinar la viabilidad del modelo, evaluando el error máximo relativo.

Para la determinación de la magnitud de los coeficientes elásticos, se consideraron los valores absolutos máximos entre todos los puentes de galgas verticales, laterales y de posición, para cada posición angular de la rueda,

En la Tabla 3 se presentan los valores obtenidos en las pruebas de calibración por parte de la empresa Transportation Technology Center, Inc. para los puentes de galgas verticales identificados como VB1, VB2, VB3 y VB4 (a partir de las siglas en inglés Vertical Bridge) y el valor absoluto máximo

observado para cada posición de la rueda y el promedio calculado para una exploración de 180°.

Tabla 3: Valores de relación de deformación vs carga para distintas posiciones angulares.

Pos	Valores de μ_{def}/kip				
	VB1	VB2	VB3	VB4	Valor abs max
0	-20,182	-7,310	0,034	7,368	20,182
15	-18,553	-12,765	-1,536	3,806	18,553
30	-12,837	-18,561	-3,729	1,613	18,561
45	-7,364	-20,286	-7,299	0,065	20,286
60	-3,786	-18,757	-12,828	-1,499	18,757
75	-1,581	-13,065	-18,573	-3,719	18,573
90	-0,027	-7,500	-20,243	-7,283	20,243
105	1,514	-3,836	-18,730	-12,768	18,730
120	3,676	-1,601	-13,101	-18,494	18,494
135	7,192	-0,015	-7,520	-20,176	20,176
150	12,600	1,532	-3,865	-18,710	18,710
165	18,346	3,709	-1,614	-13,137	18,346
180	20,085	7,232	-0,018	-7,571	20,085
Promedio:					19,21

El valor promedio de los valores absolutos máximos de las señales obtenidas por Transportation Technology Center, Inc, es la magnitud de las deformaciones por unidad de fuerza aplicada sobre la superficie Maal (2000). La inversa del promedio calculado es por lo tanto el coeficiente elástico necesario para la evaluación del modelo planteado y la determinación de las cargas.

Para el conjunto de puentes de carga vertical VB1, VB2, VB3 y VB4 se evaluó el coeficiente de elástico en función del promedio de los valores

absolutos máximo de las señales, al igual se que manejó las conversiones de unidades de fuerza de unidades inglesas (kip) al sistema unidades internacionales (kN):

$$m_v = \frac{1}{19,21 \mu / kip} \cdot \frac{1 \text{ kN}}{0,225 \text{ kip}} = 0,2313 \text{ kN} / \mu \quad (84)$$

El conjunto de ejes instrumentados está compuesto por dos ejes, cada rueda de los ejes está instrumentada de acuerdo al apéndice I, e identificadas según su ubicación, el tren delantero está conformado por las ruedas A1 y B1 (rueda izquierda y derecha respectivamente) y así mismo el eje trasero con las ruedas A2 y B2. El procedimiento para la determinación del coeficiente elástico para cargas verticales m_v , para cargas laterales m_L y para la posición del punto de contacto m_p y la constante ε_{PO} fueron evaluados para cada rueda dando a lugar a los resultados presentados en la Tabla 4.

Tabla 4: Valores de los coeficientes que relacionan las deformaciones en los puentes de galgas con las cargas para cada rueda del bogie.

	A1	B1	A2	B2
$m_v (kN/\mu)$	0,2313	0,2349	0,2276	0,2299
$m_L (kN/\mu)$	0,0285	0,0265	0,0273	0,0271
$m_p (kN \cdot mm/\mu)$	-268,4916	-242,9994	-212,6980	-226,3886
$\varepsilon_0 (\mu/kN)$	1,1182	1,1094	1,1162	1,0849

Los valores de los coeficientes estimados, son utilizados para la determinación de las cargas utilizando el modelo lineal formulado en las ecuaciones para la determinación de las cargas verticales (81), para las laterales (82) y para la determinación del punto de contacto (83).

Para la evaluación del error se comparó la carga de prueba descrita en Maal (2000) de 40.000 lbf para cargas verticales (177,83 kN) para las cargas verticales a distintas posiciones y 20.000 lbf (88,96 kN) para cargas laterales con respecto a los valores máximos y mínimos de la señal de las deformaciones registrada para la prueba de calibración.

$$er(m_V) = \frac{\max\left\{\begin{array}{l} \max(\varepsilon_Z) \cdot m_V - F_Z \\ \min(\varepsilon_Z) \cdot m_V - F_Z \end{array}\right\}}{F_Z} = \frac{\max\left\{\begin{array}{l} |811,44 \cdot 0,2313 - 177,83| \\ |733,84 \cdot 0,2313 - 177,83| \end{array}\right\}}{177,83} = 0,1 \quad (85)$$

El mecanismo para evaluar el error porcentual de las cargas estimadas mediante el modelo lineal propuesto a partir de las deformaciones frente a las cargas de prueba de acuerdo a Maal (2000), se aplicó para cada rueda de los ejes instrumentados y considerando coeficiente elástico calculados en la Tabla 4. Los resultados de los errores porcentuales obtenidos para las cargas verticales $err(m_V)$, laterales $err(m_L)$ y de posición $err(m_P, \varepsilon_P)$ se exponen en la Tabla 5 para cada una de las ruedas de ambos ejes instrumentados:

Tabla 5: Errores obtenidos de comparar el modelo lineal de relación carga/deformación con los valores obtenidos en las pruebas de calibración.

	A1	B1	A2	B2
$err(m_V)$	5,63%	5,36%	6,17%	5,68%
$err(m_L)$	20,93%	21,70%	21,14%	20,86%
$err(m_P, \varepsilon_P)$	7,92%	17,93%	6,95%	7,0%

Como se puede observar en la Tabla 5, el modelo propuesto para las cargas verticales tiene un ajuste que ronda entre 5,36% y 6,17% mínimos y máximos registrados; para las cargas laterales, en cambio se obtuvieron valores entre 20,86% y 21,70% de error máximo; y por último, para la determinación

de la posición del punto de contacto, se registraron diferencias porcentuales de 7,0% a 17,93%. La rueda con valores de error más importantes es la rueda B1, para los modelos laterales y de posición, mientras que para el modelo de cargas verticales, la rueda A2 posee mayor error.

Mediante este modelo se derivan las cargas y la posición del punto de contacto por medio de la información obtenida del sistema de adquisición de datos. El torque y la velocidad ya se encuentran modelados debido a que están compuestos por una única señal cuya proporción con la variable deseada es lineal.

Con la finalidad de validar el modelo, se compararon los resultados obtenidos por la empresa Transportation Technology Center, Inc. frente a los resultados obtenidos utilizando el modelo propuesto. En este trabajo fueron utilizados seis (6) tramos de la Línea 1, específicamente los tramos correspondientes a Capitolio - La Hoyada, La Hoyada - Parque Carabobo, Parque Carabobo - Bellas Artes, Bellas Artes - Colegio de Ingeniero, Chacaíto - Sabana Grande y Gato Negro - Plaza Sucre a fin de implementar una evaluación del modelo lineal para relacionar las cargas con las deformaciones registradas.

Se calculó la diferencia porcentual a partir de los registros de las señales de cada conjunto de puentes de galgas, determinando para cada muestra el valor absoluto máximo de cada señal y luego evaluando la carga de acuerdo al modelo presentado en este trabajo de investigación. Sucesivamente se compararon los valores obtenidos con el sistema de derivación de carga y se determinó el error relativo del modelo propuesto respecto al sistema de Transportation Technology Center, Inc.

En la Tabla 4 se muestra la evaluación realizada para el tramo Capitolio – La Hoyada, el cual Transportation Technology Center, Inc. registro 18557 muestras de las señales obtenidos en los puentes de galga vertical (101V1A,

101V2A, 101V3A, 101V4A de acuerdo a nomenclatura utilizada por el sistema de adquisición de datos) en la rueda A1 para evaluar la carga mediante el modelo propuesto (VA101). La misma tabla indica los valores del sistema de derivación de cargas (MVA101) y la diferencia porcentual entre el ambos valores de carga. Los errores relativos de cada muestra son promediadas a fin de obtener el error promedio planteado para relacionar las deformaciones con las cargas que se expresa al final de tabla.

Tabla 6: Registro de las señales de las galgas extensiométricas en los conjuntos de puente vertical y la evaluación de las cargas mediante el método propuesto y los resultados obtenidos pero el sistema de derivación de cargas para el tramo Capitolio – La Hoyada.

Sample	Tiempo [s]	101V1A [μdef]	101V2A [μdef]	101V3A [μdef]	101V4A [μdef]	Max Abs [μdef]	VA101 [kN]	MVA101 [kN]	Error VA1
0	0,0000	-87,5946	-2,8187	99,1258	261,8869	261,8869	60,6530	59,2658	0,0234
1	0,0039	-86,9113	0,5979	96,3925	260,5202	260,5202	60,3365	59,2858	0,0177
2	0,0078	-87,5946	-0,7687	95,7092	261,8869	261,8869	60,6530	59,3658	0,0217
3	0,0117	-87,5946	-0,7687	96,3925	261,2036	261,2036	60,4947	59,4258	0,0180
4	0,0156	-87,5946	-0,7687	96,3925	263,9369	263,9369	61,1278	59,5057	0,0273
5	0,0195	-88,2779	-1,4521	96,3925	259,1536	259,1536	60,0200	59,5657	0,0076
6	0,0234	-86,2279	-1,4521	97,7592	262,5702	262,5702	60,8113	59,6056	0,0202
7	0,0273	-86,9113	-0,7687	97,7592	261,8869	261,8869	60,6530	59,6456	0,0169
8	0,0313	-87,5946	-0,7687	97,0758	262,5702	262,5702	60,8113	59,6456	0,0195
9	0,0352	-87,5946	-2,1354	96,3925	261,2036	261,2036	60,4947	59,6456	0,0142
10	0,0391	-88,2779	-0,7687	97,0758	261,8869	261,8869	60,6530	59,6056	0,0176
11	0,0430	-88,2779	-6,2354	97,0758	261,8869	261,8869	60,6530	59,5657	0,0183
...
18555	72,4805	-63,6780	-250,8682	-120,2237	-9,3958	250,8682	58,1011	57,9666	0,0023
18556	72,4844	-65,0446	-251,5515	-119,5404	-9,3958	251,5515	58,2593	57,9266	0,0057
18557	72,4883	-63,6780	-250,8682	-116,1237	-10,0791	250,8682	58,1011	57,9066	0,0034
Promedio:									0,071

El procedimiento aplicado en la Tabla 6 es utilizado en cada rueda y cada puente de galga extensiométrica existente en la misma. Las diferencias porcentuales entre los resultados obtenidos por Transportation Technology Center, Inc. y el modelo propuesto están expresados en la Tabla 7 para las señales de las cargas verticales, laterales y de posición:

Tabla 7: Errores porcentuales obtenidos comparando los resultados de Transportation Technology Center, Inc. frente al modelo propuesto que relacionan las deformaciones con las cargas en la rueda.

Tramo	Error %											
	VA1	LA1	PA1	VB1	LB1	PB1	VA2	LA2	PA2	VB2	LB2	PB2
Cap-Hoy	7,12	195,44	27,65	6,68	270,12	23,32	8,32	281,38	37,01	7,66	183,47	34,09
Hoy-Pqc	6,46	265,44	88,40	5,96	208,23	23,54	7,91	292,93	76,33	7,68	254,43	35,84
Pqc-BA	6,79	281,39	87,70	6,27	298,29	23,41	7,88	180,39	70,66	7,86	280,29	34,21
BA-Clng	7,12	194,63	82,29	6,78	264,07	23,41	10,25	166,65	98,86	8,86	72,42	33,23
Cht-SG	6,18	203,47	89,48	7,18	108,39	32,47	6,85	125,13	65,08	7,64	345,31	34,33
GN-PLS	7,18	407,27	80,83	5,81	100,17	24,64	7,24	127,03	40,62	8,23	329,54	38,61
Mayor:	7,18	407,27	89,48	7,18	298,29	32,47	10,25	292,93	98,86	8,86	345,31	38,61

Como se observa en la Tabla 7 los valores máximos del modelo aplicado para el puente de galgas verticales obtuvo mejor precisión con valores que oscilan entre 7,18% a 10,25% siendo la rueda A2 la que obtuvo el mayor error. Para el puente de galgas laterales se obtuvieron altos valores de error máximo que rondan entre 292,93% a 407,27% siendo los más altos registrados respecto a los otros puentes de galgas que integran el sistema. Para las ruedas A1 y A2 en el conjunto de galgas de posición, el modelo propuesto discrepó con los valores obtenidos por la empresa Transportation Technology Center (TTCI) entre 89,48% y 98,86%, mientras que en las ruedas B1 y B2 el error porcentual ronda entre 32,47% a 38,61%.

El logro de la propuesta de Modelo Analítico estableció el comportamiento de las galgas de puente vertical frente a las cargas verticales sometidas en la superficie de la rueda. Para la posición y las cargas laterales, el orden de los valores obtenidos no se encuentra en el rango de valores aceptable: 20% de error en los resultados en la posición del eje corresponde al menos a 14mm de error, el cual acerca a 6 mm el cambio geométrico por efecto del flanco de la rueda.

4.2 Actividades realizadas en campo para la evaluación del comportamiento rueda-riel en el sistema Metro de Caracas C.A.

Durante el tiempo que duró esta investigación se emprendió la tarea de evaluar, mediante el uso de ejes instrumentados, la dinámica ferroviaria presente en el sistema de Metro de Caracas, tanto en la vía de prueba como en un segmento de la Línea 1 del sistema. Esto implicó la instalación y puesta en marcha de un sistema de adquisición de datos entregado a Metro de Caracas por la empresa Transportation Technology Center Inc. (TTCI) y su conexión con el equipo sensor.

Se realizaron tres (3) intentos de pruebas dinámicas siendo la primera efectuada en la vía de prueba de la Línea 3 ubicada en la estación Las Adjuntas. Para ello, la empresa Metro de Caracas, habilitó el uso de un tren de la misma línea y al personal que colaboró en la instalación del equipo y la puesta en marcha del sistema para la realización de los ensayos en Octubre 2011.



Figura 17: Tren habilitado por Metro de Caracas C.A. para la realización de pruebas en la vía de prueba, el cual se le instaló el bogie instrumentados, sin los amplificadores en los extremos del eje.

Las labores de inspección fueron realizadas por el personal de Mediciones Especiales del Metro de Caracas. La tarea consistió en la inspección visual de la integridad física del bogie y la supervisión del correcto aislamiento del sistema de amortiguación. Así mismo se supervisó la aislación del bogie frente al tercer riel ante la eliminación del motor de tracción para evitar las cargas longitudinales producto de la tracción motriz.



Figura 18: Inspección del bogie instrumentado por el personal de mediciones especiales, a fin de garantizar el estado integral de las piezas mecánicas y el correcto aislamiento del sistema de amortiguación.

El montaje del equipo y la logística fue administrada por el personal de la Unidad de Homologación y Sustitución, quienes se encargaron del montaje de los componentes pesados al vagón; así mismo del cumplimiento de los cronogramas establecidos en el plan de trabajo.

El cronograma incluía, además de la inspección integridad estructural del equipo, la realización de un recorrido de evaluación a fin de corroborar las funciones operativas del sistema de adquisición de datos. Luego de verificar el funcionamiento del equipo, se planificó un recorrido a 45 km/h durante 30 segundos, tiempo y velocidades necesarias para calibrar el sistema de derivación de cargas TTCI (2001), para luego recorrer la vía de prueba a velocidad de operación.



Figura 19: Montaje en el tren del sistema de adquisición de datos en el vagón al igual que componentes pesado.

Luego de la instalación y la puesta en marcha del equipo, se hizo presente una falla que dadas las condiciones no permitió la continuidad de las actividades planificadas en la segunda parte del estudio de la dinámica del comportamiento ferroviario. La falla se debió a una elevada tensión de línea que provocó un cortocircuito en los 4 amplificadores del sistema de adquisición de datos, imposibilitando el manejo de las señales adquiridas por los ejes instrumentados.



Figura 20: Muestra de la condición de los fusibles de los amplificadores analógicos.

Pese a la falla acontecida con los amplificadores analógicos, se detalló el uso de elementos de seguridad presentes en el equipo. El equipo, compuesto por 4 amplificadores y un ordenador, incluía además un UPS que se encontraba además conectado a un aislador de tierra. En las conversaciones realizadas con el personal de Mediciones Especiales de Metro de Caracas, se consideró el rol de este componente a fin de evitar acontecimientos motivados a corrientes parasitarias en la conexión a tierra del vagón. Las conexiones eléctricas del sistema de adquisición de datos fueron restituidas para brindar seguridad en las señales del sistema de adquisición de datos.

Las actividades con el eje instrumentado se retomaron una vez que el equipo fue devuelto a las instalaciones de Metro de Caracas C.A en Propatria. Tomando en cuenta la posibilidad de que el aumento de tensión afectara a otros componentes además de los amplificadores, se realizaron pruebas en tierra a fin de comprobar el funcionamiento del equipo. Sin embargo al no poder llevar el bogie a la velocidad de 45 km/h, no se realizaron pruebas en el sistema de interpretación de cargas.



Figura 21: Preparación de los amplificadores móviles ubicados en las ruedas, horas antes de la prueba.

Confirmado el buen estado estructural de la unidad de adquisición de datos, se llevó a cabo una segunda prueba pero en la Línea 1. Para eso fue necesario realizar la prueba a las una (1) am, una vez que los pasajeros desalojaran el sistema. La logística implicó la toma de observaciones desde la estación Propatria hasta la estación Agua Salud.

Si bien la logística de las operaciones fueron exitosas ya que se pudo almacenar información sobre el comportamiento de los ejes instrumentados a lo largo de la vía entre las estaciones Propatria y Agua Salud, al momento de efectuar el análisis de los resultados se presentaron problemas a la hora de retirar la información almacenada en el sistema de adquisición de datos. La configuración realizada en el sistema implicó el uso de un archivo que contenía caracteres no asimilables para el software utilizado para la extracción de la información en el disco.

Evaluando todos los intentos anteriores, la Gerencia de Material Rodante del Metro de Caracas, apoyando la investigación, insiste en la realización de un tercer intento para la realización de las mediciones. Esto conllevó a que se programara, con el apoyo de la Unidad de Mediciones Especiales y la Unidad de Apoyo Técnico a Material Rodante (inicialmente presentada como Unidad de Homologación y Sustitución) una nueva medición de la vía de prueba.



Figura 22: Realización de la tercera prueba con ejes instrumentados.

Se tomaron en cuenta las observaciones de los dos primeros intentos con el fin de evitar los inconvenientes presentados con el sistema de adquisición de datos, resultando que la tercera prueba fuese exitosa, ya que se logró almacenar una serie de muestras a distintas velocidades en la vía de prueba.

El sistema de interpretación de cargas que viene incorporado en el sistema de adquisición de datos presentó problemas y al tratar de solucionarlos, dicho sistema no permitía el acceso al código fuente, por lo que no se pudo solventar las fallas a nivel de software. Tras la realización de la prueba se verificaron las señales de cada puente de galga, resultando sin transmisión las señales de la rueda B1, recibidas por parte del sistema de adquisición de datos.

Al carecer de un modelo de bajo grado de error, se optó por no utilizar la data del sistema de adquisición de datos obtenidos en la tercera prueba y trabajar con la data almacenada por la empresa Transportation Technology Center Inc. en el 2001, siendo el conjunto de resultados de mejor precisión al tener personal disponible con más conocimientos sobre el equipo.

4.3 Evaluación de los resultados obtenidos en la Línea 1 de Metro de Caracas.

Para la validación de los modelos de contacto rueda-riel, se compararon las muestras obtenidas por la empresa Transportation Technology Center Inc. (TTCI) con el juego de ejes instrumentados. Se trabajó con 4 muestras por tramo, tomados en días distintos, para 41 tramos que corresponden de Perez Bonalde a Palo Verde y el correspondiente trayecto de regreso (Palo Verde a Perez Bonalde).

En una primera etapa se compararon los desplazamientos laterales respecto a las cargas longitudinales registradas en cada rueda, tanto en tiempo como entre ambas variables para observar el comportamiento de los deslizamientos siguiendo los modelos de fuga propuestos por Kalker (1991) y expuesto por Iwnicki (2006).

El conjunto de gráficos obtenidos referentes a la relación entre las cargas longitudinales y los desplazamientos laterales están expuestos en los Apéndices B al Apéndice H. Se calculó la velocidad de la rueda para a un radio de 430 mm en cada gráfica como referencia de la situación de arranque y frenado en la que se encuentra el conjunto de ejes instrumentados. Para la exposición en este trabajo se tomó como referencia los resultados de los segmentos de Plaza Sucre a Gato Negro, California a Los Cortijos y Gato Negro a Plaza Sucre, resultados que son semejantes respecto a la relación entre las fugas y las cargas longitudinales similares a los segmentos restantes de la Línea 1.

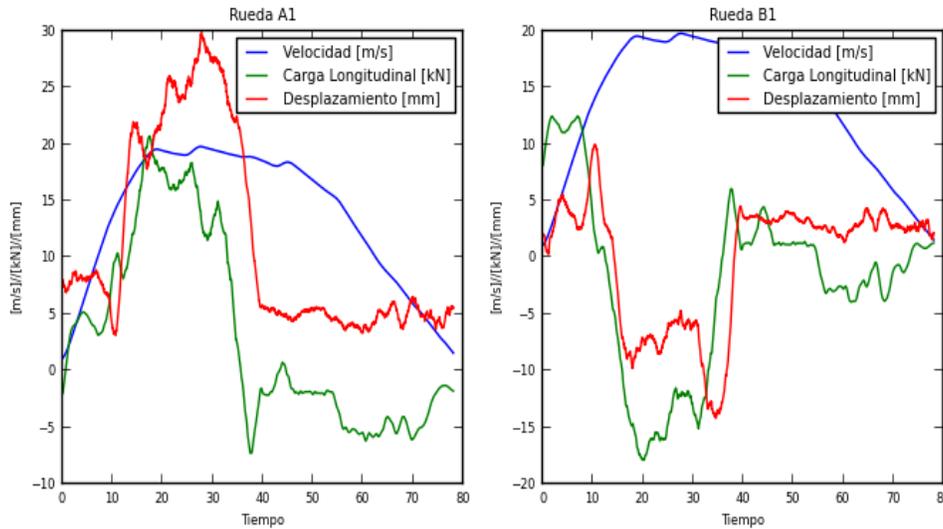


Figura 23: Resultados de las cargas y los desplazamientos laterales y la velocidad en el tiempo, del tramo Plaza Sucre a Gato Negro de las ruedas A1 y B1, extraído del Apéndice B.2

En el conjunto de resultados en los tramos Plaza Sucre a Gato Negro, se observó, de manera cualitativa, que los desplazamientos representados por la curva de color rojo y las cargas longitudinales (curva de color verde) son consonantes respecto al sentido de sus valores. Es decir, para valores de desplazamiento superiores a 10 mm en la rueda A1, las cargas longitudinales se incrementan hasta 20 kN; de manera opuesta se observó en la rueda B1, que para valores de desplazamiento negativos inferiores a 10 mm, las cargas longitudinales reflejan proporcionalidad con el desplazamiento lateral. No obstante, 40 segundos después de iniciar el muestreo, el desplazamiento en ambas ruedas A1 y B1 se mantienen a 5 mm del punto ideal de contacto; de igual manera las cargas longitudinales se mantienen constantes entre -2,5 kN y 0 kN en la ruedas A1 y B1 respectivamente, hasta alcanzados los 52 segundos donde las cargas longitudinales se reducen -2,5 kN en ambas ruedas, al mismo tiempo que la velocidad empieza a descender.

Se evaluó de manera cuantitativamente la relación entre las cargas y los desplazamientos laterales del tramo Plaza Sucre a Gato Negro; para ello se extrajo de la totalidad de los resultados, una muestra para cada 5 segundos, los cuales están representados en la Tabla 8:

Tabla 8: Muestras de la relación Carga vs Posición de la rueda evaluados para cada 5 segundos.

Punto	Tiempo [s]	Carga Fx A1 [kN]	Posición A1 [mm]	Carga Fx B1 [kN]	Posición B1 [mm]
0	0	0,015	5,529	7,189	2,066
1	5	6,818	5,555	10,329	4,164
2	10	10,980	1,279	2,028	9,637
3	15	16,525	18,782	-8,461	-3,685
4	20	19,827	20,331	-18,833	-7,207
5	25	19,617	23,113	-15,554	-5,911
6	30	15,283	24,912	-14,482	-6,067
7	35	4,061	19,270	-3,757	-13,559
8	40	-0,001	3,194	0,164	3,580
9	45	1,570	2,071	2,017	3,260
10	50	-0,069	3,022	0,378	3,930
11	55	-1,439	1,881	-1,552	2,661
12	60	-3,521	1,056	-3,768	1,563
13	65	-2,099	2,537	-3,198	3,982
14	70	-3,998	3,933	-2,087	2,767
15	75	0,335	1,944	0,174	2,318

En los puntos del 3 al 7, se observa que en la rueda A1, los desplazamientos laterales alcanzan valores superiores a 20 mm y de igual manera los valores de carga longitudinal para esos puntos alcanzan valores cercanos a los 20kN. En contraposición para la rueda B1, se obtuvo valores absolutos de desplazamiento lateral relativamente bajos comparados con los

resultados de la rueda A1 (entre -3mm a -7mm) alcanzando cargas entre -14 kN a -18 kN.

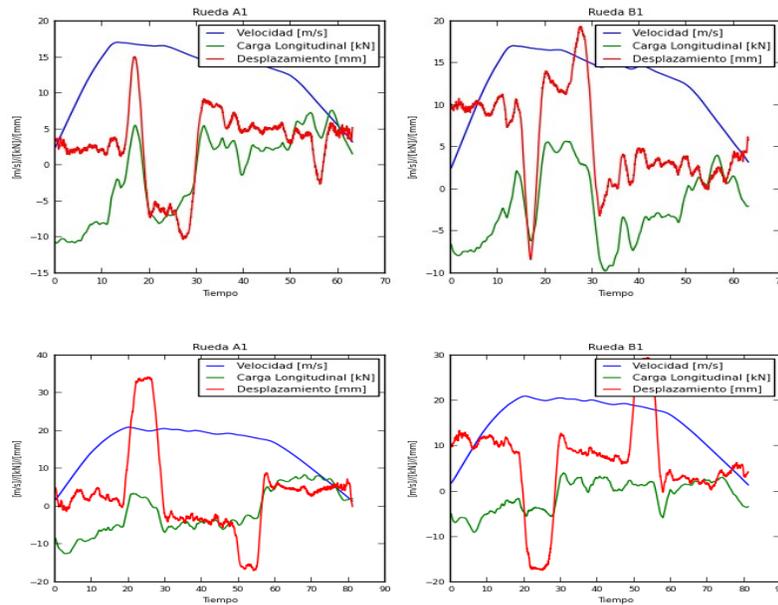


Figura 24: Resultados de las cargas y las fugas en la dirección longitudinal y la velocidad en función del tiempo, para los tramos California a Los Cortijos y Gato Negro a Plaza Sucre de las ruedas A1 y la rueda B1, extraído del Apéndice B.23 y el Apéndice B.39

Para los resultados observados en los tramos de California a Los Cortijos y de Gato Negro a Plaza Sucre los cuales se exponen en la Figura 24, el comportamiento observado fue similar al tramo de Plaza Sucre a Gato Negro, en lo que respecta a la relación carga contra desplazamiento, donde los valores de desplazamiento son proporcionales a las cargas longitudinales. Al contrario del tramo Plaza Sucre a Gato Negro, donde se observa reducción e incremento de las cargas longitudinales por efecto de la aceleración y frenado.

Considerando los aspectos de las cargas en la rueda y del desplazamiento lateral, en los cuales se observó correlación entre ambas variables, se evaluó la relación entre las fugas longitudinales según el modelo de Iwnicki (2006) que

vincula el desplazamiento lateral de la rueda con deslizamiento y las cargas longitudinales.

4.3.1 Evaluación de los modelos proporcionalidad de fuga longitudinal.

Luego de inspeccionar la interacción entre las cargas longitudinales y desplazamiento laterales en el tiempo, se elaboró el estudio del comportamiento de las cargas longitudinales, en función a las fugas en la misma dirección, mediante el modelo expresado en Iwnicki (2006), donde la correlación entre las fugas longitudinales ε y el desplazamiento lateral y son directamente proporcionales entre si, por un factor geométrico que se deriva de la conicidad de la rueda γ y el radio ideal de contacto r_o .

$$\varepsilon = \frac{\gamma y}{r_o} \quad (86)$$

Para la inspección de la relación entre las cargas y las fugas longitudinales, se construyeron las cuarenta (40) gráficas del Apéndice C correspondientes a la relación entre la cargas longitudinales y la fuga en la misma dirección, expresando las cargas en función de las fugas, al igual que se señalaron puntos correspondientes a lapsos de tiempo comprendidos en múltiplos de 5 segundos.

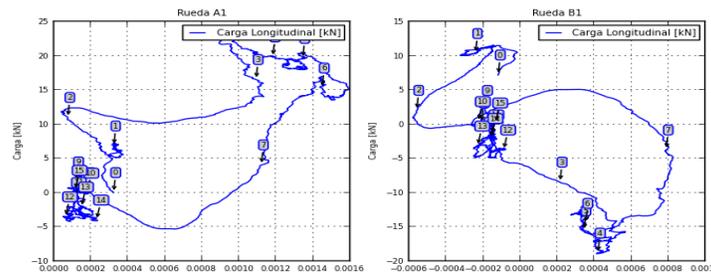


Figura 25: Relación Cargas vs Fuga en la dirección longitudinal, utilizando el modelo de fuga expresado en Iwnicki (2006) para el tramo Plaza Sucre a Gato Negro, extraído del Apéndice C.2

Los resultados obtenidos mediante el modelo expresado en Iwnicki (2006) para fugas longitudinales, donde éstas son directamente proporcionales a los desplazamientos laterales, se observó un agrupamiento de los datos en los puntos del 9 a 16, correspondientes a los 45 y 80 segundos de muestreo, en los cuales se observa en la Figura 23, corresponden a un lapso de tiempo en la cual el desplazamiento lateral y las cargas no cambiaron su magnitud de manera significativa respecto a los tiempos de viaje entre 15 a 45 segundos (puntos 3 al 9) donde los desplazamientos y las cargas cambiaron de manera significativa.

En la Figura 25 se observa en ambos gráficos que este comportamiento lleva a cabo un segundo agrupamiento, cuya transición entre uno y otro pasa por los puntos 2 y 7, es decir a 10 y 21 segundos. Salvo por los agrupamientos mencionados, no se observaron tendencias significativas en el comportamiento entre las cargas y las fugas longitudinales en el tramo presentado.

Comparando las cargas de la rueda A1 y B1, se observa que para valores de desplazamiento lateral altos (superiores a 20mm) las cargas longitudinales son proporcionales al desplazamiento y de igual manera representan altos valores de carga (superiores a 15 kN), considerando que a partir de los 20 segundos, el tren mantiene velocidad constante, como se observa en los resultados de las cargas y los desplazamientos laterales (Figura 23). De manera opuesta, en la rueda B1, para valores de desplazamiento relativamente bajos

(entre 15mm a 0mm) ambas negativas, se obtuvieron valores de carga de mayor magnitud pero en sentido opuesto (menos de -15kN).

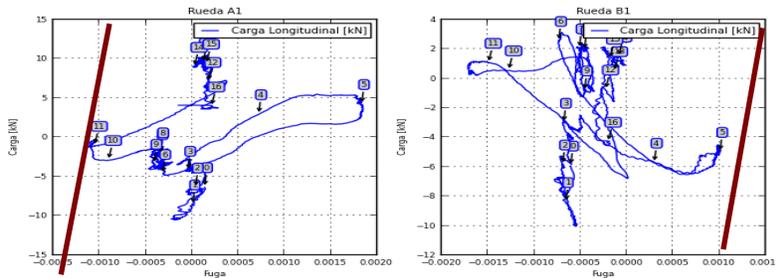


Figura 26: Relación de Cargas vs Fuga en la dirección longitudinal, para el modelo de fuga expresado en Iwnicki (2006) para el tramo California a Los Cortijos, extraído del Apéndice C.23

Para el tramo La California a Los Cortijos, se observa una tendencia lineal (paralela a recta roja de guía) que pasa por los puntos del 0 al 3 y prosigue del 13 al 16, correspondientes a los lapsos de tiempo entre 0 a 15 segundos y 65 a 80 segundos, los que corresponden al arranque y frenado del tren. Para ambos gráficos, los puntos correspondientes del 6 al 9 mantuvieron tendencias lineales con los valores encontrados del 0 al 3 y del 13 al 16. Los puntos de transición 4, 5, 10 y 11 corresponden a cambios significativos en el desplazamiento lateral de la rueda.

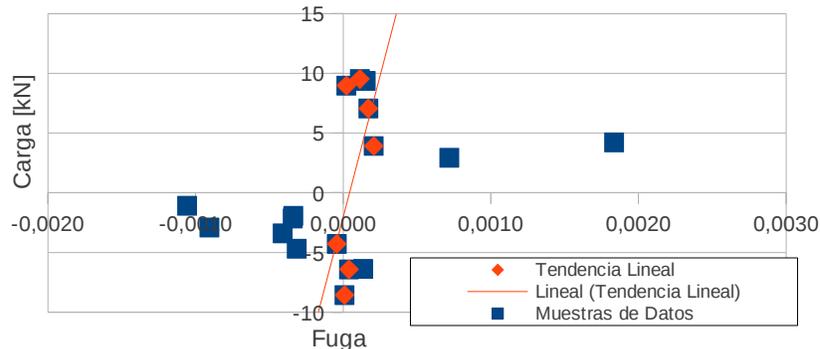


Figura 27: Tendencia lineal de las muestras seleccionadas en la relación de Carga vs Fuga longitudinal en la rueda A1.

La tendencia lineal observada fue evaluada y segmentando los resultados de carga contra la fuga longitudinal en muestras de 5 segundos y se presentaron los puntos que forman la recta de ajuste lineal.

Se observa que la tendencia lineal de los puntos que conforman los grupos del 0 al 3 y del 13 al 16, pasa cerca del origen de coordenadas, lo que entra en correspondencia con el modelo de contacto rueda-riel de Kalker (1971) que para valores de fuga inferiores al 1% ó 0.01 el comportamiento entre las cargas longitudinales y las fugas en la misma dirección se mantiene lineales hasta valores limite de Coloumb.

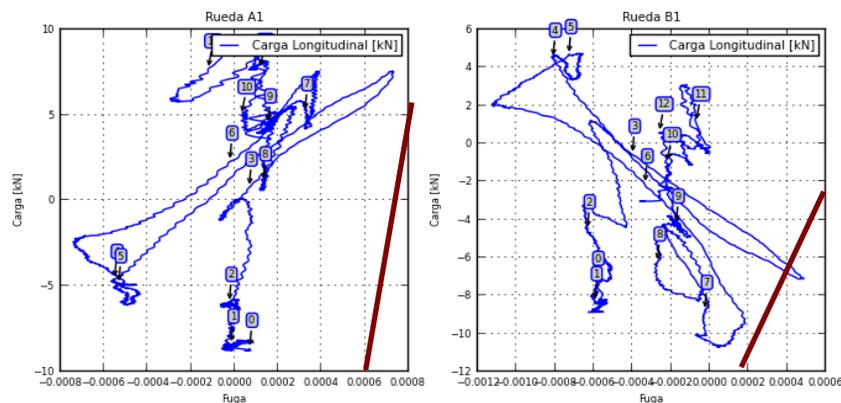


Figura 28: Relación Cargas vs Fuga en la dirección longitudinal, utilizando el modelo de fuga expresado en Iwnicki (2006) para el tramo Gato Negro a Plaza Sucre, extraído del Apéndice C.39

Al igual que la relación Cargas vs Fuga en la dirección longitudinal para las estaciones California a los Cortijos, en el tramo Gato Negro a Plaza Sucre, se observa en el arranque y frenado mantiene tendencia lineal, pasando por los puntos del 0 al 3 y del 8 al 11, con mayor difusión en la rueda B1 que en la rueda A1; mientras que los picos 4, 5 y 7 corresponden a cambios repentinos en el desplazamiento lateral durante tramos a velocidad constante.

Presentado la relación de las cargas longitudinales respecto a las fugas en la misma dirección se observa que, para puntos de bajo desplazamiento, se marca una tendencia lineal de los valores obtenidos por Transportation Technology Center, Inc. Este comportamiento corresponde al esperado por Kalker (1971), sin embargo la dispersión localizada para puntos con altos valores de desplazamiento implica la necesidad de modificar el modelo de fuga planteado por Iwnicki (2006) para ajustar a las condiciones de la vía del Metro de Caracas.

4.3.2 Sustitución del modelo de proporcionalidad de fuga longitudinal para incluir variaciones en el radio ideal de contacto.

A fin de poder entender los motivos por los cuales el comportamiento del tramo Plaza Sucre a Gato Negro no poseía tendencia lineal, se optó por la modificación del modelo presentado por Iwnicki (2006) y acercar a la expresión vectorial expresada en Shabanna et al (2008) donde las fugas ξ son reflejadas directamente por la diferencia de velocidades de traslación respecto a la rueda:

$$\xi = \frac{V_x^R - V_x}{V_x} \quad (87)$$

Partiendo del modelo expuesto en Shabanna et al (2008) se plantea un modelo para la determinación de las fugas longitudinales, en el cual se asume que la velocidad de traslación aparece en un punto en común del perfil de la rueda tal que el desplazamiento relativo de la rueda es proporcional a la fuga. De modo que la fuga longitudinal ξ viene expresada en función de la conicidad de la rueda γ , del radio ideal de contacto r_0 y de los desplazamientos laterales y_A y y_B :

$$\xi = \frac{\gamma(y_A - y_B)}{r_0 - \gamma(y_A + y_B)} \quad (88)$$

Los resultados obtenidos, que se encuentran incluidos en el Apéndice E, se computaron para los mismos tramos, a fin de determinar un comportamiento común en todos los tramos para establecer las características del contacto rueda-riel desde la perspectiva del fenómeno.

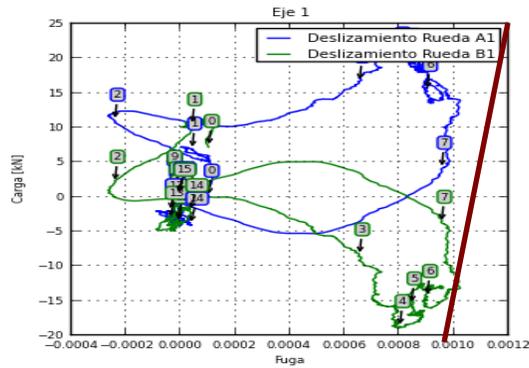


Figura 29: Resultados obtenidos en el eje 1 para el tramo Plaza Sucre a Gato Negro, considerando fugas proporcionales al desplazamiento relativo de la rueda respecto a un radio común, extraído del Apéndice D.2

Se obtuvo como resultado para el tramo Plaza Sucre a Gato Negro, expuesto en el Figura 29, un comportamiento lineal en los puntos 0, 1 y del 9 al 16, los cuales en la Figura 25 presentaban agrupamiento generalizado. Así mismo se mantuvo un agrupamiento entre los puntos 4, 5, 6 y 7 con dispersión generalizada. Una marcada tendencia lineal (paralela a la línea roja) se observa en los puntos de 0 al 1 y del 9 a 16.

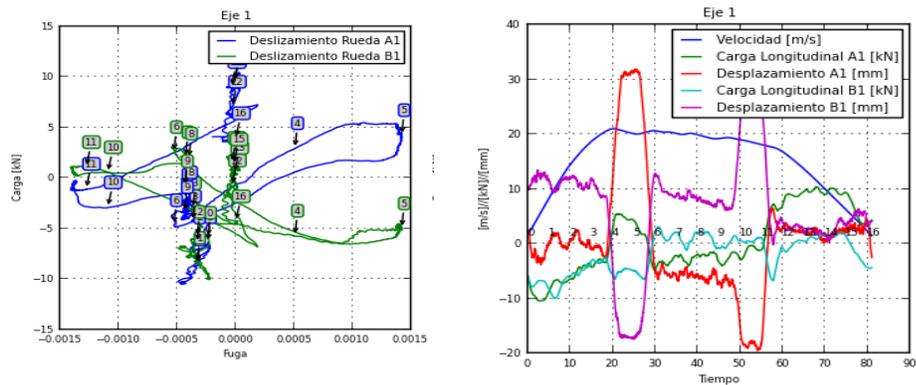


Figura 30: Resultados obtenidos en el eje 1 para el tramo California a Los Cortijos, considerando fugas proporcionales al desplazamiento relativo de la rueda respecto a un radio común, extraído del Apéndice D.23

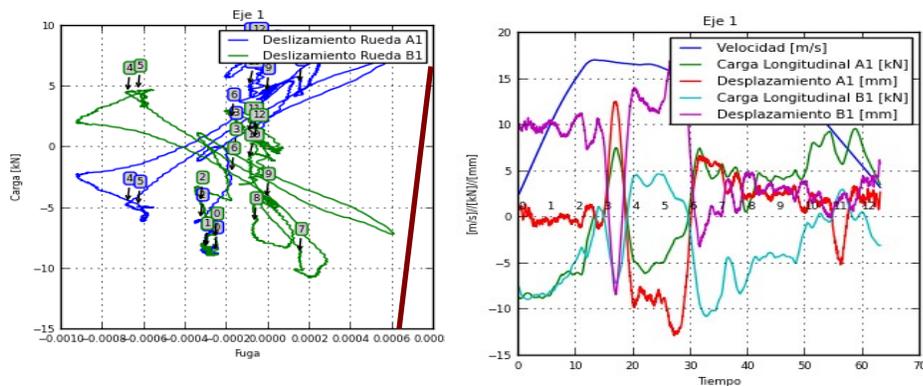


Figura 31: Resultados obtenidos en el eje 1 para el tramo Gato Negro a Plaza Sucre, considerando fugas proporcionales al desplazamiento relativo de la rueda respecto a un radio común, extraído del Apéndice D.39

En la Figura 30 y la Figura 31, los comportamientos observados al considerar las fugas proporcionales al desplazamiento relativo de la rueda respecto a un radio común para los tramos entre California a Los Cortijos y de Gato Negro a Plaza Sucre se observó un comportamiento lineal entre los puntos del 0 al 3 y del 8 al 11.

Los cambios propuestos en el modelo de fuga longitudinal de Iwnicki (2006) permitieron la visualización de la tendencia lineal entre las cargas y las

fugas longitudinales para el tramo Plaza Sucre a Gato Negro. Sin embargo, para altos valores de desplazamiento, el comportamiento visualizado no mantiene la tendencia lineal respecto a los puntos de bajo desplazamiento, por lo que se plantea sustituir el modelo Iwnicki (2006), por un modelo que integre la geometría de la rueda para distintos valores de desplazamiento lateral.

4.3.3 Modificación del modelo que incluye variaciones en el radio ideal de contacto para el cálculo de fuga longitudinal, para considerar la geometría de la rueda.

Se observa que la dispersión se concentra principalmente en los momentos que el eje se encuentra trasladado significativamente a un lado del carril; se asume entonces la posibilidad que la causa del fenómeno se deba al contacto del flanco de la rueda con el riel, pudiendo ocasionar altos valores de fuga que no fueron evaluados apropiadamente. Para ello se plantea una vez más, una propuesta de módulo de fuga, discretizando la geometría de la rueda y su pendiente. De modo que la fuga longitudinal es expresada en función a la distancia entre el eje y el punto de contacto en el perfil de la rueda según el desplazamiento de la misma ($r(y)$):

$$\xi = \frac{r_A(y_A) - r_B(y_B)}{r_A(y_A) + r_B(y_B)} \quad (89)$$

Para ello se generó un programa escrito en Python, denominado Profile.py que se encuentran en el Apéndice A del trabajo, donde $r(y)$ parte de la geometría del perfil de la rueda implementada en Metro de Caracas.

Los tramos fueron computados, cuyos resultados se encuentran en el apéndice F, a fin de verificar cualitativamente el comportamiento del contacto rueda riel desde el nuevo planteamiento de fugas longitudinales.

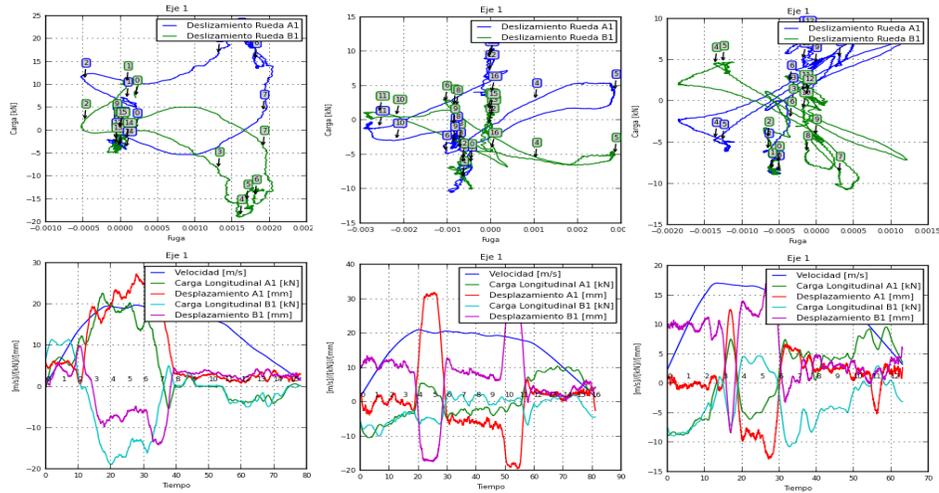


Figura 32: Resultados obtenidos mediante la modificación del modelo de fuga longitudinal para incluir la totalidad de la geometría de la rueda para los tramos Plaza Sucre a Gato Negro, California a Los Cortijos y Gato Negro a Plaza Sucre, extraído de los Apéndice E.2, Apéndice E.23 y Apéndice E.39

Al comparar los resultados obtenidos del modelo de fuga longitudinal para incluir la totalidad de la geometría del perfil de la rueda con los resultados obtenidos para una figura geométrica cónica sin cambios por el flanco, se logra apreciar que el problema de dispersión presente en la información, no se debe a la geometría del flanco de la rueda.

Considerando que las fugas para variaciones en la geometría del perfil de la rueda fueron incluidas sin cambios en la tendencia lineal de los resultados, se estableció la necesidad de modificar el manejo de las cargas tangenciales a fin de incluir el comportamiento de la tracción en el análisis.

4.3.4 Consideraciones de tracción y frenado.

La falta de linealidad en el comportamiento entre las cargas longitudinales y las fugas se debe en gran medida a que el eje se encuentra sometido a tracción y frenado, lo que explica el hecho de que exista tracción sin

desplazamiento lateral, es decir, es necesario un nuevo enfoque en la tracción del eje, ya que el mismo no está solamente sometido al deslizamiento sino también a consideraciones de tracción efectuados por el motor. Por ello se plantea nuevamente un modelo, pero enfocado hacia separar la tracción del motor.

Se considera que al no tener datos en vía sobre la curvatura en tiempo real para superponer al modelo, se asume que la vía es recta a lo largo del sistema, la tracción utilizada en la dinámica es el promedio de las cargas mientras que el comportamiento llevado a cabo por el deslizamiento es la diferencia entre ellas.

$$F_{\xi} = \frac{F_{XA} - F_{XB}}{2} \quad (90)$$

Los resultados obtenidos bajo esta consideración forman parte del Apéndice G. Con respecto al modelo de fuga longitudinal, para la operación fue considerado el modelo de Iwnicki (2006). Luego, en el Apéndice H se incluyeron los resultados al unificar el modelo planteado considerando tanto la geometría como el radio común de contacto y la diferencia de cargas en el punto de contacto de rueda.

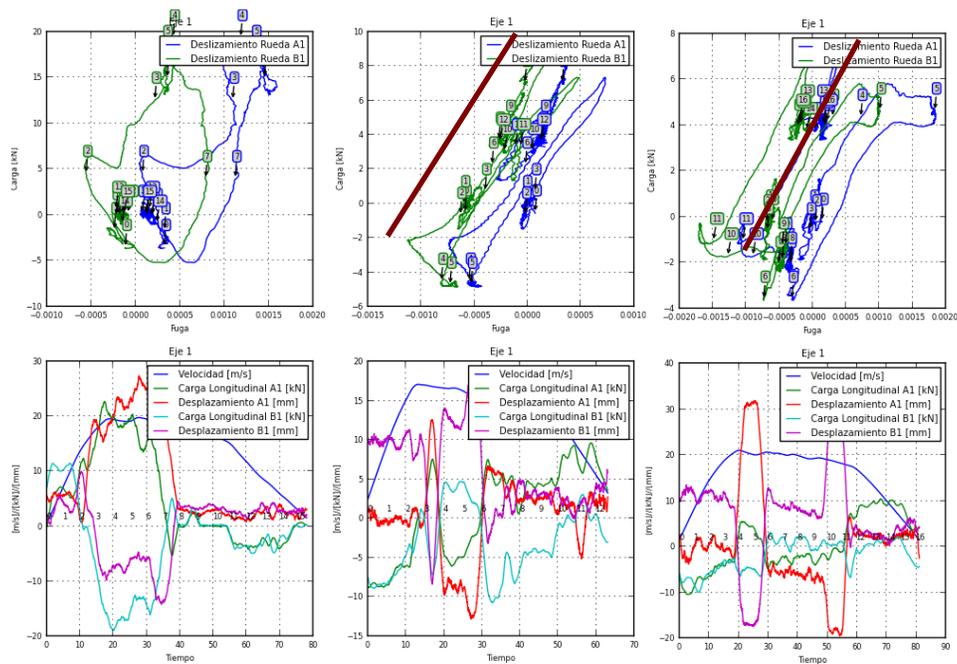


Figura 33: Resultados obtenidos mediante la consideración del despeje de cargas por tracción motriz para los tramos Plaza Sucre a Gato Negro, California a Los Cortijos y Gato Negro a Plaza Sucre, extraído de los Apéndice F.2, Apéndice F.23 y Apéndice F.39

En resultados obtenidos en la nueva propuesta de eliminación de la cargas por tracción se observa mayor linealidad de los resultados obtenidos en los tramos de “California” a “Los Cortijos” y de “Gato Negro” a “Plaza Sucre” (Figura 33); en este caso se observa la formación de rectas de tendencia lineal, paralelas entre si, como se puede comparar con la recta de color rojo que identifica una tendencia de módulo 53,33 MN. Para el tramo “Plaza Sucre” a “Gato Negro”, el comportamiento de los puntos donde se establece el comportamiento difuso adquiere ahora una tendencia lineal, de pendiente negativa; esta observación se hace presente en ambos agrupamientos.

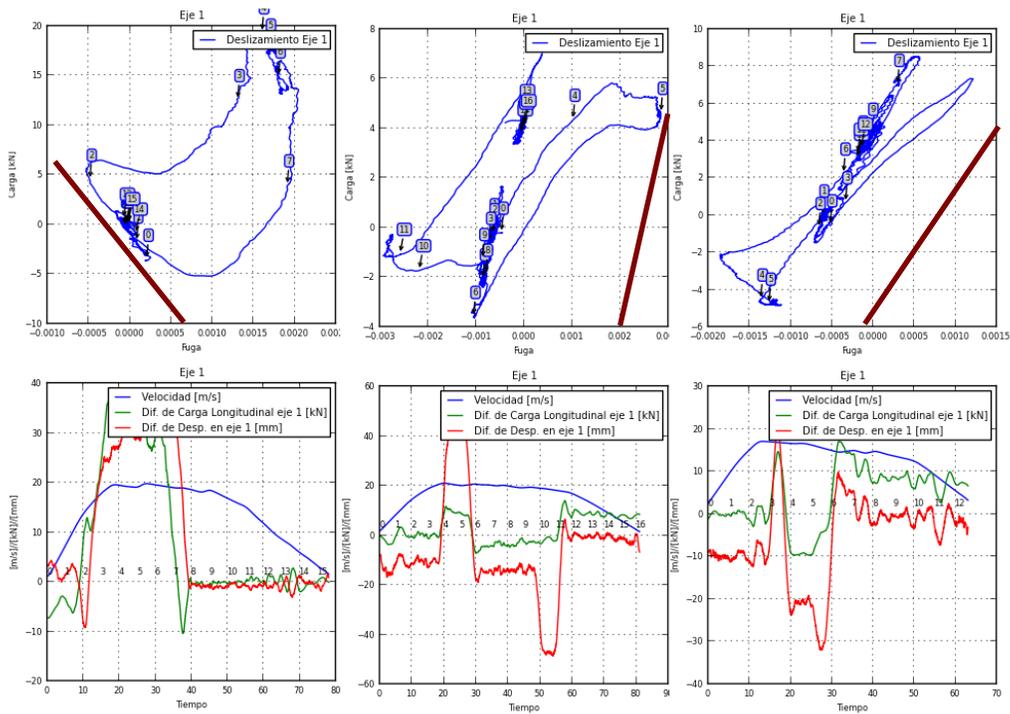


Figura 34: Resultados obtenidos mediante la consideración del despeje de cargas por tracción motriz y las consideraciones de radio común para fugas longitudinales considerando la totalidad de la geometría de la rueda, para los tramos "Plaza Sucre" a "Gato Negro", "California" a "Los Cortijos" y "Gato Negro" a "Plaza Sucre", extraído de los Apéndice G.2, Apéndice G.23 y Apéndice G.39

Bajo las consideraciones de tracción diferencial, despejando la tracción común entre ambas ruedas, se observa nuevamente una tendencia marcada en los tramos de California a Los Cortijos y Gato Negro a Plaza Sucre (Figura 34). Para los puntos del tramo Plaza Sucre a Gato Negro que conforman el agrupamiento al momento de máximo desplazamiento, se observa una naciente tendencia lineal (representada por la línea roja a los extremo del gráficos) paralela a la observada en el agrupamiento inferior, la cual corresponde a los puntos de menor desplazamiento.

Considerando la aparición de relaciones lineales entre las fugas longitudinales y las cargas por deslizamiento en la dirección de traslación, se propuso determinar, de manera cuantitativa para cada tramo de la línea de las observaciones realizadas por la empresa Transportation Technology Center, Inc (TTCI).

Inicialmente se evaluó la propuesta presentada por Iwnicki (2006) en la cual se presentan las fugas longitudinales en función de un radio ideal de contacto. Al contrastar los resultados obtenidos en prueba de vía, se observó que en puntos particulares del tramo presentaban un distanciamiento de la trocha (separación de la distancia entre rieles) que modificaba las condiciones de velocidad ya que el radio de la rueda para mantener una velocidad constante se traslada a un punto distinto del radio de diseño, dando lugar a la propuesta de radio común de contacto, y posteriormente se le incluyeron aspecto de la geometría de la rueda.

La comparación de la relación entre las fugas y las cargas longitudinales, luego de modificarse el modelo de determinación de fugas adaptándolo a condiciones no ideales, estableció la necesidad de efectuar modificaciones en la evaluación de las cargas a fin separarlas por tracción y por deslizamiento, siendo las últimas de interés para el trabajo de investigación.

Bajos las consideraciones de separación de cargas por deslizamiento y de radio común de contacto mecánico se evaluaron en total más de 2 millones 97 mil muestras (2.097.000 muestras) que se compararon con los modelos de Kalker (1971), Shen et al c.p. Kalker (1991) Y Polach (1999).

4.4 Evaluación de los modelos de contacto rueda-riel.

La evaluación de los modelos de contacto rueda-riel, descritos por Kalker (1971), Shen et al c.p. Kalker (1991) y Polach (1999) consistió en determinar la diferencia calculada entre las cargas por deslizamiento y aquellas estimadas por

los modelos de contacto rueda-riel. El proceso de cómputo demoró 25 horas, y los resultados se encuentran en el Apéndice H de este trabajo.

Al evaluar el modelo de contacto rueda-riel FASTSIM presentado por Kalker (1982) en la cual se considera la estimación de la distribución de presiones tangenciales en la superficie para la determinación de las cargas tangenciales, la potencia de cálculo superó las características del ordenador donde se ejecutaron. Los modelos basados en la estimación de la distribución de presiones tangenciales requiere la evaluación mediante diferencias finitas de la superficie; por lo que es necesario pasos de cálculos proporcionales al número de puntos a evaluar en la superficie. Vollebregt et al (2011) establece que una malla de 100 x 100 presenta unos buenos resultados, lo que implicaba 10.000 puntos de evaluación que operan por cada muestra.

El modelo propuesto por Limongi y Gómez (2011), bajo la cual se considera la elasticidad de las irregularidades en la superficie, presentó las mismas complicaciones que el modelo de FASTSIM al evaluar tramos de la Línea 1. El modelo parte del algoritmo de Kalker (1982) pero modificando la perspectiva del límite de la distribución de presiones tangencial según los parámetros de rugosidad de la superficie.

Para los modelos Kalker (1971), Shen et al c.p. Kalker (1991) Y Polach (1999), la potencia de cálculo necesario para la evaluación de los tramos de la Línea 1, requirió de más de 1 Gb de memoria ram, ya que al evaluar mediante un ordenador tipo netbook con procesador 1,6 ghz y con 1 gb de memoria ram, el compilador de Python arrojó problemas de memoria para realizar la tarea, por lo que fue indispensable la realización de las tareas de cómputo en un ordenador de 4gb ram.

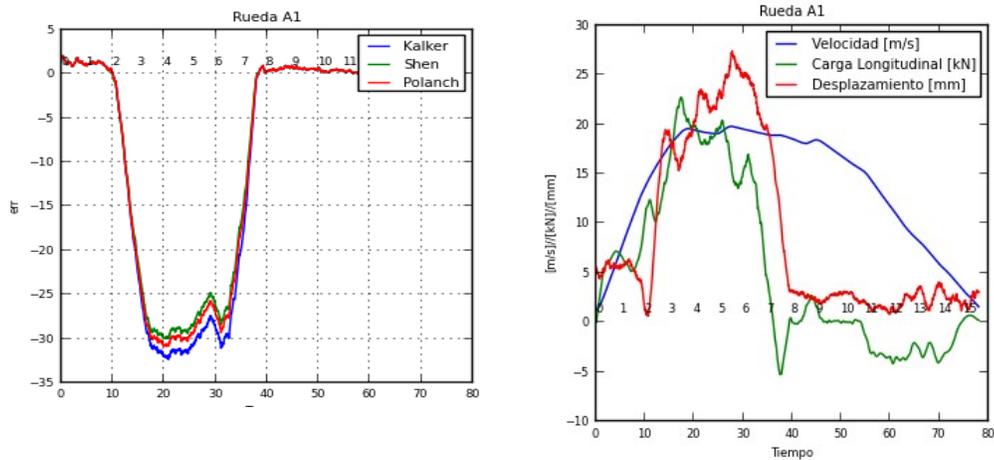


Figura 35: Diferencia entre las cargas calculadas mediante los modelos de contacto rueda riel: Kalker, Shen y Polanch a lo largo del tiempo de recorrido del tramo "Plaza Sucre" a "Gato Negro", extraído de los Apéndice H.2

Los resultados obtenidos en lo que respecta a la diferencia entre las cargas calculadas mediante los modelos de contacto rueda-riel en el tramo "Plaza Sucre" a "Gato Negro", se compararon en el tiempo con los desplazamientos de las ruedas. Se pudo observar que para bajos desplazamientos laterales, los modelos de contacto rueda riel, obtuvo una baja diferencia en la cargas longitudinales respecto a los obtenidos por ejes instrumentados. El mayor grado de dispersión se observó para altos valores de desplazamiento, donde la magnitud de las cargas estimadas mediante los modelos de contacto rueda riel fueron menores a las obtenidas mediante ejes instrumentados, si se implementan las consideraciones de carga por tracción del tren y radio común de desplazamiento.

El análisis de los resultados comprendió el estudio del comportamiento de las fugas longitudinales, mediante los modelos aplicados para la estimación de la magnitud en función del desplazamiento lateral y las modificaciones realizadas, a fin de incluir aspectos de la geometría presentes en la trocha de la vía. Se pudo, a través de los planteamientos realizados por Iwnicki (2006) y

Shabanna et al (2008), incluir tanto las características de la vía como los de la geometría de la rueda y el riel para los modelos de fuga, considerando los desplazamientos laterales, los cuales fueron incorporados en el programa Profile.py presentado en el Apéndice A.

En lo que respecta al estudio de las cargas, se elaboró un procedimiento a fin de separar las cargas por tracción de las cargas por deslizamiento, siendo estas últimas la base del fenómeno estudiado en este trabajo de investigación y su relación con el comportamiento de las fugas longitudinales.

Considerando las cargas por deslizamiento y las fugas longitudinales desde la perspectiva de las condiciones reales presentes en la Línea 1, se evaluaron los modelos de contacto rueda-riel de Kalker (1971), Shen et al c.p. Kalker (1991) Y Polach (1999), con valores cercanos a los reales para segmentos de vía con bajo desplazamiento lateral.

Todo lo descrito en la interpretación y análisis de los resultados conlleva a conclusiones y recomendaciones que se indican a continuación en el Capítulo 5.

CAPÍTULO 5. - CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En la determinación del comportamiento dinámico ferroviario bajo la influencia del fenómeno de deslizamiento, se consolidaron las bases teóricas recorridas a lo largo de más 200 años de investigación y se contrastaron con la realidad, mediante el uso de medios tecnológicos presentes y disponibles en la actualidad bajo la forma de ejes instrumentados.

La investigación se enfocó en la validez del uso de los modelos de contacto rueda-riel con la finalidad de establecer un instrumento para el análisis del comportamiento del contacto rueda-riel mediante el uso de ejes instrumentados. La utilidad de este instrumento se centra en la evaluación de geometría de la vía y sus efectos en la dinámica ferroviaria.

5.1 Conclusiones

Se desarrollaron rutinas de cálculo para la descripción del área de contacto entre las superficies de la rueda y el riel según el desplazamiento lateral de la rueda y la geometría del perfil de ambos cuerpos en el programa ContactMod.py bajo los parámetros de Iwnicki (2006) y Shabanna et al (2008).

Fue diseñado un modelo que relaciona el comportamiento de las deformaciones en la pared de la rueda y su interacción con las cargas en el punto de contacto. El modelo parte de un diseño analítico, las evaluaciones dieron una convergencia de 5% a 7% para cargas verticales y en la posición del punto de contacto; y de 20% para las cargas laterales. Se elaboró un modelo viable para su uso en pruebas de vía controladas.

Comparando los resultados con evaluaciones realizadas en vía y con el sistema de derivación de cargas del sistema de adquisición de datos el error

porcentual obtenido para las señales de carga vertical fue máximo de 10%, al comparar el modelo propuesto con los resultados entregados por la empresa Transportation Technology Center, Inc.

Las características de los modelos de relación lineal de Kalker, la formulación empírica Shen-Hendrick-Elckins y el método de cálculo rápido de Polanch fueron incluidos el programa ContactMod.Py utilizados para evaluar el contacto rueda-riel, bajo fugas longitudinales, así como también en fugas laterales y rotacionales.

En la evaluación de los tramos de la Línea 1 mediante los modelos de contacto rueda riel, se determinó que para bajos desplazamiento laterales, los modelos de contacto rueda-riel divergen con un máximo de error de 2 kN. Sin embargo para altos valores de desplazamiento, la diferencia entre el modelo y los resultados supera los 10 kN, incluso alcanzando valores de 30 kN, lo que evidencia que se puede implementar los modelos de contacto rueda-riel para la evaluación de segmento de vías rectas cuyas condiciones geométricas no lleven a altos valores de desplazamiento lateral.

Se analizó el comportamiento rueda-riel a lo largo de la Línea 1 del Metro de Caracas, comparándolos con los modelos de contacto rueda-riel elaborados por Kalker, Shen-Hendrick-Elckins y Polanch; considerando las observaciones realizadas por Iwnicki (2006) y Shabanna et al (2008) sobre el comportamiento de las fugas.

5.2 Recomendaciones.

Sobre la base las discusiones, análisis y los resultados obtenidos a lo largo de esta investigación, se proponen las siguientes recomendaciones, tanto de los instrumentos utilizados para el análisis de información que se maneja en la evaluación del comportamiento ferroviario, como de los implementos y equipos usados para la recolección de datos en vía:

- Se recomienda como tema de investigación la elaboración de un programa, con ambiente visual, para la evaluación de los resultados obtenidos con los ejes instrumentados a fin de realizar los análisis necesarios en lo que se refiere a las características de la vía y al comportamiento dinámico del riel en función del comportamiento rueda-riel mediante el uso de los ejes instrumentados.
- Para brindarle al equipo de adquisición de datos capacidad de ejecutar tareas multidisciplinarias se requiere la actualización del núcleo operativo del sistema de adquisición de datos a Linux 3.4 e instalar un software de adquisición de datos.
- Determinar las relaciones inversas entre las deformaciones y las cargas mediante el uso de métodos numéricos para a fin de establecer un modelo utilitario de relación carga/deformación considerando que el método analítico propuesto diverge de los resultados obtenidos por la Transportation Technology Center, Inc. no siendo recomendable su uso para la evaluación del comportamiento de contacto rueda-riel.
- Elaborar un modelo de fuga que integre bajos y altos valores de desplazamiento lateral, a fin de reducir la divergencia de los valores obtenidos con los modelos de contacto rueda-riel.
- El diseño y fabricación de un banco de prueba para bogies, a ser utilizado en la preparación del equipo de ejes instrumentados la cual consiste en la calibración de los amplificadores de los ejes instrumentados, la calibración del sistema de derivación de cargas, así como la instrumentación del mismo para evaluar diferentes perfiles de ruedas y su interacción en el contacto rueda-riel.

Bibliográfia

- Carter, F. W (1926). On the action of a locomotive driving wheel. Proceedings of the Royal Society of London. Series A. Mathematical and Physical Sciences
- Kalker J. J. (1971). Survey of Wheel-Rail Rolling Contact Theory. Vehicle System Dynamics
- Kalker J. J. (1991). Wheel-rail rolling contact theory. Wear
- O. Polach (1999). A fast wheel-rail forces calculation computer code. Proc. of the 16th IAVSD Symposium
- Kalker J. J. (1982). A Fast Algorithm for the Simplified Theory of Rolling Contact. Vehicle System Dynamics
- Hertz, H. (1896). Miscellaneous Papers. Macmillan and Co.
- Popov, V.L. (2010). Contact Mechanics and Friction: Physical Principles and Applications. Springer.
- Shabanna A., Zaazaa K., y Sugiyama H. (2008). Railroad Vehicle Dynamics: A Computational Approach. CRC Taylor & Francis.
- Iwnicki, S. (2006). Handbook of railway vehicle dynamics. CRC/Taylor & Francis.
- Vollebregt, E.A.H. and Wilders, P. (2011). FASTSIM2: a second-order accurate frictional rolling contact algorithm. Computational Mechanics
- Kalker J. J. (2000). Rolling Contact Phenomena: Linear Elasticity. Department of Applied Mathematical Analysis, Delft University of Technology, The Netherlands

- Greenwood, J. A. y Williamson, J. B. P. (1966). Contact of Nominally Flat Surfaces. Proceedings of the Royal Society of London. Series A. Mathematical and Physical Sciences
- Maal L.,2000.Medidas de carga de alta exactitud juegos de rueda de los carros de transito..
- González L.,2001.Estudio de factibilidad operativa de los bogies de Simulación dinámica de modelos NUCARS el cual permite representar el comportamiento dinámico de los vehiculos ferroviarios dependiendo de la geometría de la vía y obtener la evaluación del sietema tren-vía de la compañía Metro de Caracas C.A..Metro de Caracas C.A.
- Transportation Technology Center, Inc (2001). Resultados de pruebas de vía en Linea 1 con Ejes instrumentados.
- Pombo, J. and Ambrósio, J. (2008). Application of a wheel–rail contact model to railway dynamics in small radius curved tracks. Multibody System Dynamics
- Kalker J. J. , Dekking F.M. and Vollebregt E. (1990). Simulation of Rough Elastic Contacts.
- Johnson, K.L. (1987). Contact mechanics. Cambridge University Press.
- Limongi, E y Gómez, A (2011). Propuesta de un Modelo de Comportamiento Elástico del Contacto Rueda Riel en Función a la Rugosidad de la Superficie.
- Timoshenko, S.P. and Goodier, J.N. (1970). Theory of elasticity. McGraw-Hill.
- Bowden, F. P. and Tabor, D. (1939). The Area of Contact between Stationary and between Moving Surfaces. Proceedings of the Royal Society of London. Series A. Mathematical and Physical Sciences

Greenwood, J. A. y Williamson, J. B. P. (1966). Contact of Nominally Flat Surfaces. Proceedings of the Royal Society of London. Series A. Mathematical and Physical Sciences

Hernández R., Fernández C. y Baptista L. (1991). Metodología de la Investigación. McGraw-Hill.

TTCI (2001). . Transportation Techonoloy Center Inc.

G. van Rossum y F.L. Drake (2001).Codigo de programación Python.

Apéndices.

Apéndice A:
Fuente de programas creados en Python.

A1) Programa Profile.Py

```
1. """
2.
3. @author: Alejandro Gómez
4. """
5. import numpy as np
6.
7. def deslizamiento(POA,POB):
8.     #Parametrización de la rueda.
9.     xo=[0.,1.541,28.378,30.923,37.959,53.102,105.,130.,135.]
10.    yo=[10.,17.705,20.132,13.14,5.035,0.845,-1.75,-5.5,-10.5]
11.    xr=[15.318,45.018,54.9]
12.    yr=[14.95,18.27,36.8]
13.    r=[14.05,15.,36.]
14.
15.    #Geometria de la curvatura 1 de la rueda.
16.    x1=np.arange(xo[1],xo[2],0.01)
17.    y1=np.sqrt(r[0]**2-(xr[0]-x1)**2)+yr[0]
18.
19.    #Geometria de la curvatura 2 de la rueda.
20.    x2=np.arange(xo[3],xo[4],0.01)
21.    y2=-np.sqrt(r[1]**2-(xr[1]-x2)**2)+yr[1]
22.
23.    #Geometria de la curvatura 3de la rueda.
24.    x3=np.arange(xo[4],xo[5],0.01)
25.    y3=-np.sqrt(r[2]**2-(xr[2]-x3)**2)+yr[2]
26.
27.    #Unificación de todos los punto.
28.    xf=np.hstack((xo[0],x1,x2,x3,xo[6:]))-70.
29.    yf=np.hstack((yo[0],y1,y2,y3,yo[6:]))+430.
30.
31.    #Interpolación del punto del perfil de acuerdo al desplazamiento lateral
32.    yA=np.interp(POA,xf,yf)
33.    yB=np.interp(POB,xf,yf)
34.
35.    return (yB-yA)/(yB+yA)
```

A2) Programa Profile.Py

```
1. # -*- coding: utf-8 -*-
2. """
3. @author: alejandro
4. """
5. import numpy as np
6. import scipy as sp
7. import scipy.interpolate as spi
8.
9. #---Funciones utilizadas en el programa:
10. #--Relacion de diametros de contacto segun hertz
11. def areahertz(y_desv,Q,L):
12.     #Propiedades de los materiales:
13.     EW=210*10**9 #Modulo de Young de la rueda. [Pa]
14.     vW=0.25 #Modulo de poisson de la rueda.
15.     ER=210*10**9 #Modulo de Young de la riel. [Pa]
16.     vR=0.25 #Modulo de poisson de la riel.
17.     G=EW/(2*(1+vW)) #[Pa]
18.     #Constantes elasticas para contacto mecanico.
19.     k1=(1-vW**2)/(np.pi*EW) #Constante elastica de la rueda
20.     k2=(1-vR**2)/(np.pi*ER) #Constante elastica de la riel
21.     xo=[0.,1.541,28.378,30.923,37.959,53.102,105.,130.,135.]
22.     yo=[10.,17.705,20.132,13.14,5.035,0.845,-1.75,-5.5,-10.5]
23.     xr=[15.318,45.018,54.9]
24.     yr=[14.95,18.27,36.8]
25.     r=[14.05,15.,36.]
26.     x1=np.arange(xo[1],xo[2],0.01)
27.     y1=np.sqrt(r[0]**2-(xr[0]-x1)**2)+yr[0]
28.     x2=np.arange(xo[3],xo[4],0.01)
29.     y2=-np.sqrt(r[1]**2-(xr[1]-x2)**2)+yr[1]
30.     x3=np.arange(xo[4],xo[5],0.01)
31.     y3=-np.sqrt(r[2]**2-(xr[2]-x3)**2)+yr[2]
32.     xf=np.hstack((xo[0],x1,x2,x3,xo[6:]))-60.
33.     yf=np.hstack((yo[0],y1,y2,y3,yo[6:]))+430.
34.     angle=np.interp(y_desv,xf[:-1],np.diff(yf)/np.diff(xf))
35.     R_wx=np.interp(y_desv,xf,yf)/np.cos(angle)/1000.
36.     N=Q*np.cos(angle)+L*np.sin(angle)
37.     if y_desv<=(37.959-60):
38.         R_wy=-15.
39.         R_rx=np.inf
40.         R_ry=0.013
41.     elif y_desv<=(53.102-60):
42.         R_wy=-36.
43.         R_rx=np.inf
```

```

44.         R_ry=0.013
45.     else:
46.         R_wy=np.inf
47.         R_rx=np.inf
48.         R_ry=0.080
49.     exiangle=np.linspace(0,90,19)
50.
51.     m_list=np.array([1000,10,6.6,4.805,3.815,3.178,2.729,2.394,2.135,1.926,1.754,1.611,1.486,1.3
78,1.284,1.202,1.128,1.061,1.])
52.     m_list.reshape(-1,1)
53.     n_list=np.array([0,0.300,0.313,0.366,0.412,0.454,0.493,0.531,0.567,0.604,0.641,0.678,0.717,0.
759,0.802,0.846,0.893,0.944,1.])
54.     n_list.reshape(-1,1)
55.     #Se genera una funcion para determinar m y n
56.     m_detect=splines.interp1d(exiangle,m_list)
57.     n_detect=splines.interp1d(exiangle,n_list)
58.     #--Hertsprop determina la escala de los diametros
59.     #principales 'm' y 'n'
60.     A=0.5*(1./R_wx+1./R_rx)
61.     B=0.5*(1./R_wy+1./R_ry)
62.     AB=A+B
63.     BA=abs(B-A)
64.     Div_ab=180*(np.arccos(BA/AB))/np.pi
65.     m=m_detect(Div_ab)
66.     n=n_detect(Div_ab)
67.     a=m*sp.special.cbrt((3*np.pi*N*(k1+k2))/(4*AB))
68.     b=n*sp.special.cbrt((3*np.pi*N*(k1+k2))/(4*AB))
69.     return a,b,G,N
70. def KalkerConstant(a,b,v):
71.     #--Constantes de Kalker.
72.     #--Constantes de Kalker.
73.     #Valores de C_11
74.     C_11_0_1=np.array([2.47,2.51,2.59,2.68,2.78,2.88,2.98,3.09,3.19,3.29])
75.     C_11_0_2=np.array([3.40,3.51,3.65,3.82,4.06,4.37,4.84,5.57,6.96,10.7])
76.     C_11_0=np.hstack((C_11_0_1,C_11_0_2))
77.     C_11_1_1=np.array([3.29,3.31,3.37,3.44,3.53,3.62,3.72,3.81,3.91,4.01])
78.     C_11_1_2=np.array([4.12,4.22,4.36,4.54,4.78,5.10,5.57,6.34,7.78,11.7])
79.     C_11_1=np.hstack((C_11_1_1,C_11_1_2))
80.     C_11_2_1=np.array([4.93,4.85,4.81,4.80,4.82,4.83,4.91,4.97,5.05,5.12])
81.     C_11_2_2=np.array([5.20,5.30,5.42,5.58,5.80,6.11,5.57,7.34,8.82,12.9])
82.     C_11_2=np.hstack((C_11_2_1,C_11_2_2))
83.     #Matriz final C_11
84.     C_11_m=np.vstack((C_11_0,C_11_1,C_11_2))
85.

```

```

86.
87.     #Valores de C_22
88.     C_22_0_1=np.array([2.47,2.51,2.59,2.68,2.78,2.88,2.98,3.09,3.19,3.29])
89.     C_22_0_2=np.array([3.40,3.51,3.65,3.82,4.06,4.37,4.84,5.57,6.96,10.7])
90.     C_22_0=np.hstack((C_22_0_1,C_22_0_2))
91.     C_22_1_1=np.array([2.47,2.52,2.63,2.75,2.88,3.01,3.14,3.28,3.41,3.54])
92.     C_22_1_2=np.array([3.67,3.81,3.99,4.21,4.50,4.90,5.48,6.40,8.14,12.8])
93.     C_22_1=np.hstack((C_22_1_1,C_22_1_2))
94.     C_22_2_1=np.array([2.47,2.53,2.66,2.81,2.98,3.14,3.31,3.48,3.65,3.82])
95.     C_22_2_2=np.array([3.98,4.16,4.39,4.67,5.04,5.56,6.31,7.51,9.79,16.0])
96.     C_22_2=np.hstack((C_22_2_1,C_22_2_2))
97.     #Matriz final C_11
98.     C_22_m=np.vstack((C_22_0,C_22_1,C_22_2))
99.
100.     #Valores de C_23
101.     C_23_0_1=np.array([0,0.334,0.483,0.607,0.720,0.827,0.930,1.03,1.13,1.23])
102.     C_23_0_2=np.array([1.33,1.44,1.58,1.76,2.01,2.35,2.88,3.79,5.72,12.2])
103.     C_23_0=np.hstack((C_23_0_1,C_23_0_2))
104.     C_23_1_1=np.array([0,0.473,0.603,0.715,0.823,0.929,1.03,1.14,1.25,1.36])
105.     C_23_1_2=np.array([1.47,1.59,1.75,1.95,2.23,2.62,3.24,4.32,6.63,14.6])
106.     C_23_1=np.hstack((C_23_1_1,C_23_1_2))
107.     C_23_2_1=np.array([0,0.731,0.809,0.889,0.977,1.07,1.18,1.29,1.40,1.51])
108.     C_23_2_2=np.array([1.63,1.77,1.94,2.18,2.50,2.96,3.70,5.01,7.89,18.0])
109.     C_23_2=np.hstack((C_23_2_1,C_23_2_2))
110.     #Matriz final C_23
111.     C_23_m=np.vstack((C_23_0,C_23_1,C_23_2))
112.
113.     g1=np.arange(0,1,0.1)
114.     g2=1./np.arange(1,0,-0.1)
115.     g=np.hstack((g1,g2))
116.     C11list=[]
117.     for i in C_11_m.T:
118.         C11list.append(np.interp(v,[0,0.25,0.50],i))
119.         C22list=[]
120.     for i in C_22_m.T:
121.         C22list.append(np.interp(v,[0,0.25,0.50],i))
122.         C23list=[]
123.     for i in C_23_m.T:
124.         C23list.append(np.interp(v,[0,0.25,0.50],i))
125.
126.     C11=np.interp(a/b,g,C11list)
127.     C22=np.interp(a/b,g,C22list)
128.     C23=np.interp(a/b,g,C23list)
129.     return C11,C22,C23
130.
131.     #--Define las características del contacto según la

```

```

132.     #posicion del contacto
133.
134.
135.     def Kalker(y,desl,Q,L,mu):
136.         a,b,G,N=areahertz(y,Q,L)
137.         c11,c22,c23=KalkerConstant(a,b,0.25)
138.         fx=-G*a*b*c11*desl[0]
139.         if abs(fx)>mu*N:
140.             fx=mu*N*np.sign(fx)
141.             fy=-G*a*b*c22*desl[1]-G*a*b*np.sqrt(a*b)*c23*desl[2]
142.         if abs(fy)>mu*N:
143.             fy=mu*N*np.sign(fy)
144.         return fx,fy
145.
146.     def Shen(y,desl,Q,L,mu):
147.         #Calcula las cargas longitudinales y laterales considerando las cargas obtenidas
148.         #por el
149.         #modelo de Kalker, suavizando la curva de obtenida por el modelo lineal de
150.         #Kalker.
151.         fx,fy=Kalker(y,desl,Q,L,mu)
152.         xo=[0.,1.541,28.378,30.923,37.959,53.102,105.,130.,135.]
153.         yo=[10.,17.705,20.132,13.14,5.035,0.845,-1.75,-5.5,-10.5]
154.         xr=[15.318,45.018,54.9]
155.         yr=[14.95,18.27,36.8]
156.         r=[14.05,15.,36.]
157.         x1=np.arange(xo[1],xo[2],0.01)
158.         y1=np.sqrt(r[0]**2-(xr[0]-x1)**2)+yr[0]
159.         x2=np.arange(xo[3],xo[4],0.01)
160.         y2=-np.sqrt(r[1]**2-(xr[1]-x2)**2)+yr[1]
161.         x3=np.arange(xo[4],xo[5],0.01)
162.         y3=-np.sqrt(r[2]**2-(xr[2]-x3)**2)+yr[2]
163.         xf=np.hstack((xo[0],x1,x2,x3,xo[6:]))-60.
164.         yf=np.hstack((yo[0],y1,y2,y3,yo[6:]))+430.
165.         angle=np.interp(y,xf[:-1],np.diff(yf)/np.diff(xf))
166.         N=Q*np.cos(angle)+L*np.sin(angle)
167.         F_t=np.sqrt(fx**2+fy**2)
168.         if F_t<3*(mu*N):
169.             ft=(mu*N)*((F_t/(mu*N))-((F_t/(mu*N))**2)/3+((F_t/(mu*N))**3)/27)
170.         else:
171.             ft=(mu*N)
172.         fx=ft*(fx/F_t)
173.         fy=ft*(fy/F_t)
174.         return fx,fy
175.
176.     def Polanch(y,desl,Q,L,mu):
177.         #El modelo requiere determinar la fuga tangencial, para ello se calcula la fuga
178.         #lateral

```

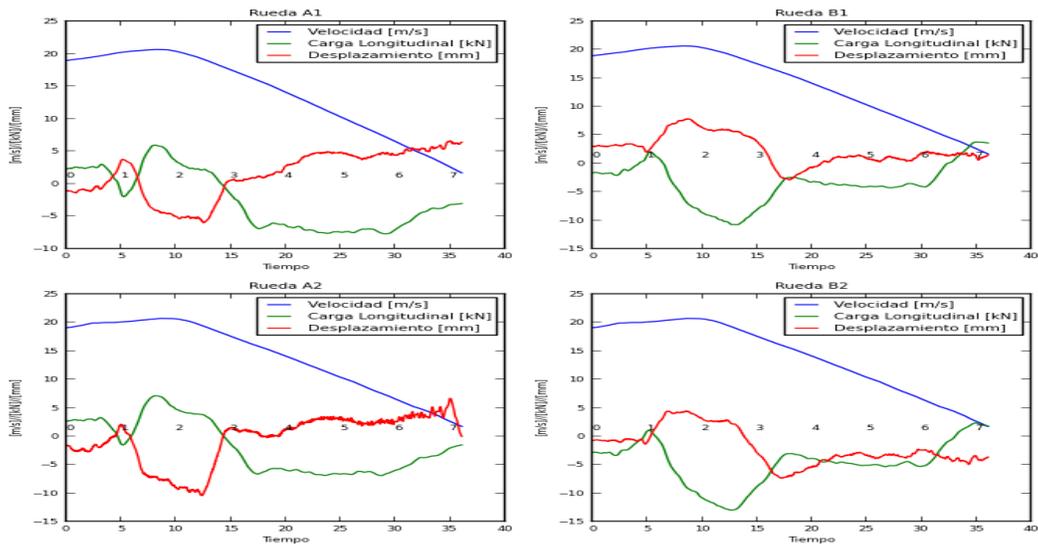
```

175.         #considerando la fuga rotacional.
176.         a,b,G,N=areahertz(y,Q,L)
177.         if abs(desl[1]+desl[2]*a)>abs(desl[1]):
178.             vy=desl[1]+desl[2]*a
179.         else:
180.             vy=desl[1]
181.         v=np.sqrt(desl[0]**2+vy**2)
182.         c11,c22,c23=KalkerConstant(a,b,0.25)
183.         cjj=np.sqrt((c11*desl[0]/v)**2+(c22*desl[1]/v)**2)
184.         #Gradiente de deformacion
185.         eta=0.25*G*np.pi*a*b*cjj*v/(mu*N)
186.         ft=-((2*mu*N/np.pi)*(eta/(1+eta**2))+np.arctan(eta))
187.         fx=ft*desl[0]/v
188.         fy=ft*desl[1]/v
189.         return fx,fy
190.
191.

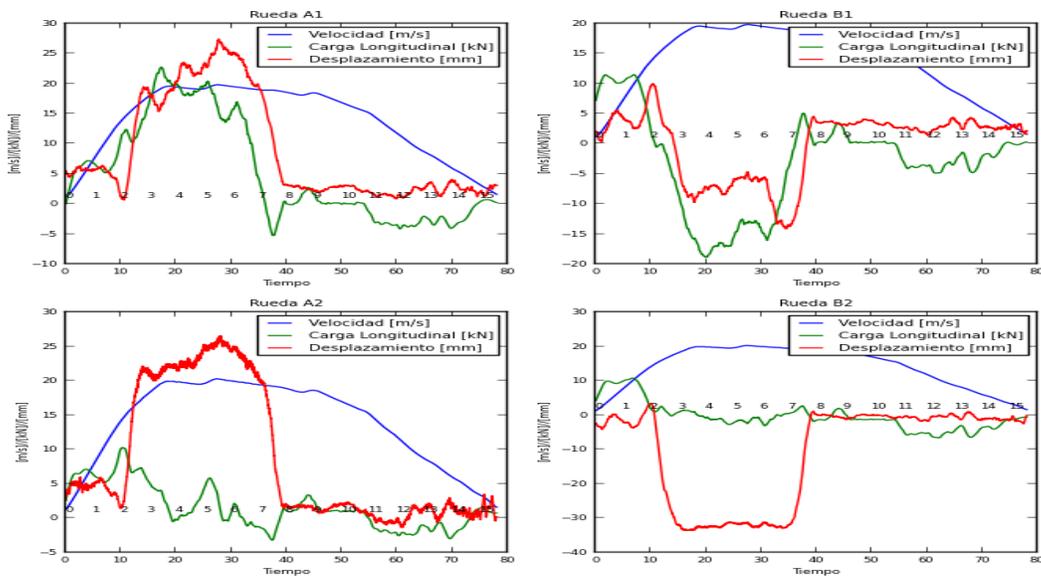
```

Apéndice B:
Gráficos de los cargas longitudinales y el desplazamiento lateral en el tiempo registrados por la empresa Transportation Technology Center, Inc. en cada tramo de la Línea 1

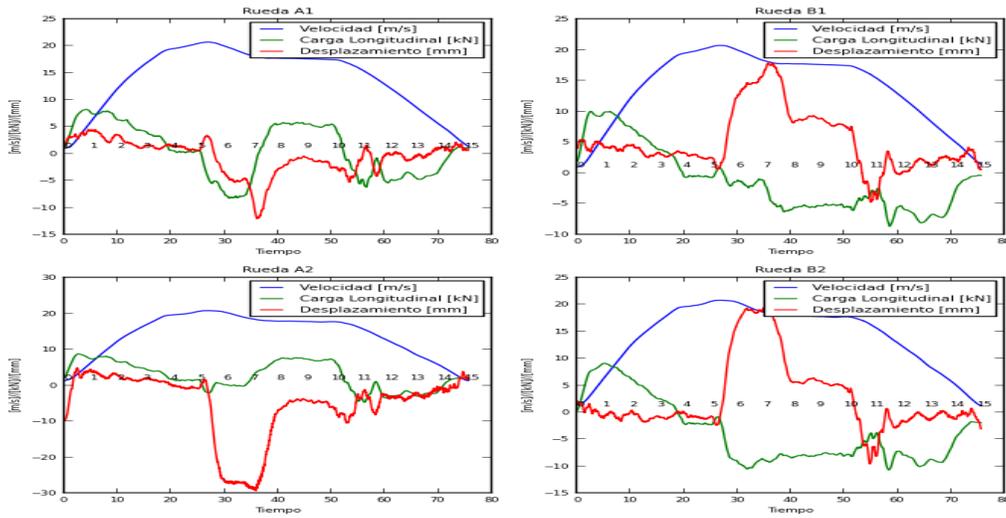
B.1) Tramo “Perez Bonalde” a “Plaza Sucre”



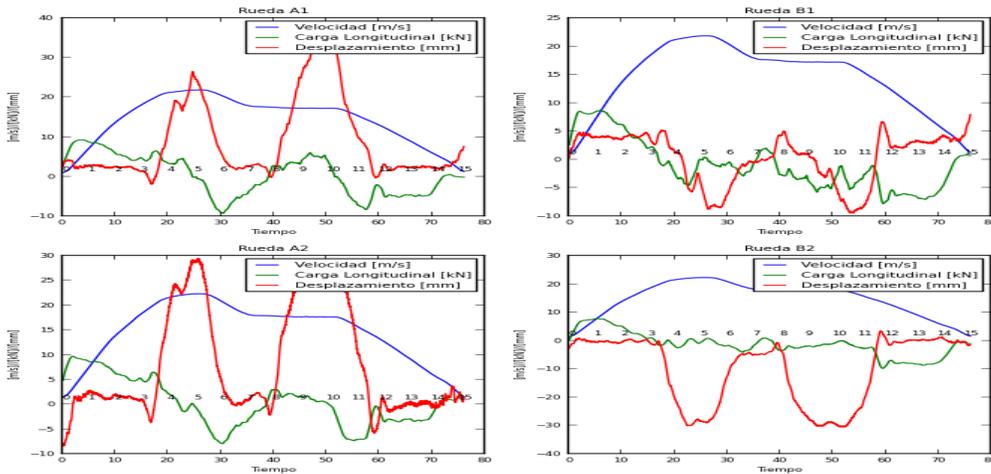
B.2) Tramo “Plaza Sucre” a “Gato Negro”



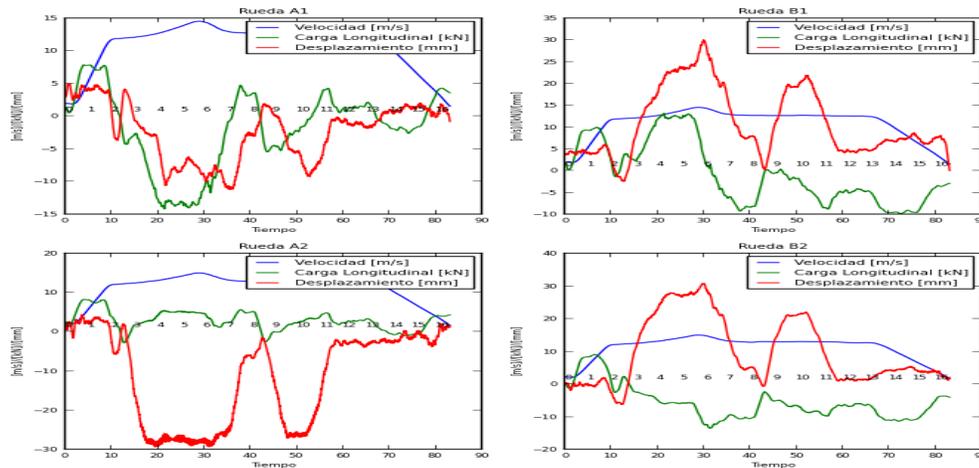
B.3) Tramo “Gato Negro” a “Agua Salud”



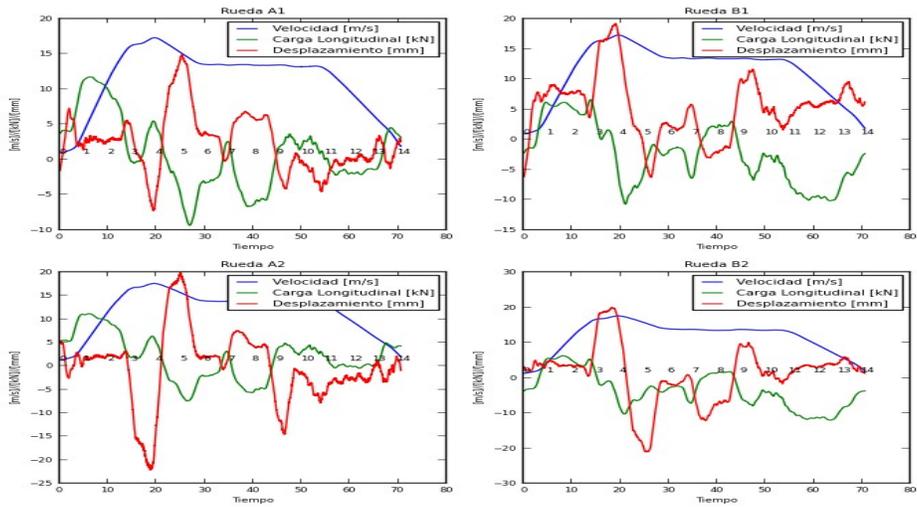
B.4) Tramo “Agua Salud” a “Caño Amarillo”



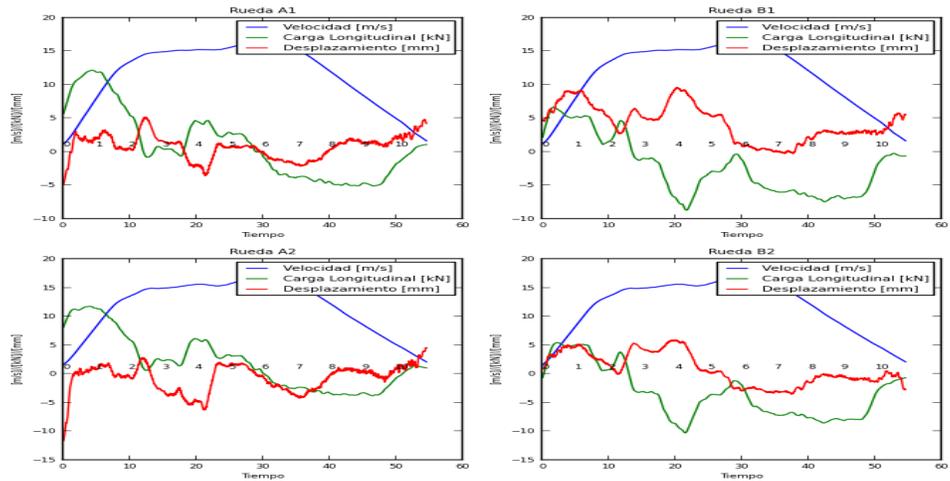
B.5) Tramo “Caño Amarillo” a “Capitolio”



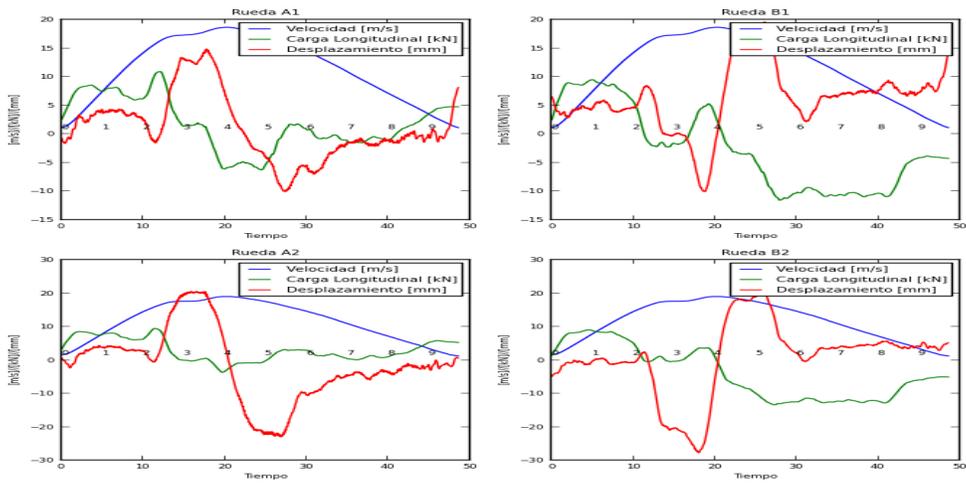
B.6) Tramo “Capitolio” a “Hoyada”



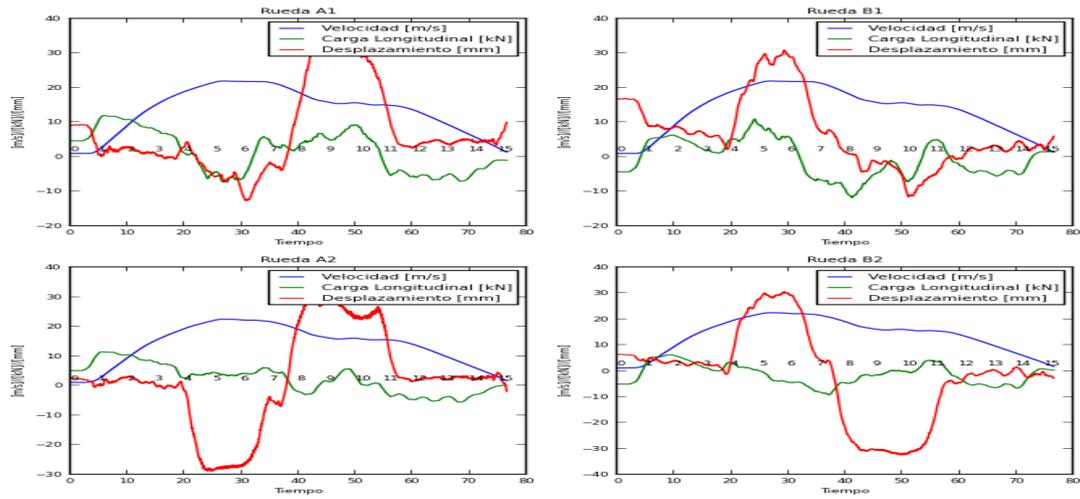
B.7) Tramo “Hoyada” a “Parque Carabobo”



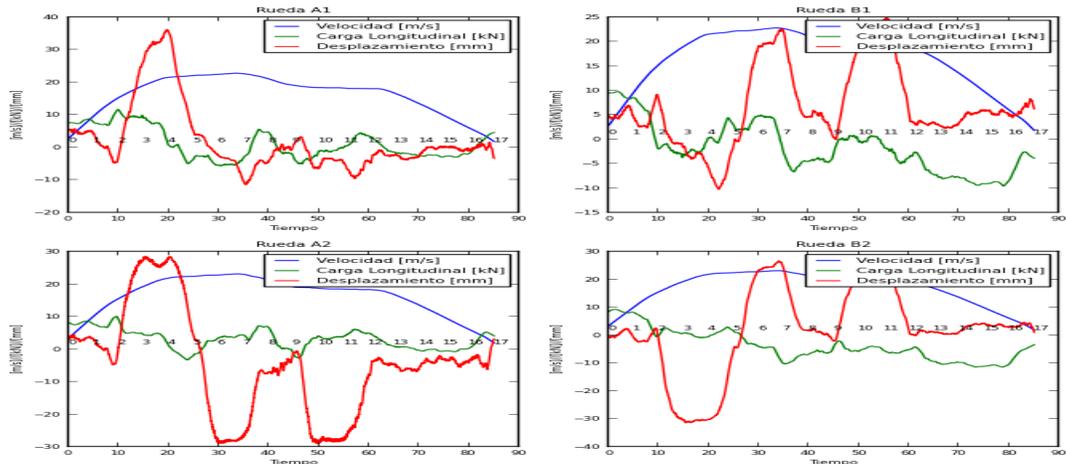
B.8) Tramo “Parque Carabobo” a “Bellas Artes”



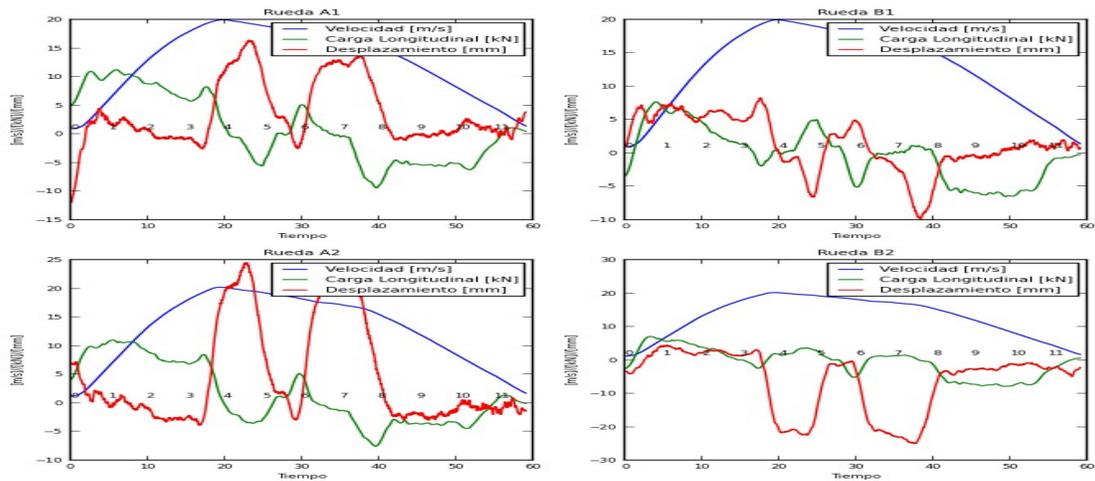
B.9) Tramo “Bellas Artes” a “Colegio de Ingenieros”



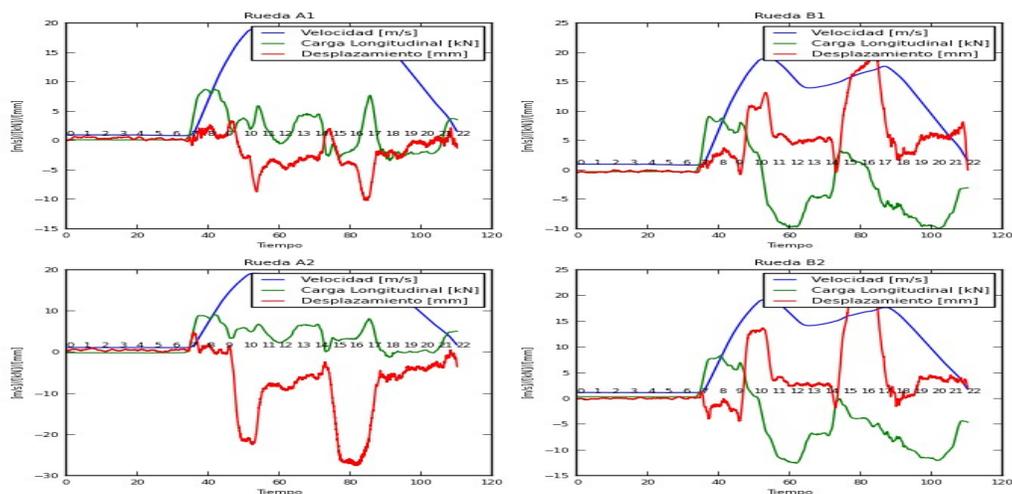
B.10) Tramo “Colegio de Ingenieros” a “Plaza Venezuela”



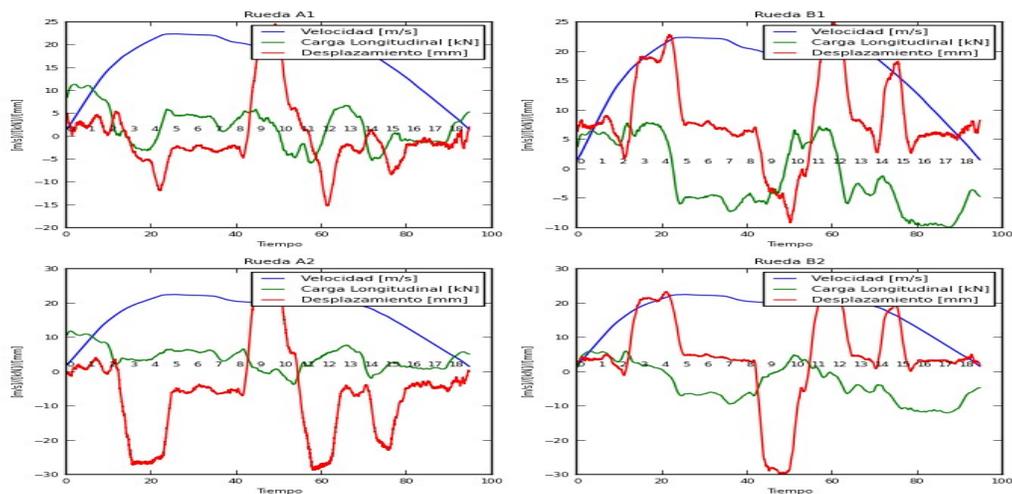
B.11) Tramo “Plaza Venezuela” a “Sabana Grande”



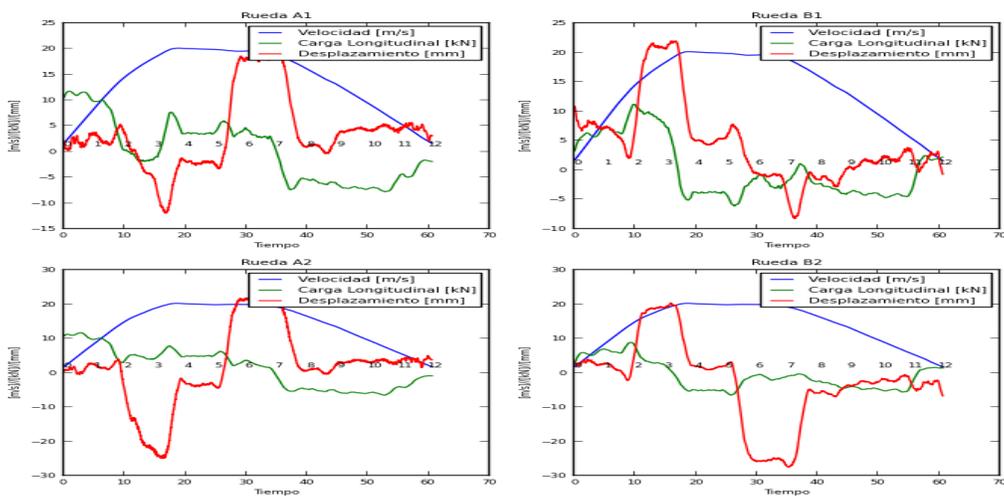
B.12) Tramo “Sabana Grande” a “Chacaito”



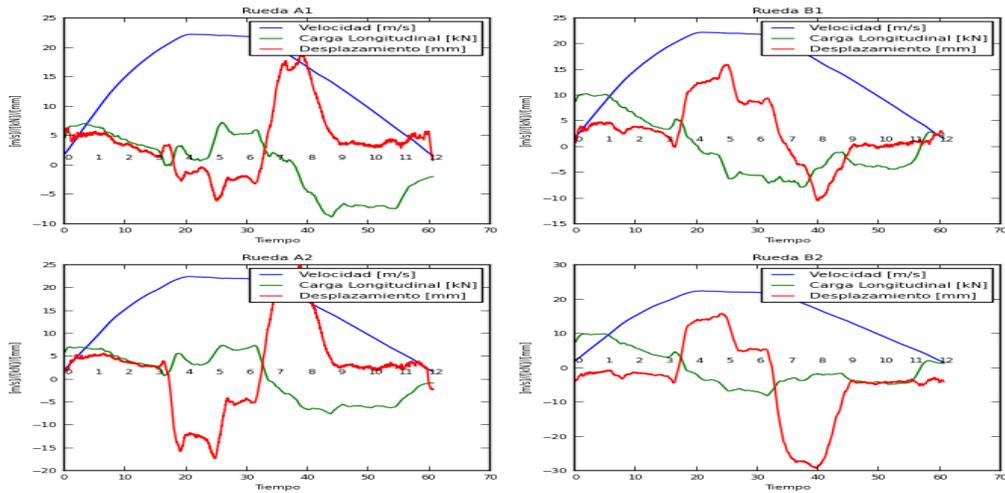
B.13) Tramo “Chacaito” a “Chacao”



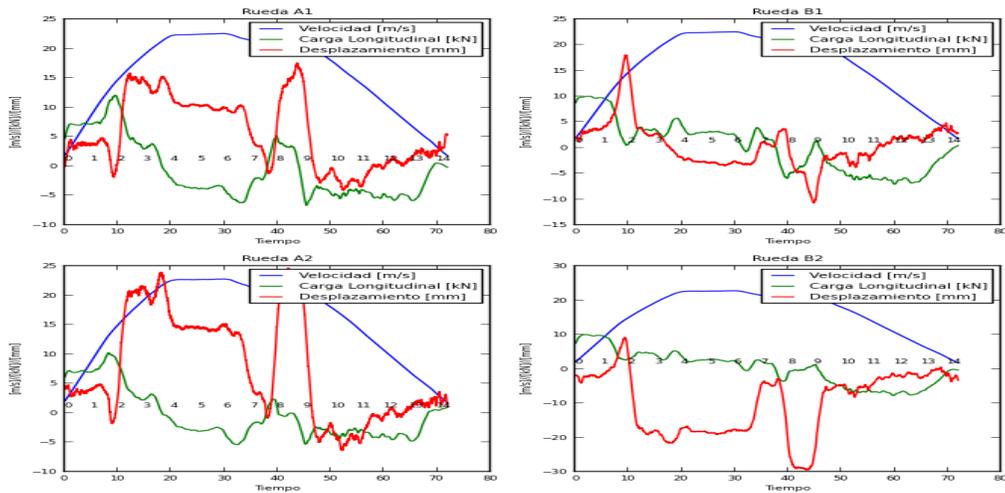
B.14) Tramo “Chacao” a “Altamira”



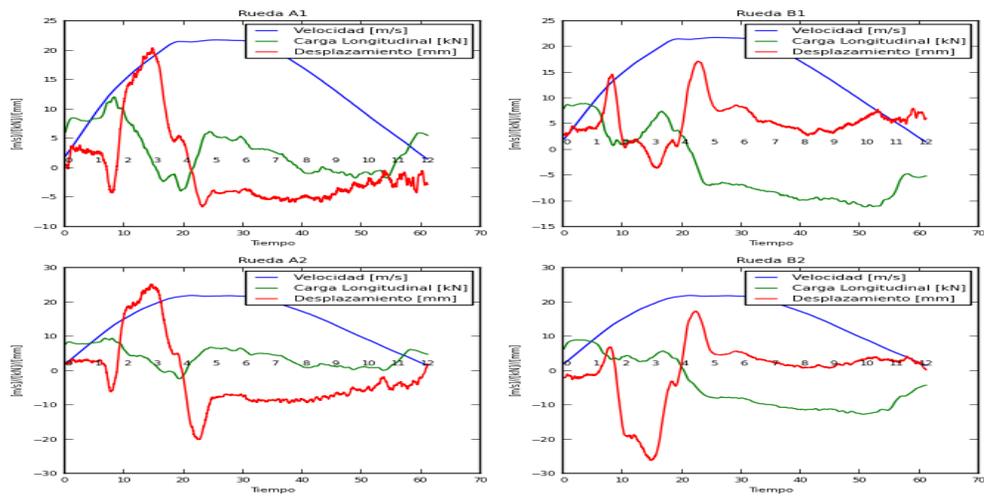
B.15) Tramo “Altamira” a “Parque del este” (“Miranda”)



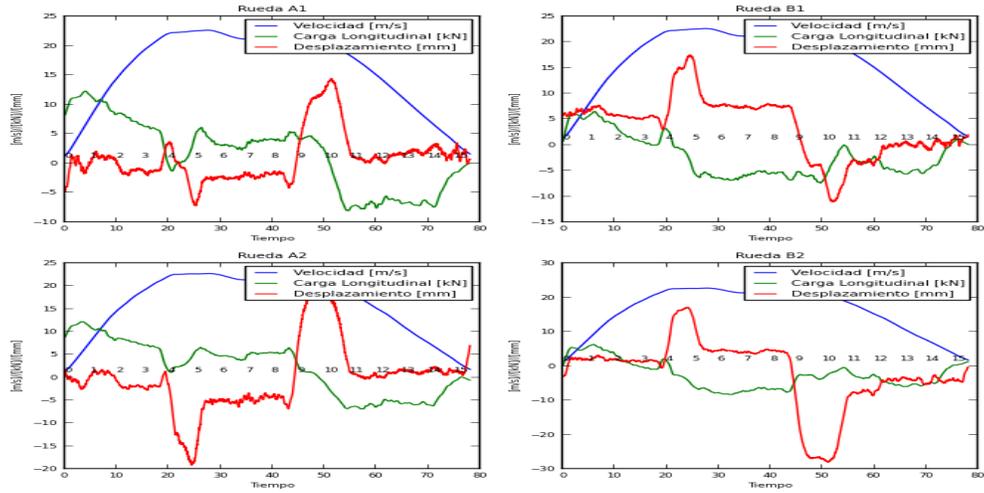
B.16) Tramo “Parque del este” a “Los dos caminos”



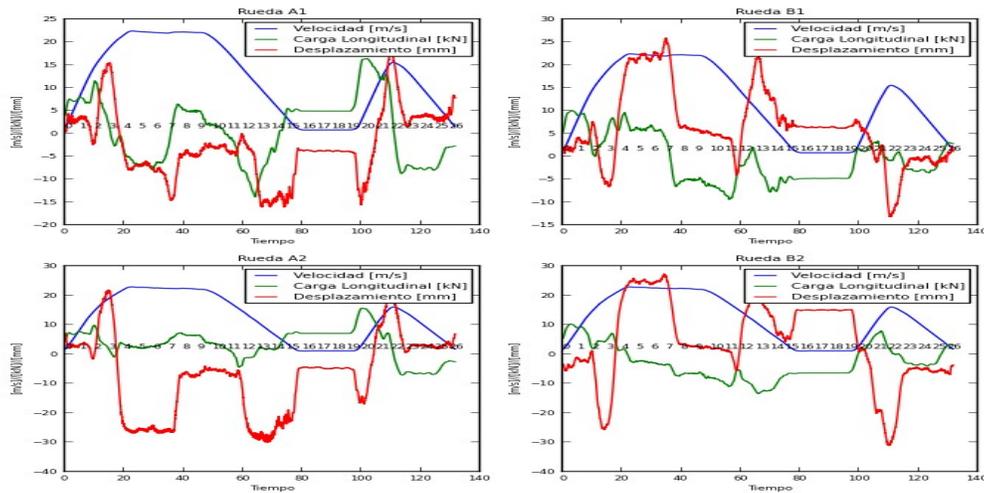
B.17) Tramo “Los dos caminos” a “Los Cortijos”



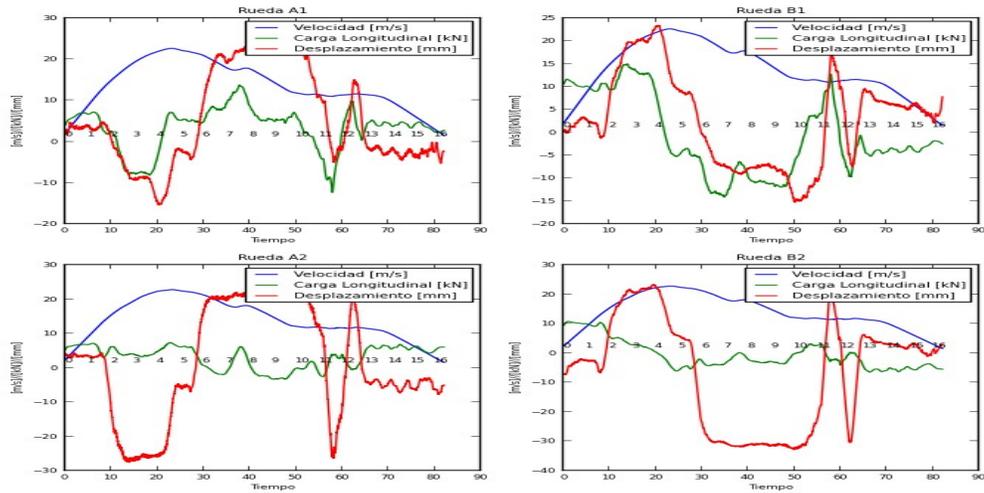
B.18) Tramo “Los Cortijos” a “La California”



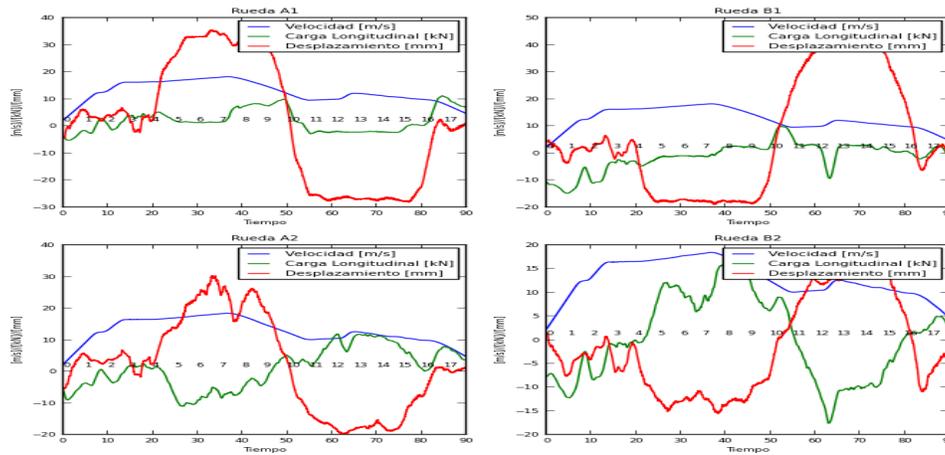
B.19) Tramo “La California” a “Petare”



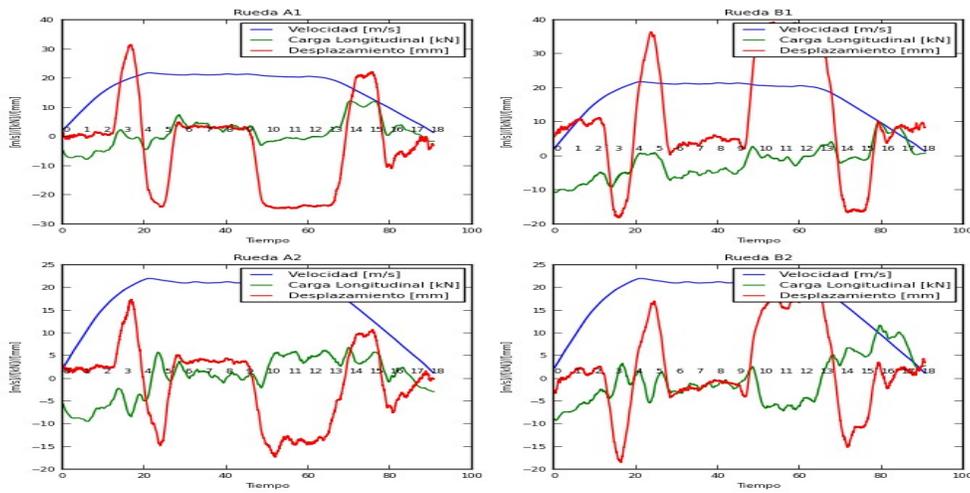
B.20) Tramo “Petare” a “Palo Verde”



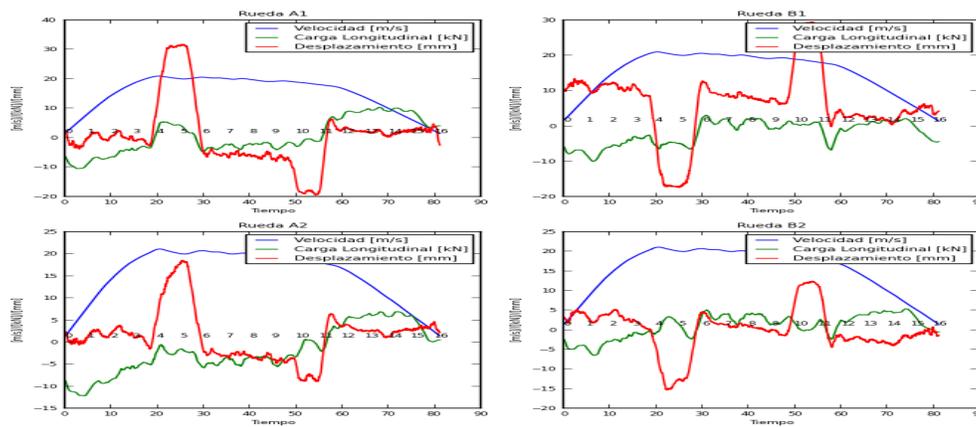
B.21) Tramo “Palo Verde” a “Petare”



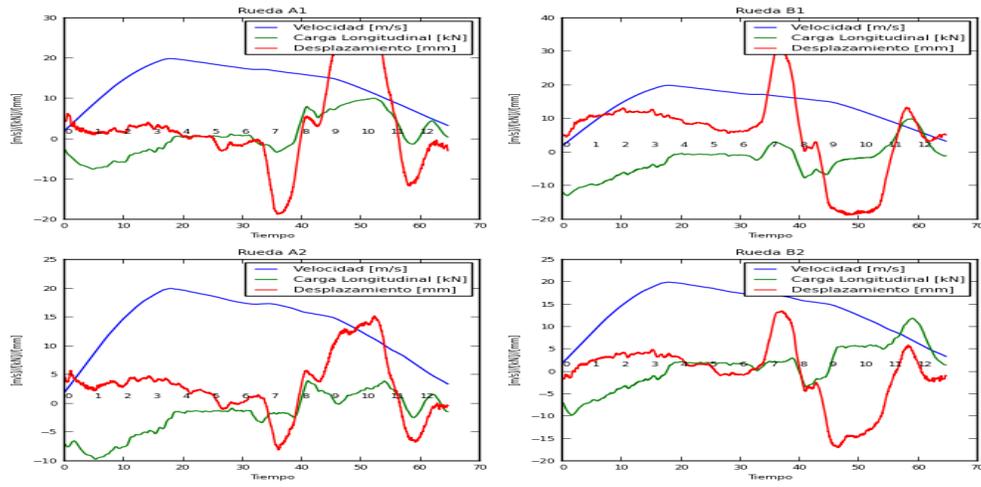
B.22) Tramo “Petare” a “La California”



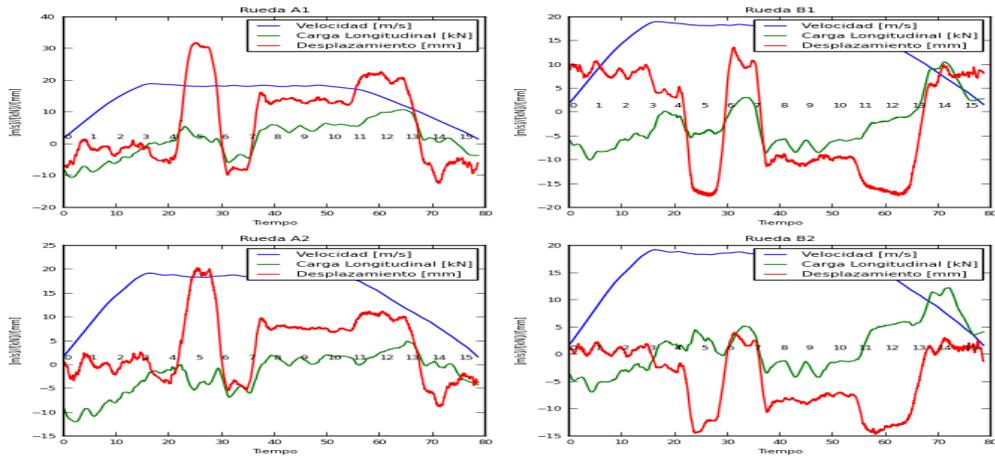
B.23) Tramo “La California” a “Los Cortijos”



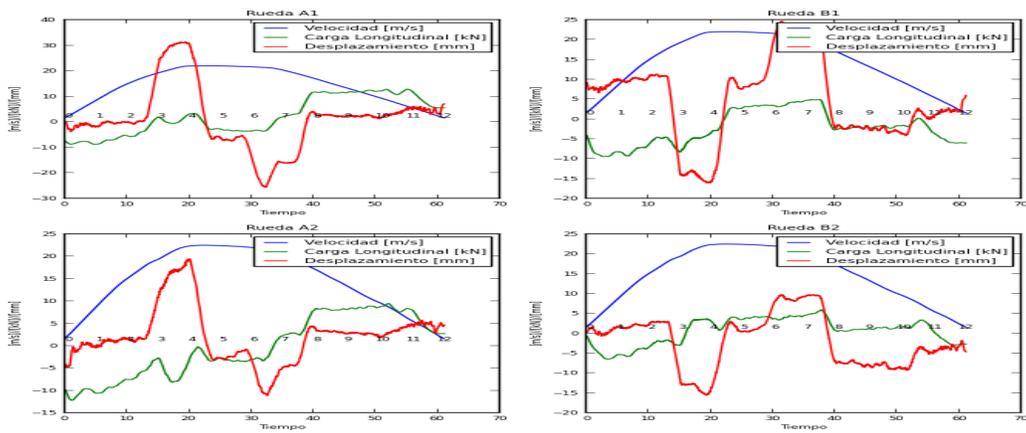
B.24) Tramo “Los Cortijos” a “Los dos caminos”



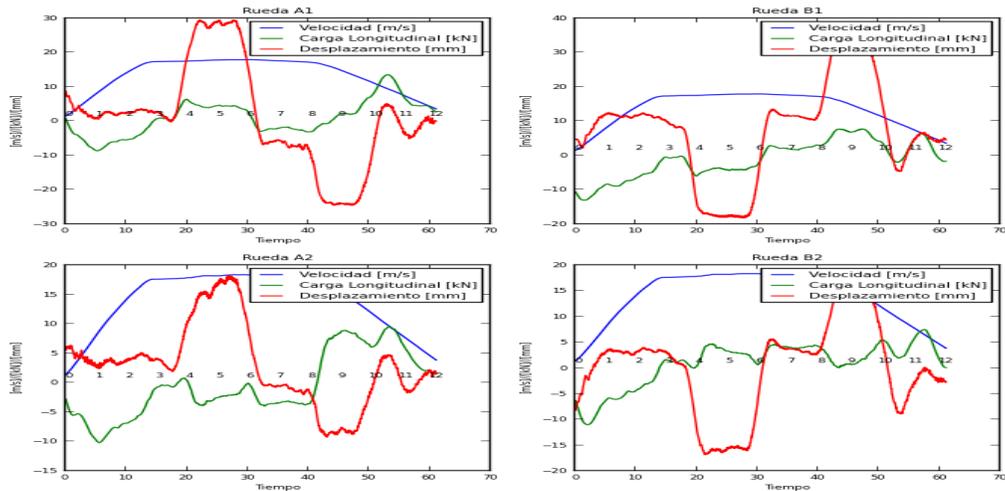
B.25) Tramo “Los Dos caminos” a “Parque del este”



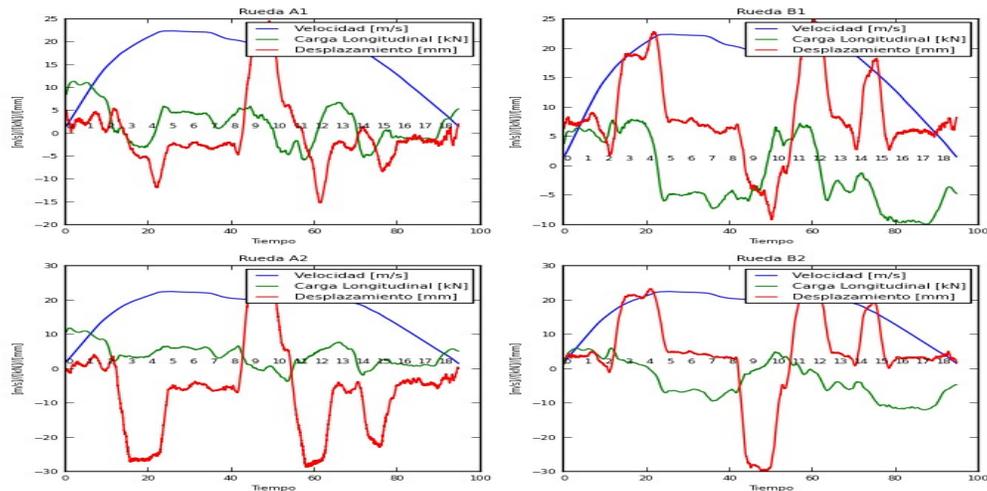
B.26) Tramo “Parque del este” a “Altamira”



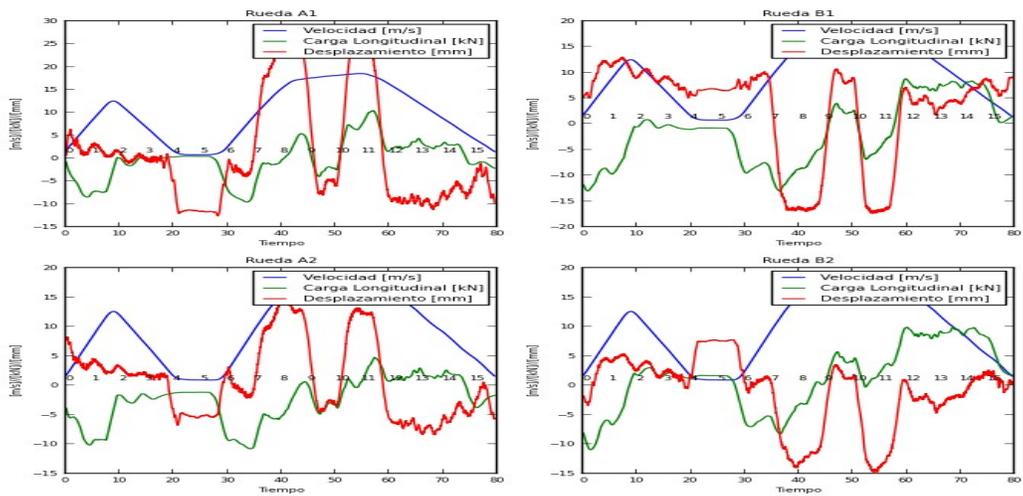
B.27) Tramo "Altamira" a "Chacao"



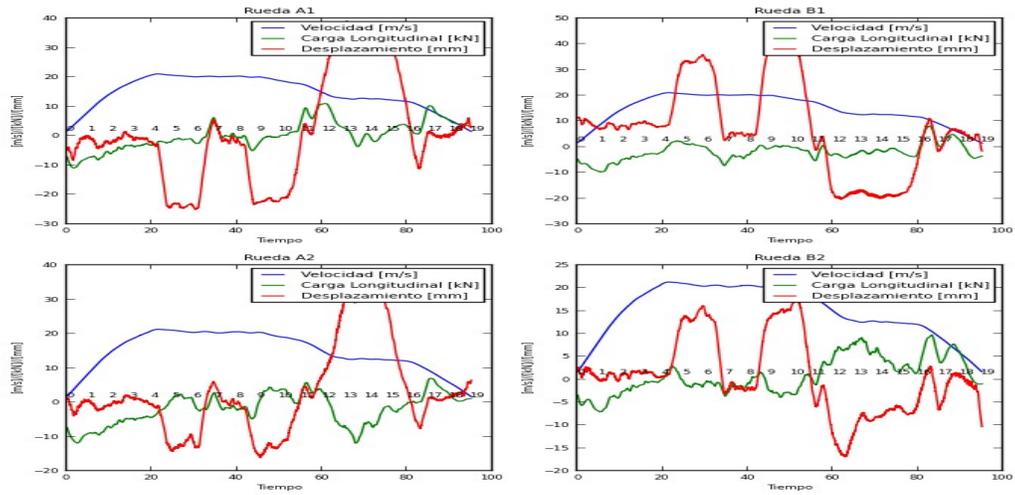
B.28) Tramo "Chacao" a Chacaito"



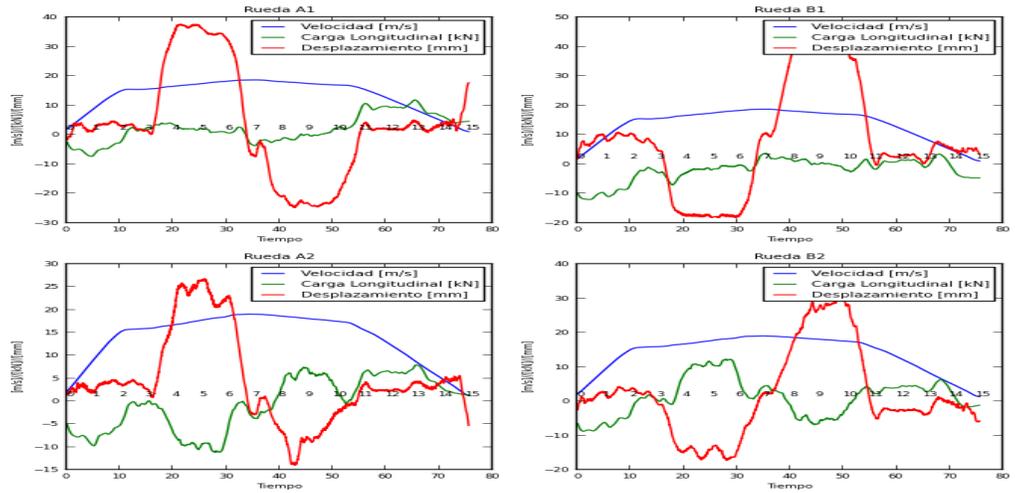
B.29) Tramo "Chacaito" a "Sabana Grande"



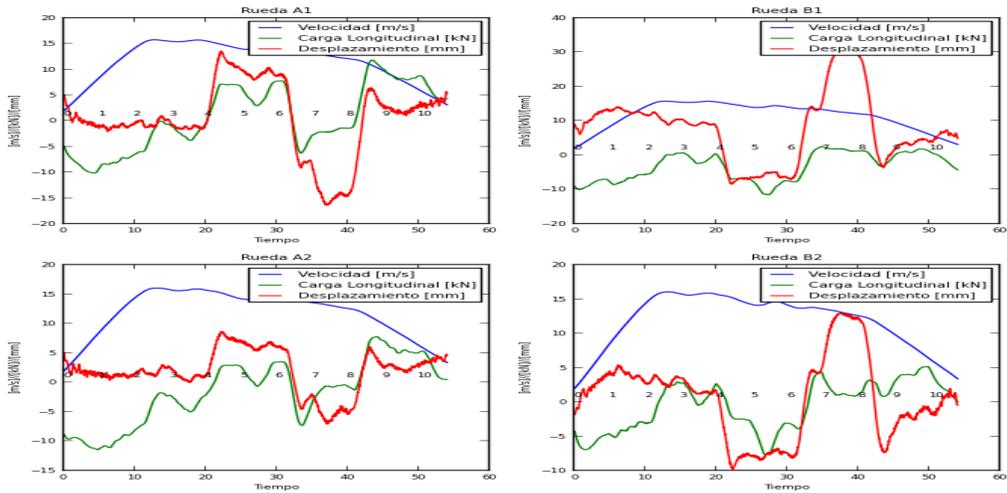
B.30) Tramo “Sabana Grande” a “Plaza Venezuela”



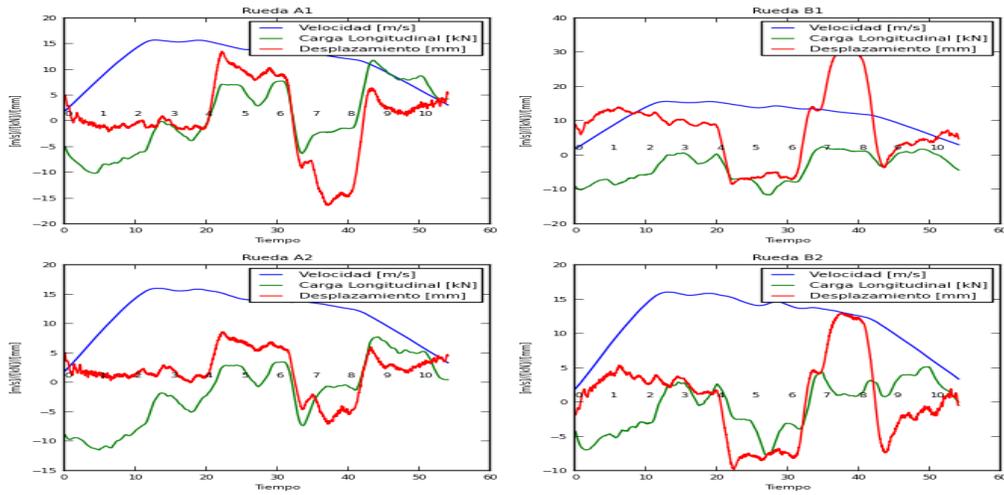
B.31) Tramo “Plaza Venezuela” a “Colegio de Ingenieros”



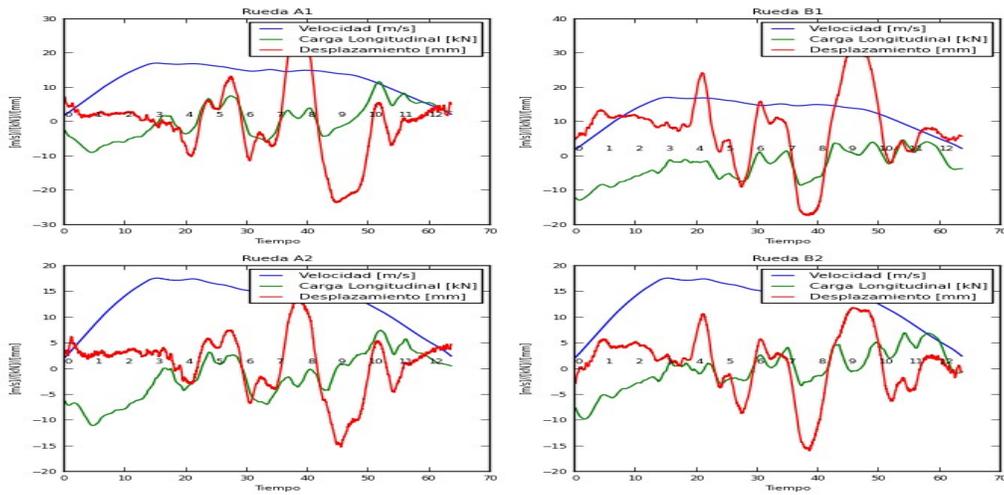
B.32) Tramo “Colegio de Ingenieros” a “Bellas Artes”



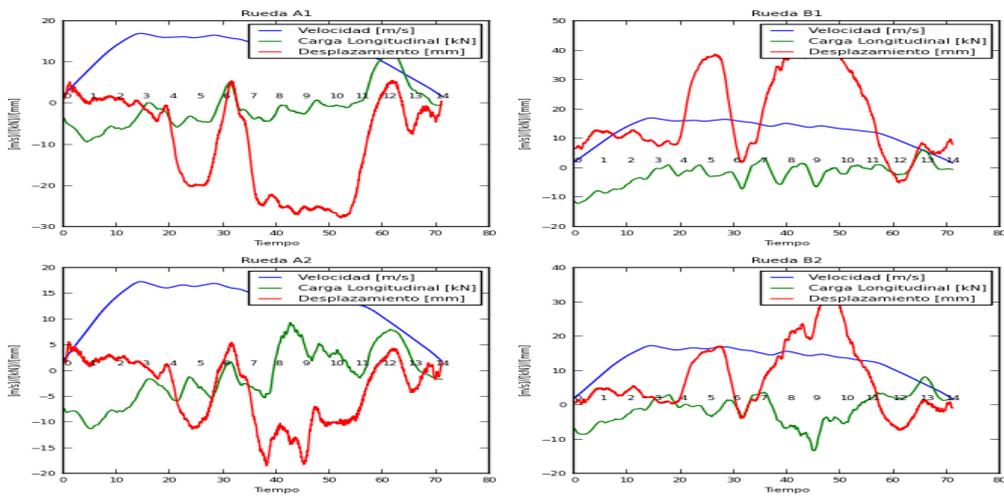
B.33) Tramo “Bellas Artes” a “Parque Carabobo”



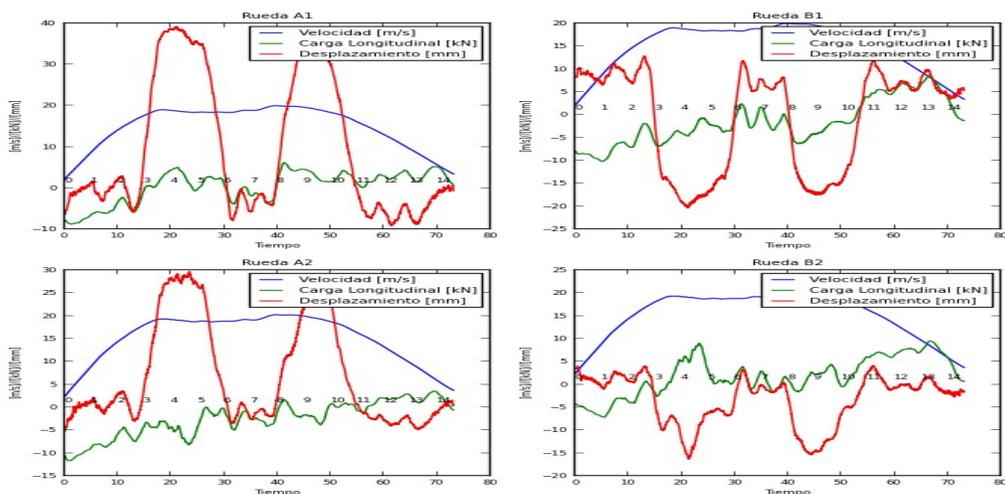
B.34) Tramo “Parque Carabobo” a “Hoyada”



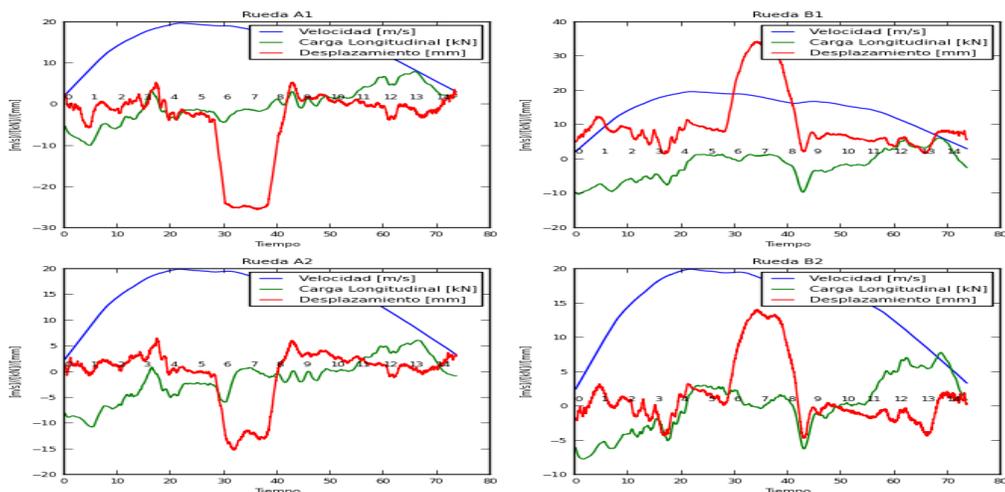
B.35) Tramo “Hoyada” a “Capitolio”



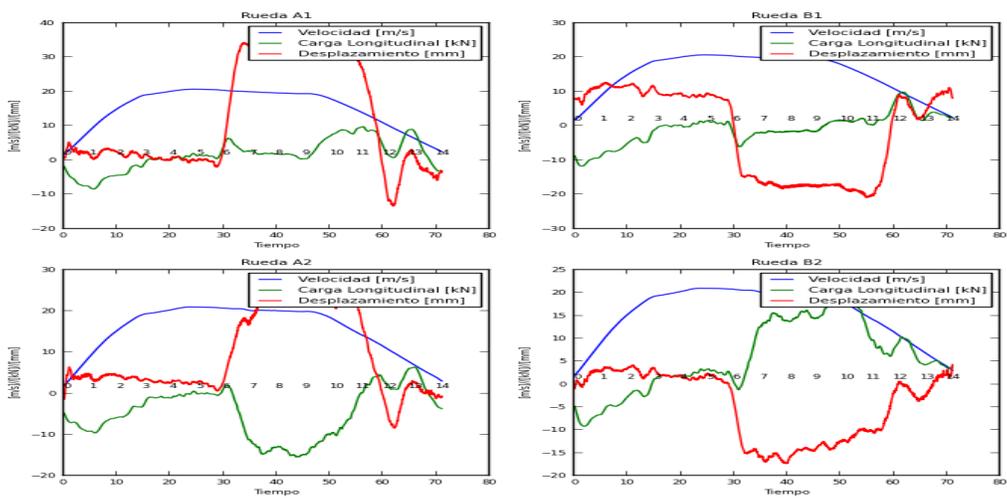
B.36) Tramo “Capitolio” a “Caño Amarillo”



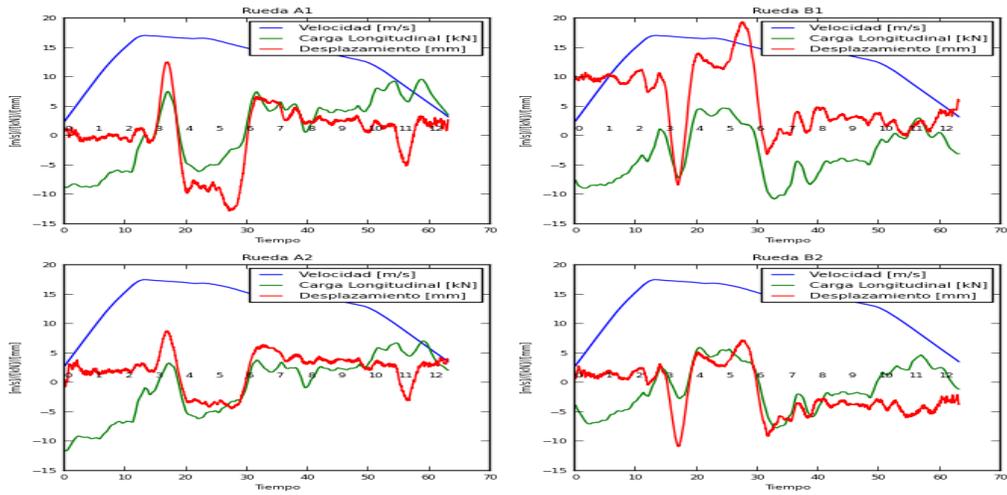
B.37) Tramo “Caño Amarillo” a “Agua Salud”



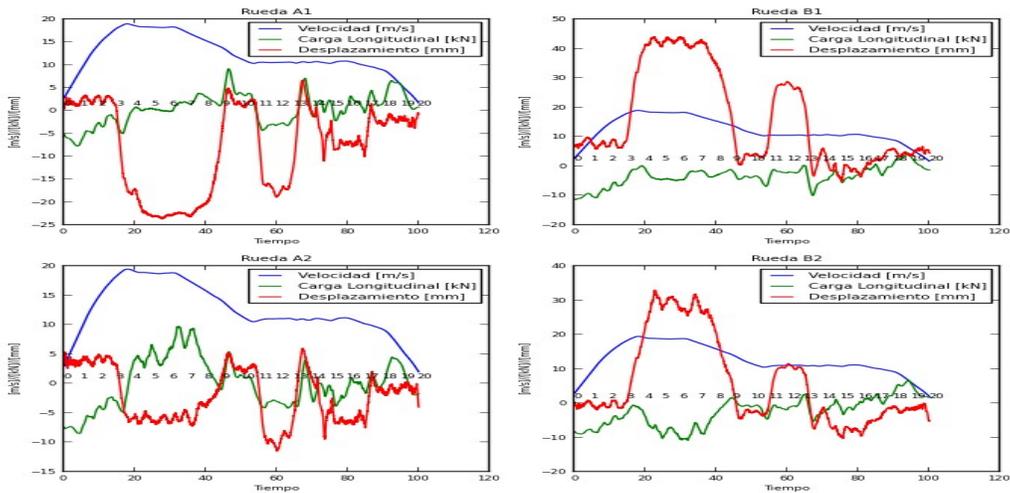
B.38) Tramo “Agua Salud” a “Gato Negro”



B.39) Tramo “Gato Negro” a “Plaza Sucre”

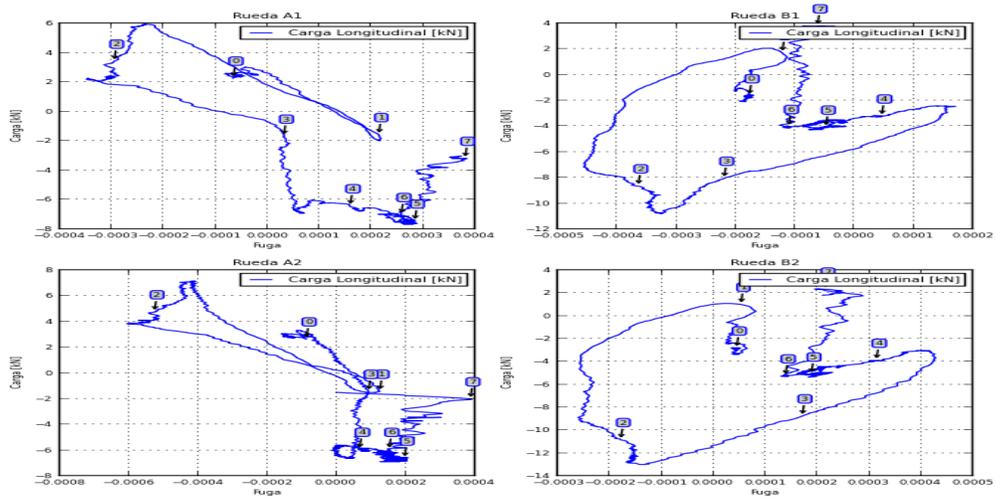


B.40) Tramo “Plaza Sucre” a “Perez Bonalde”

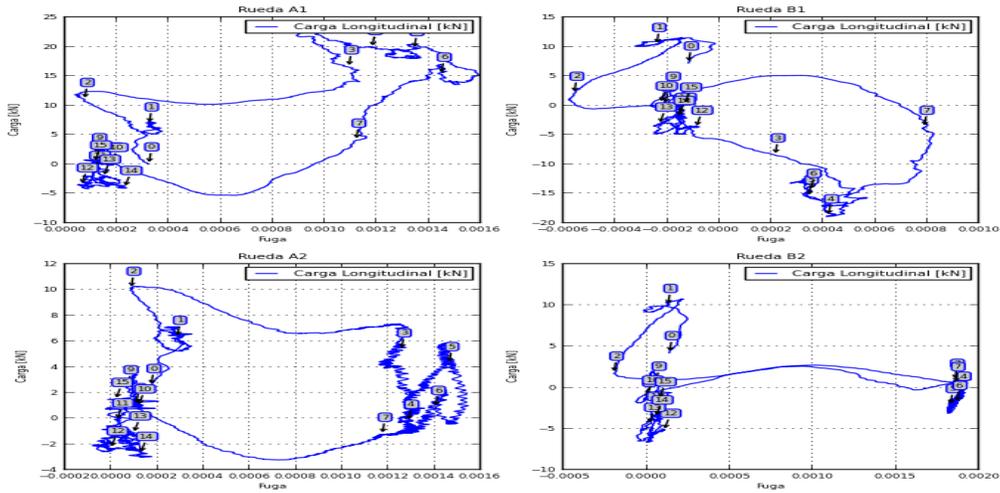


Apéndice C:
**Gráficos de las cargas vs las fugas longitudinales de cada
rueda mediante los resultados obtenidos por la empresa
Transportation Technology Center, Inc. en cada tramo
de la Línea 1.**

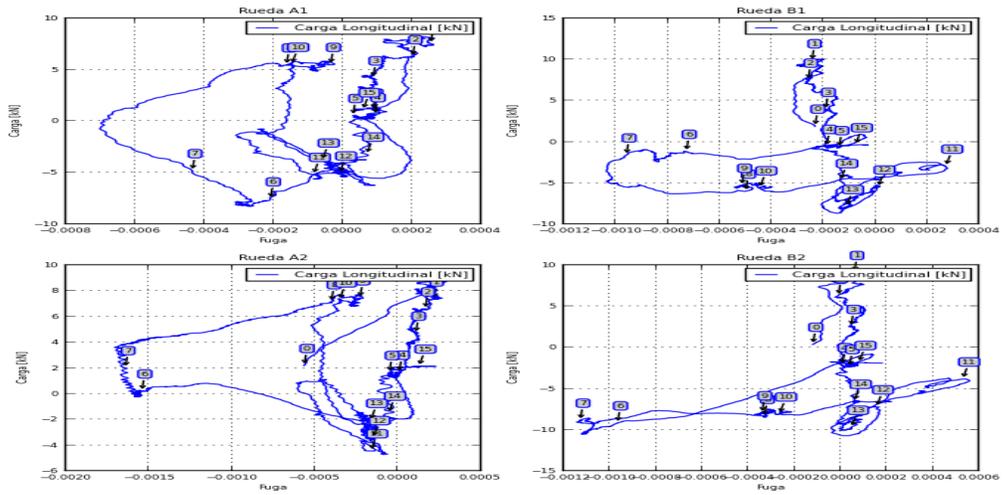
C.1) Tramo “Perez Bonalde” a “Plaza Sucre”



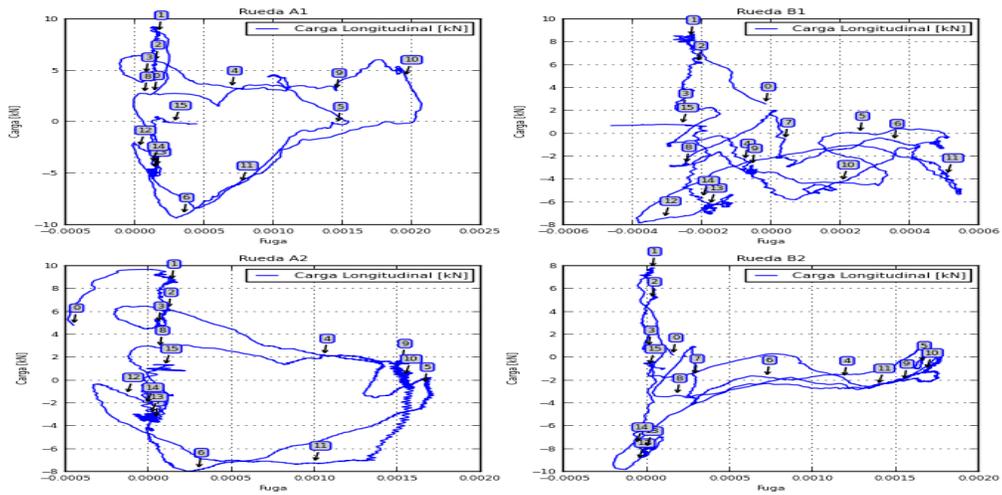
C.2) Tramo “Plaza Sucre” a “Gato Negro”



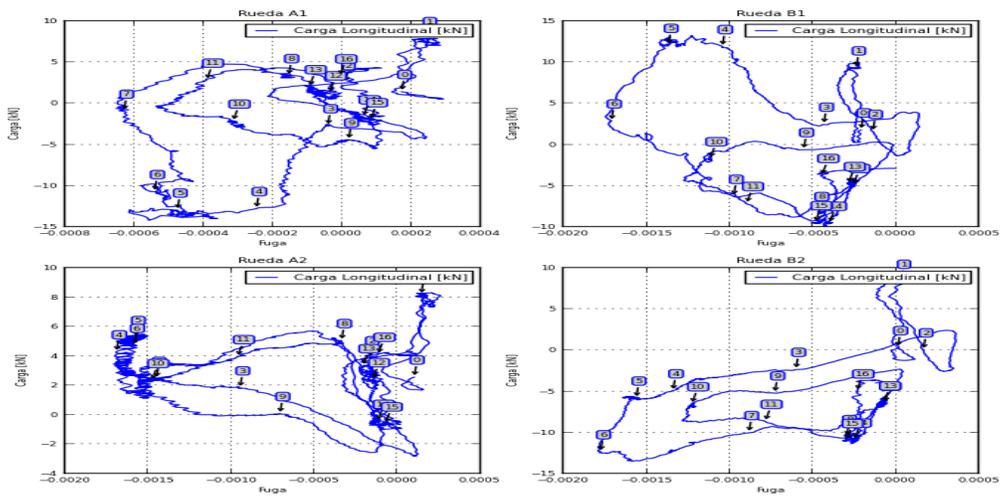
C.3) Tramo “Gato Negro” a “Agua Salud”



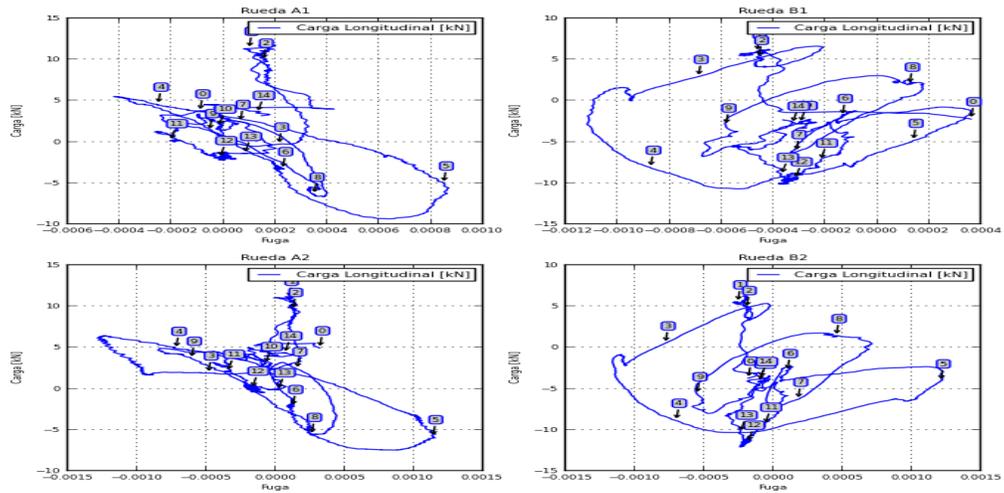
C.4) Tramo “Agua Salud” a “Caño Amarillo”



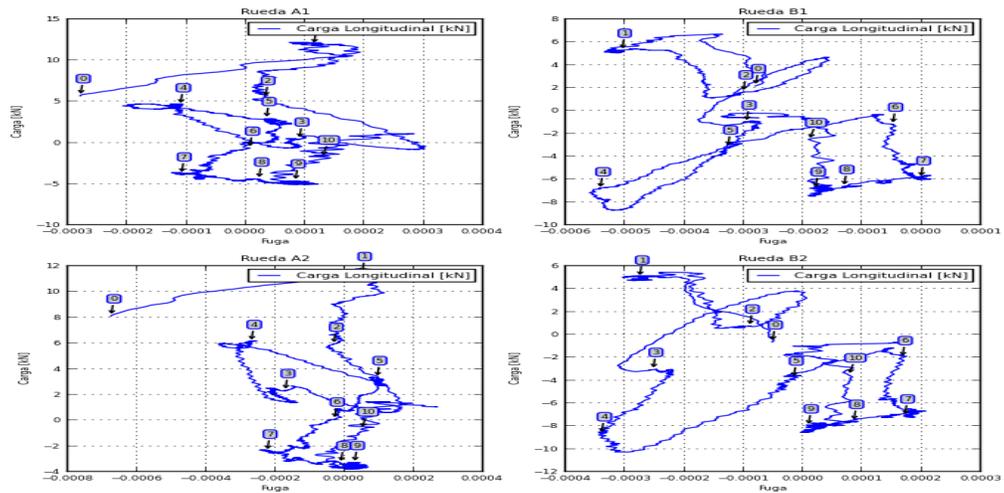
C.5) Tramo “Caño Amarillo” a “Capitolio”



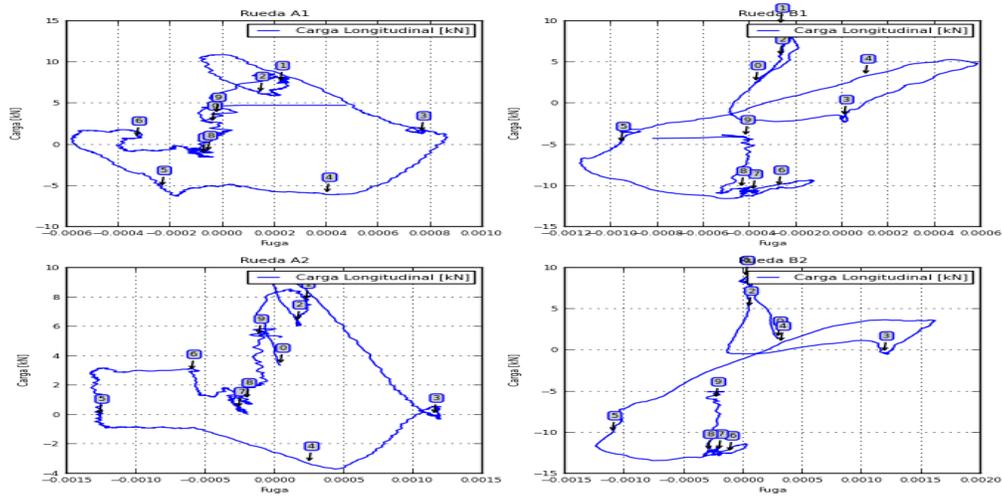
C.6) Tramo “Capitolio” a “Hoyada”



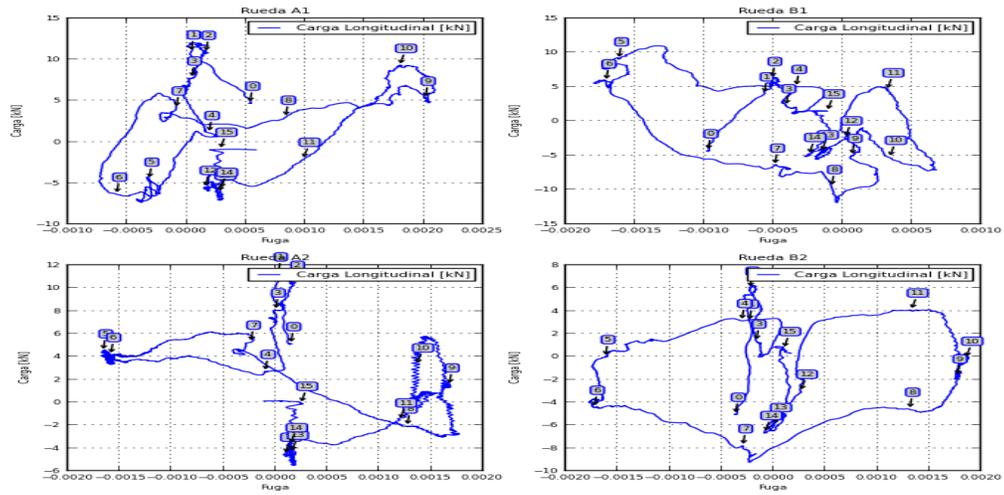
C.7) Tramo “Hoyada” a “Parque Carabobo”



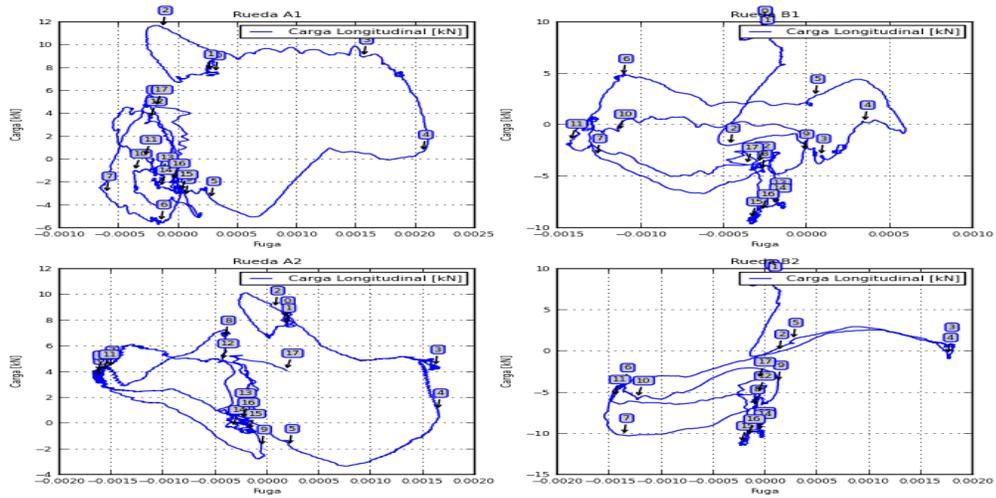
C.8) Tramo “Parque Carabobo” a “Bellas Artes”



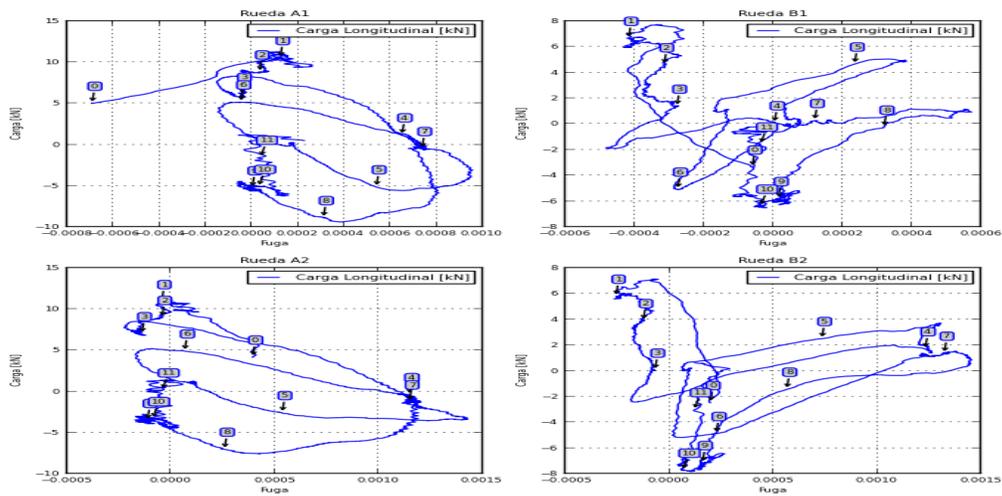
C.9) Tramo “Bellas Artes” a “Colegio de Ingenieros”



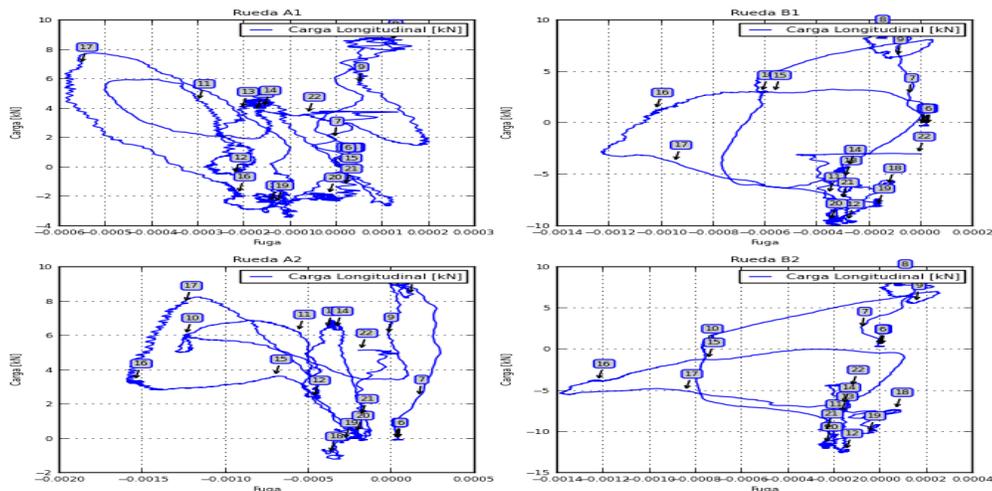
C.10) Tramo “Colegio de Ingenieros” a “Plaza Venezuela”



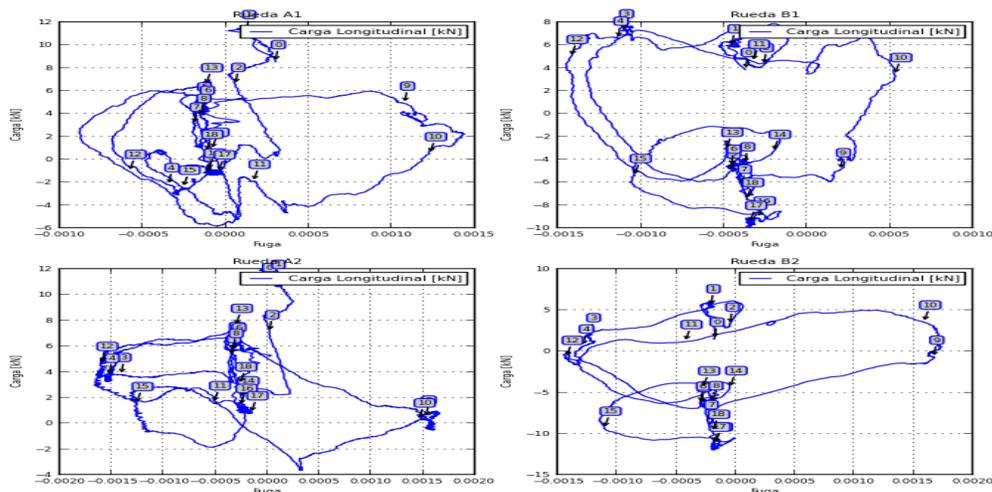
C.11) Tramo “Plaza Venezuela” a “Sabana Grande”



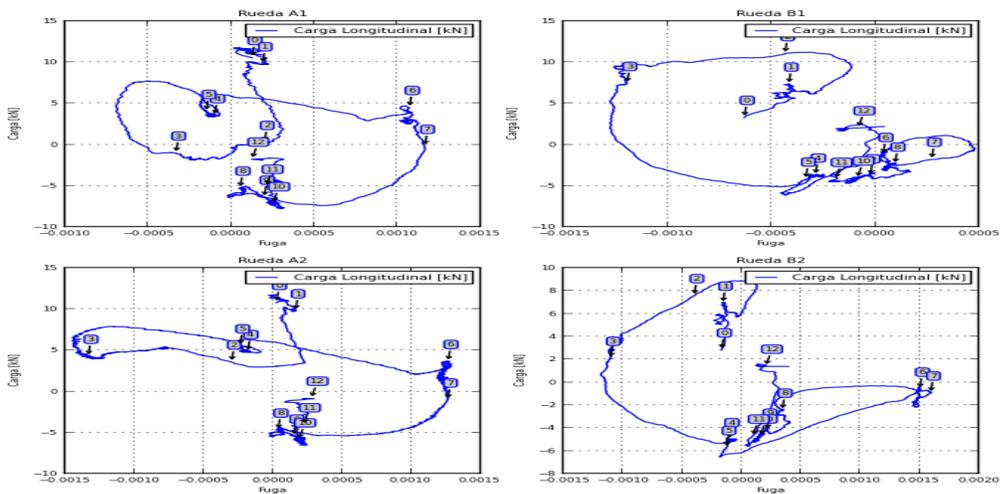
C.12) Tramo “Sabana Grande” a “Chacaito”



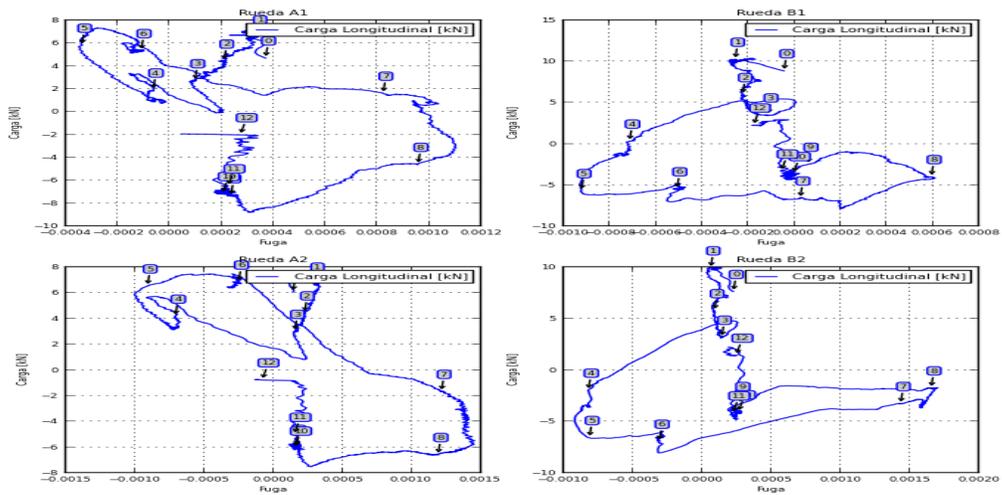
C.13) Tramo “Chacaito” a “Chacao”



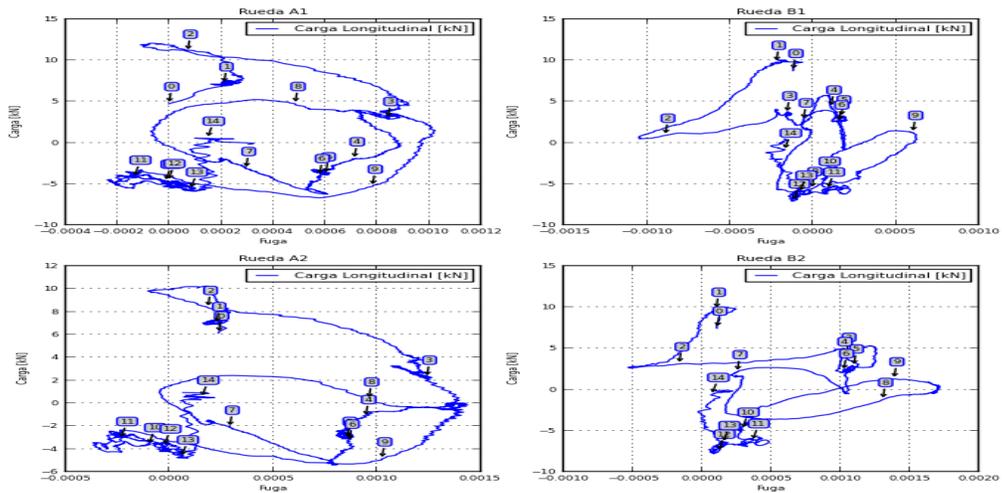
C.14) Tramo “Chacao” a “Altamira”



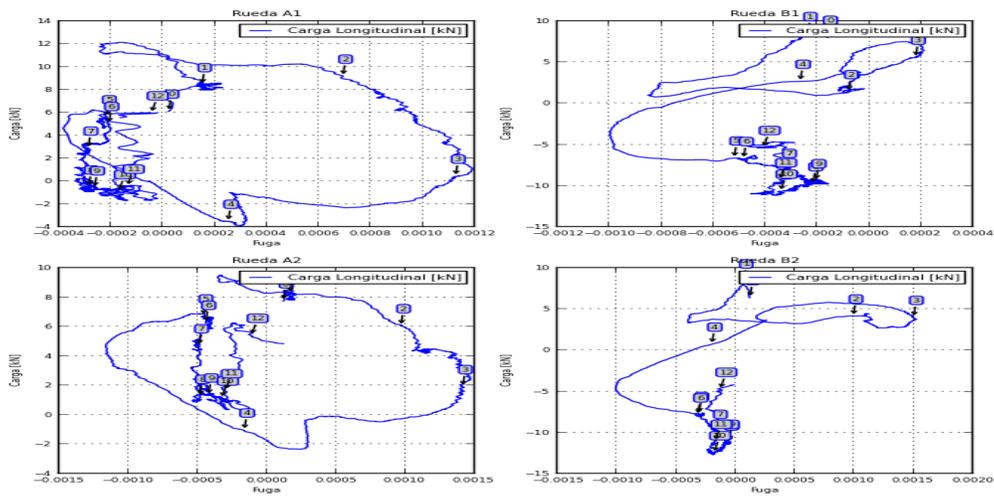
C.15) Tramo “Altamira” a “Parque del este” (“Miranda”)



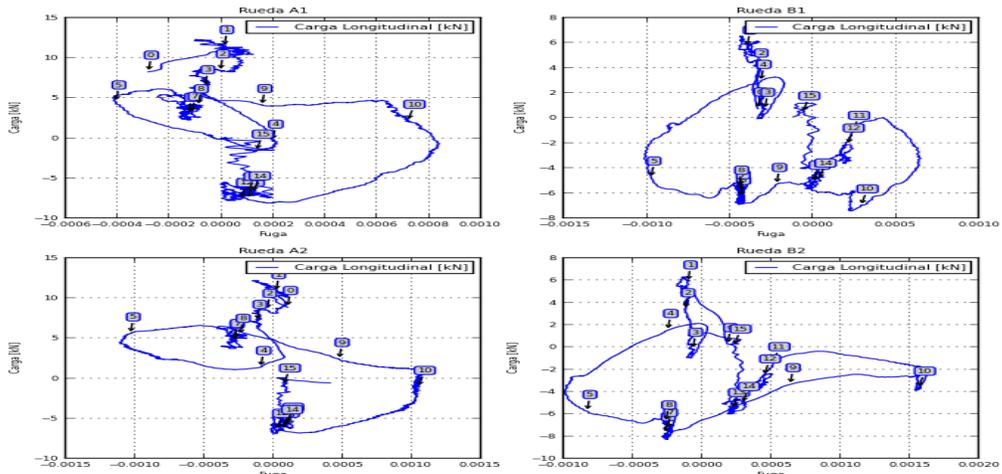
C.16) Tramo “Parque del este” a “Los dos caminos”



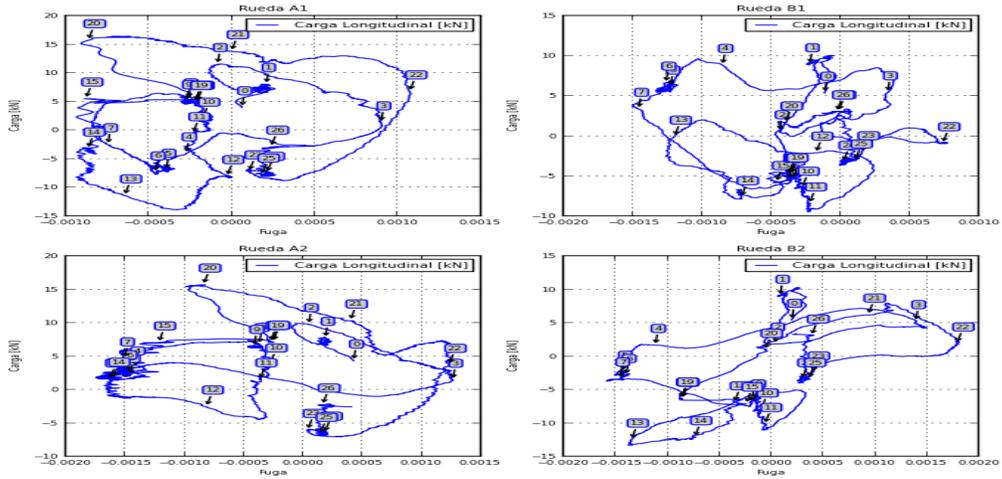
C.17) Tramo “Los dos caminos” a “Los Cortijos”



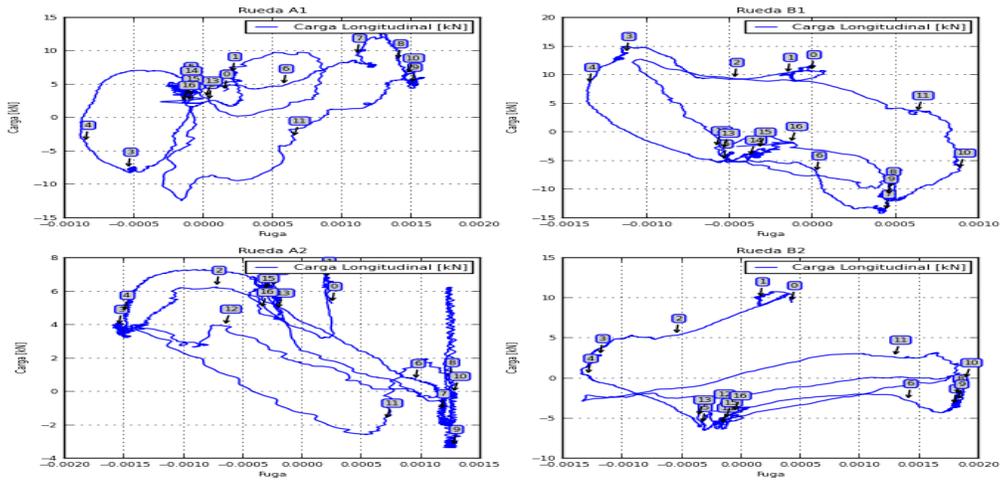
C.18) Tramo “Los Cortijos” a “La California”



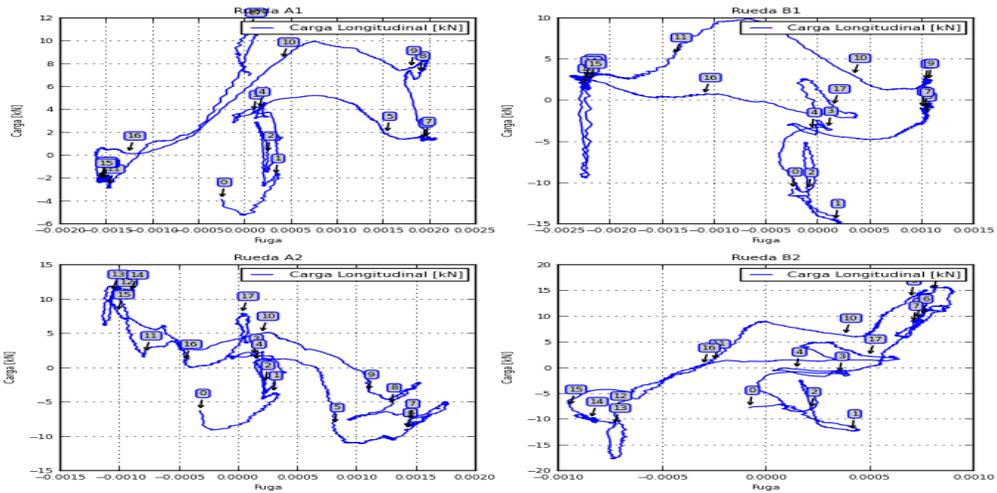
C.19) Tramo “La California” a “Petare”



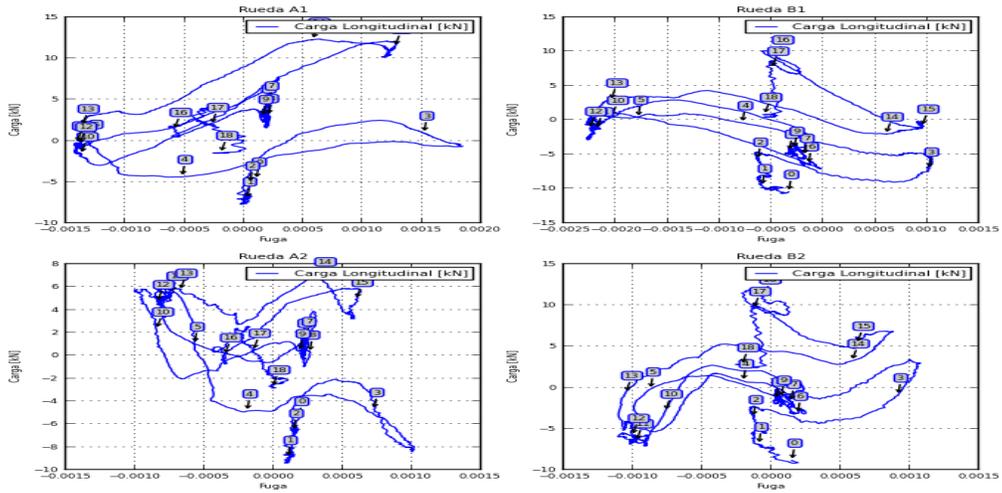
C.20) Tramo “Petare” a “Palo Verde”



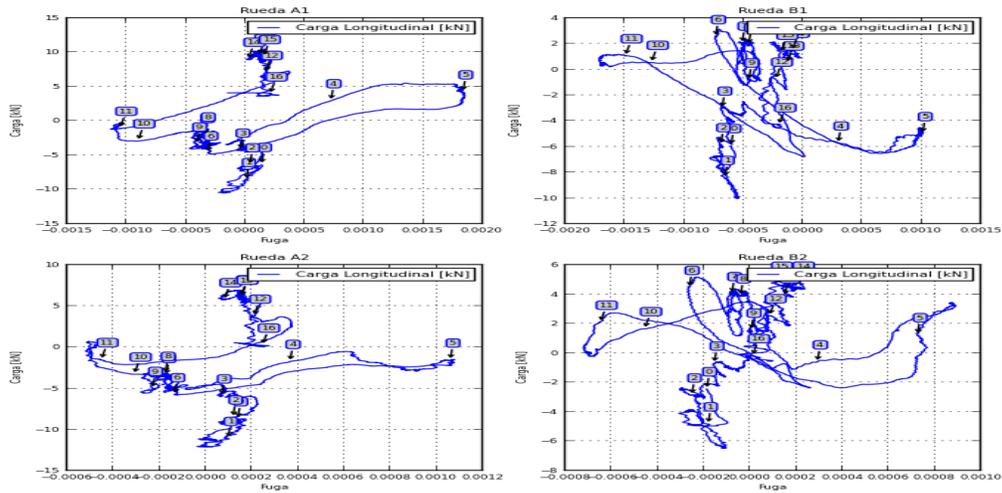
C.21) Tramo “Palo Verde” a “Petare”



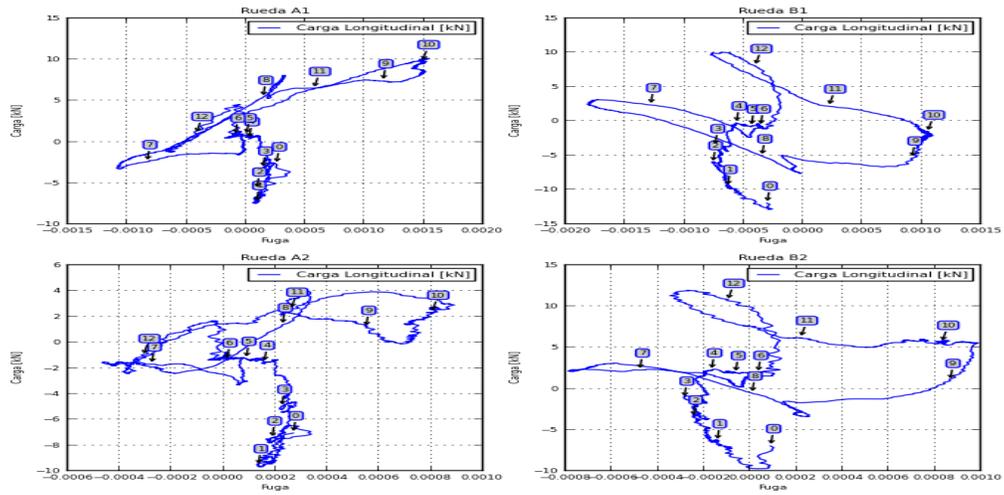
C.22) Tramo “Petare” a “La California”



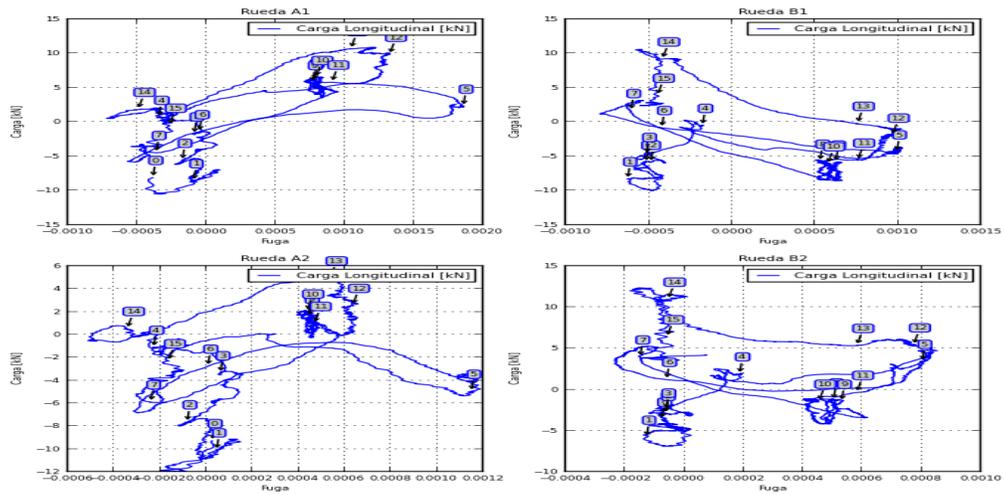
C.23) Tramo “La California” a “Los Cortijos”



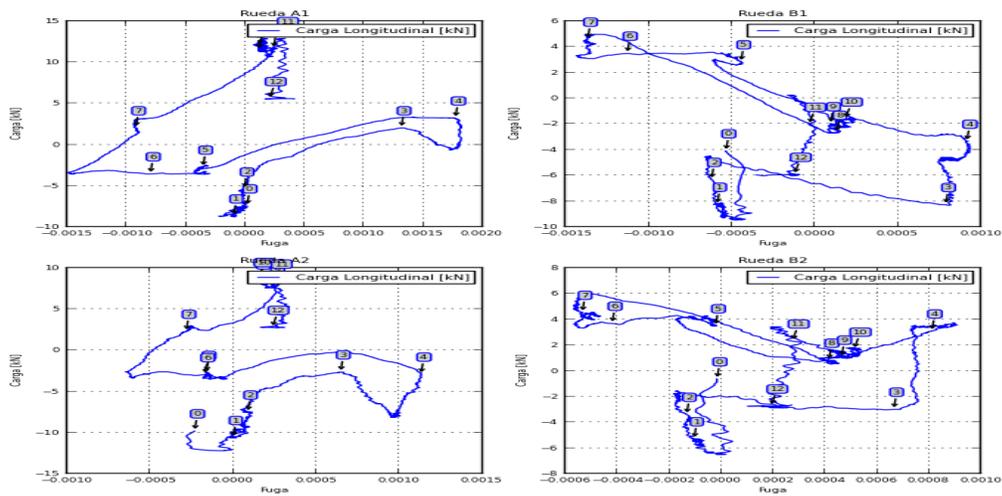
C.24) Tramo “Los Cortijos” a “Los dos caminos”



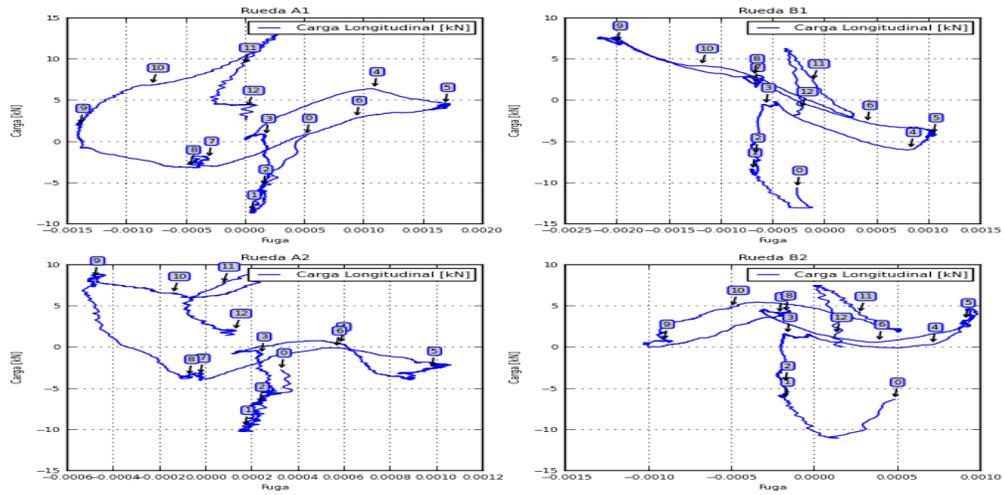
C.25) Tramo “Los Dos caminos” a “Parque del este”



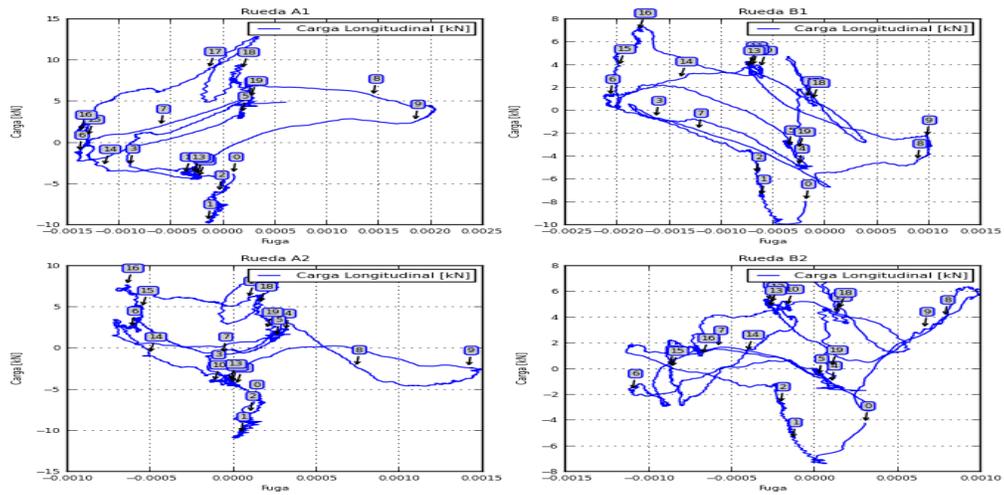
C.26) Tramo “Parque del este” a “Altamira”



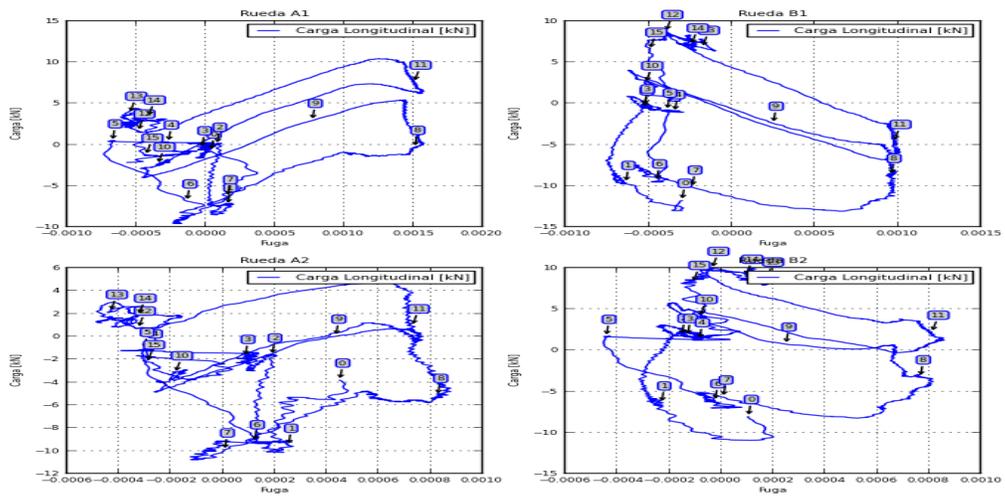
C.27) Tramo "Altamira" a "Chacao"



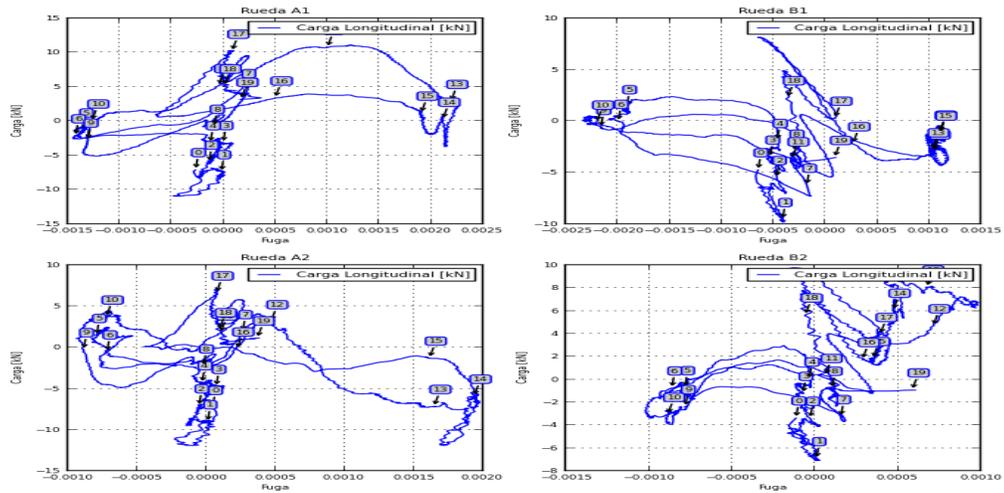
C.28) Tramo "Chacao" a Chacaito"



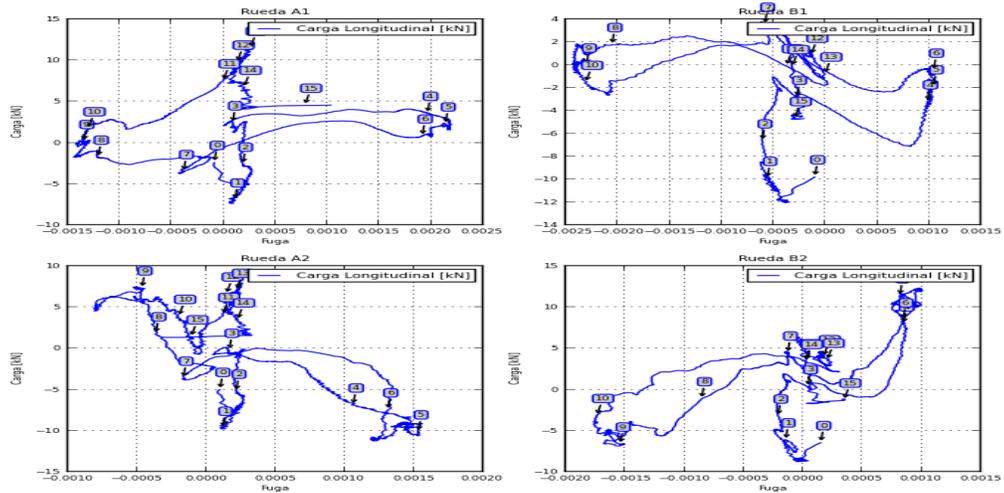
C.29) Tramo "Chacaito" a "Sabana Grande"



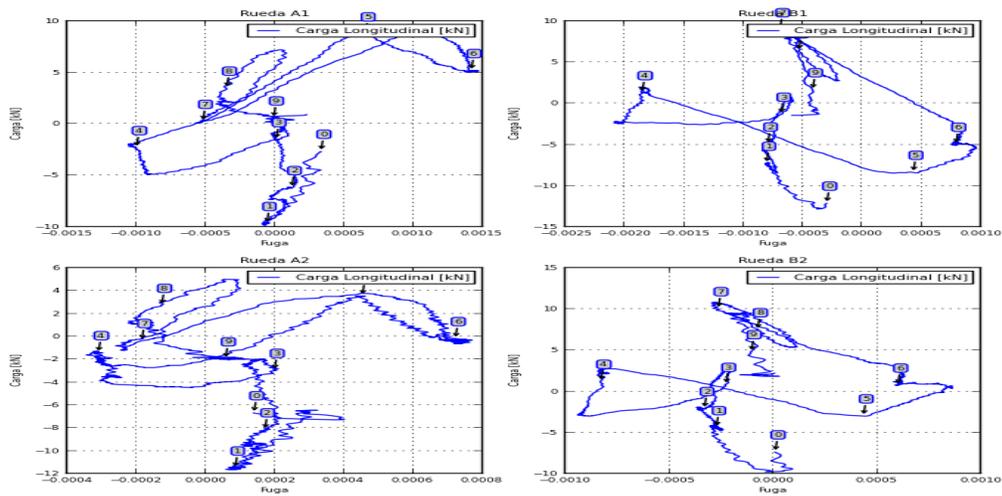
C.30) Tramo “Sabana Grande” a “Plaza Venezuela”



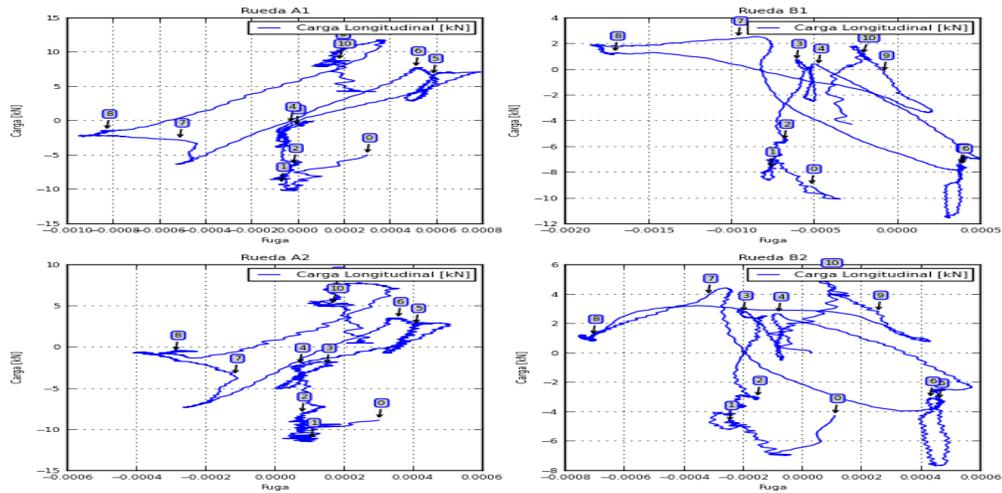
C.31) Tramo “Plaza Venezuela” a “Colegio de Ingenieros”



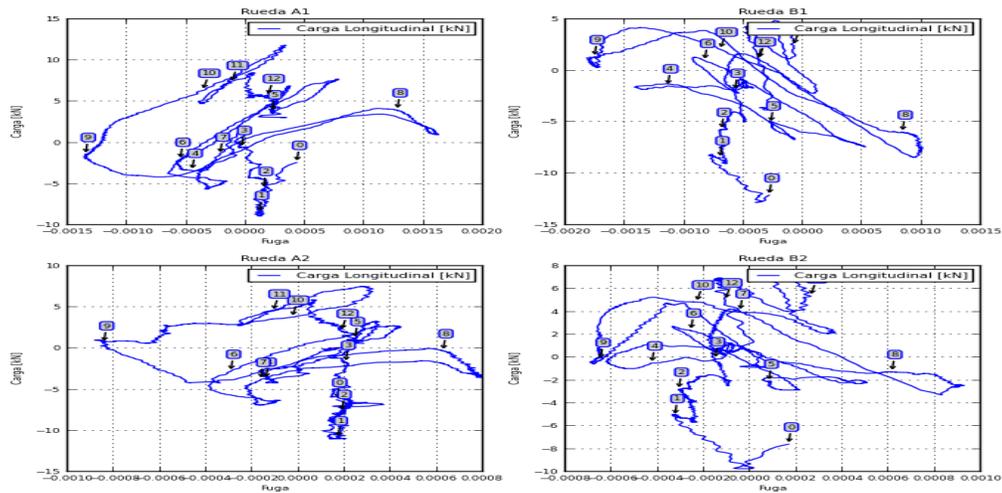
C.32) Tramo “Colegio de Ingenieros” a “Bellas Artes”



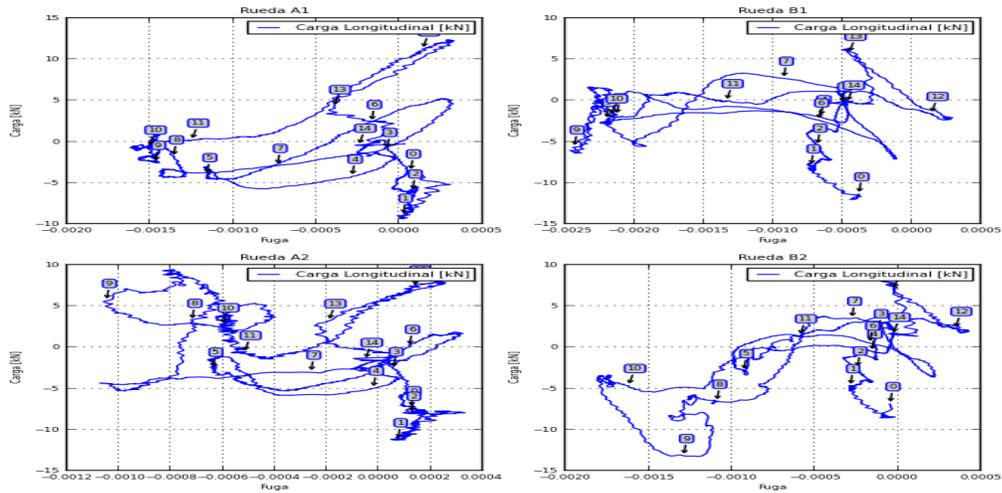
C.33) Tramo “Bellas Artes” a “Parque Carabobo”



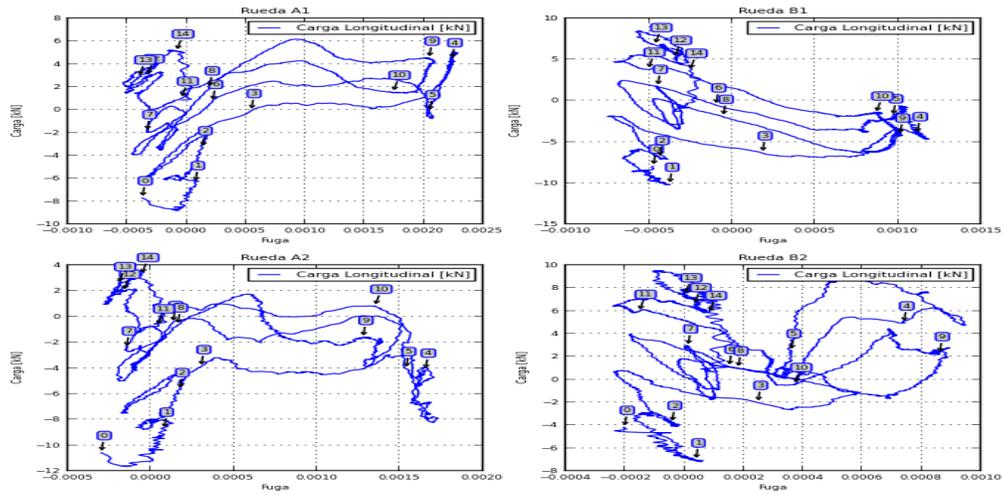
C.34) Tramo “Parque Carabobo” a “Hoyada”



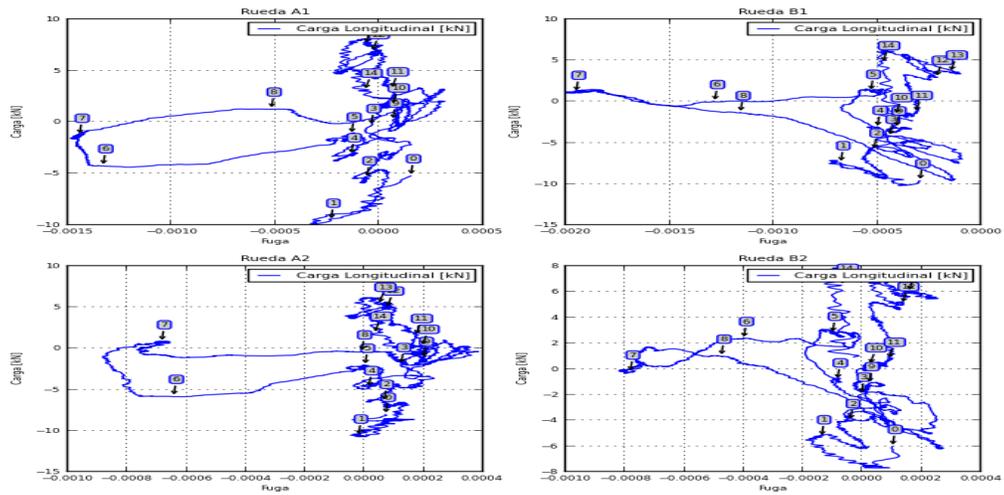
C.35) Tramo “Hoyada” a “Capitolio”



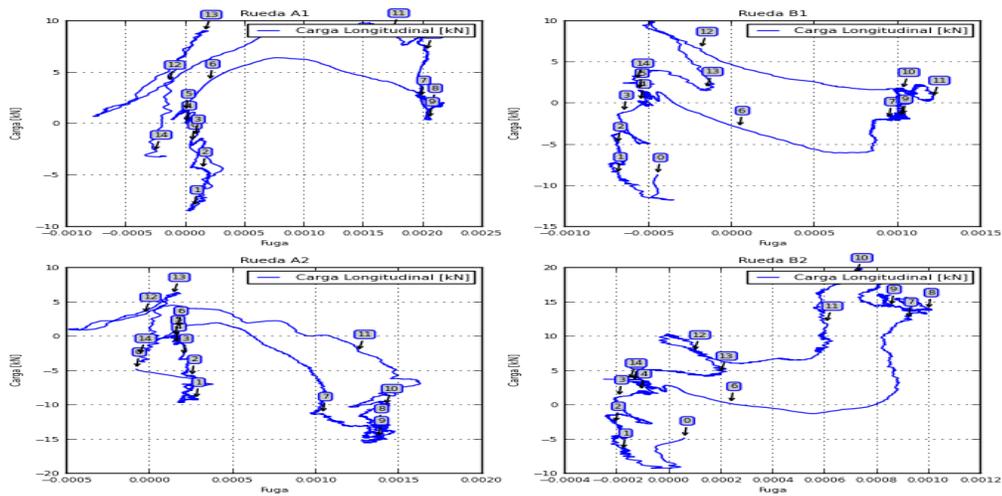
C.36) Tramo “Capitolio” a “Caño Amarillo”



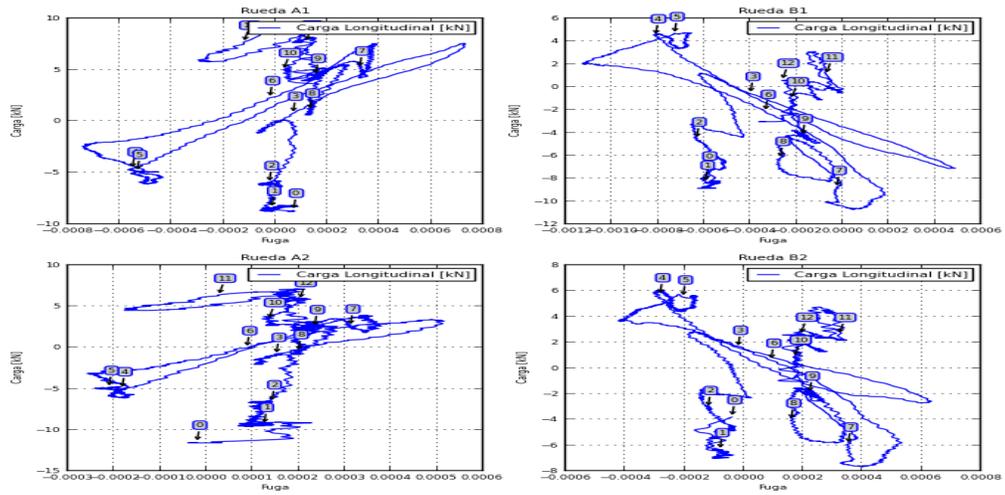
C.37) Tramo “Caño Amarillo” a “Agua Salud”



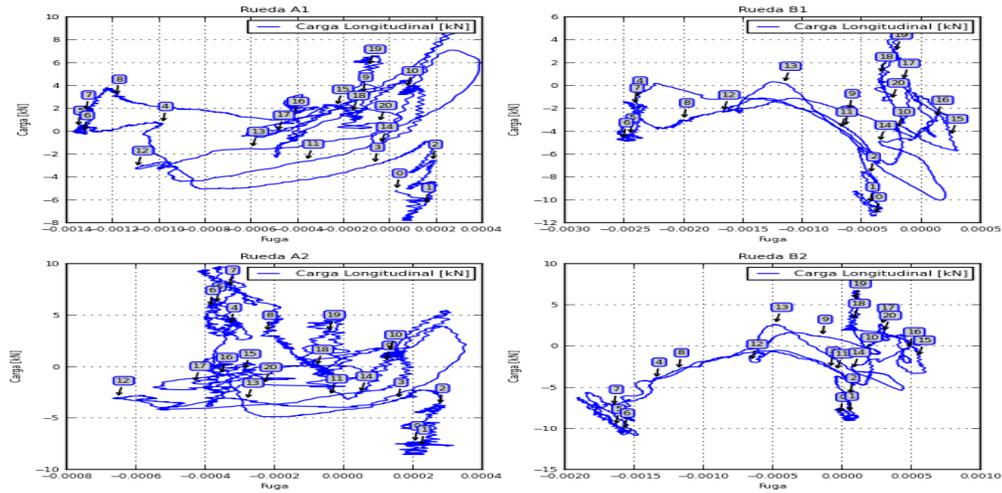
C.38) Tramo “Agua Salud” a “Gato Negro”



C.39) Tramo “Gato Negro” a “Plaza Sucre”

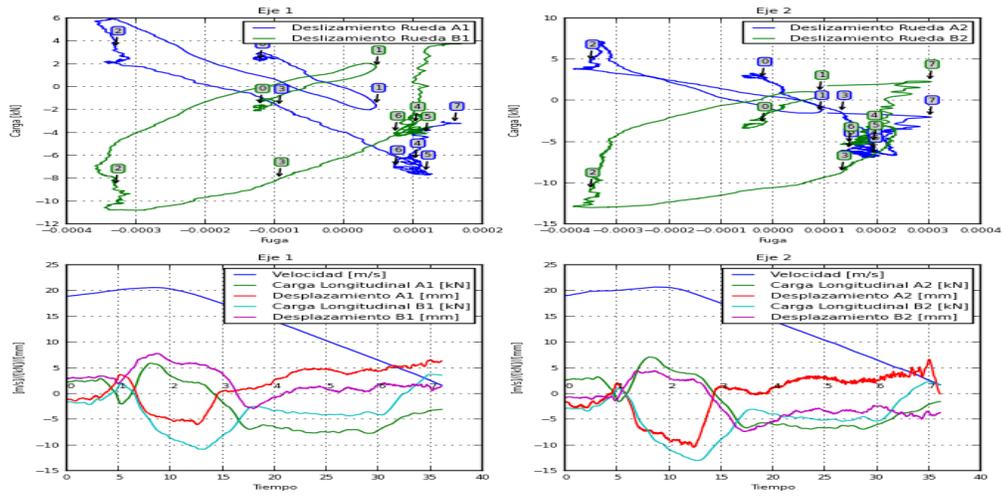


C.40) Tramo “Plaza Sucre” a “Perez Bonalde”

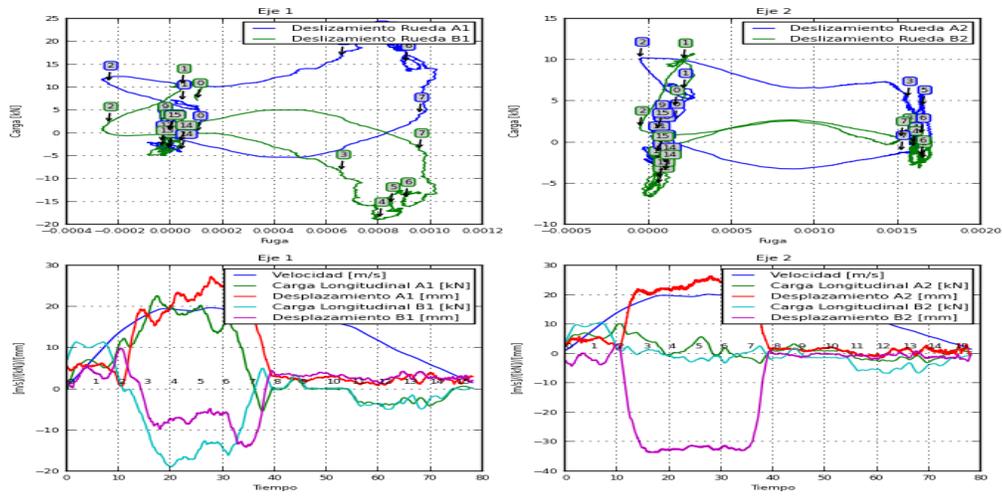


Apéndice D:
Gráficos de las cargas vs las fuga longitudinal
considerando un radio común de contacto bajo los
resultados obtenidos por la empresa Transportation
Technology Center, Inc. en cada tramo de la Línea 1.

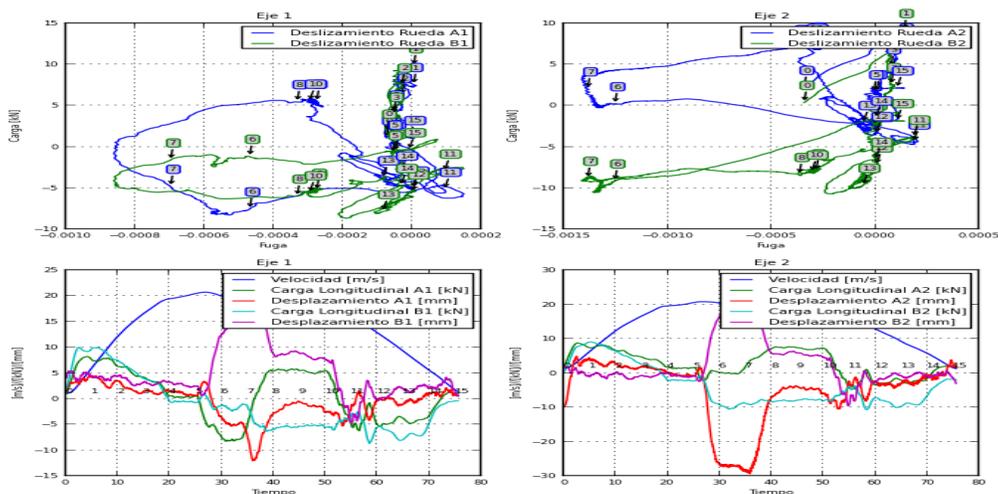
D.1) Tramo “Perez Bonalde” a “Plaza Sucre”



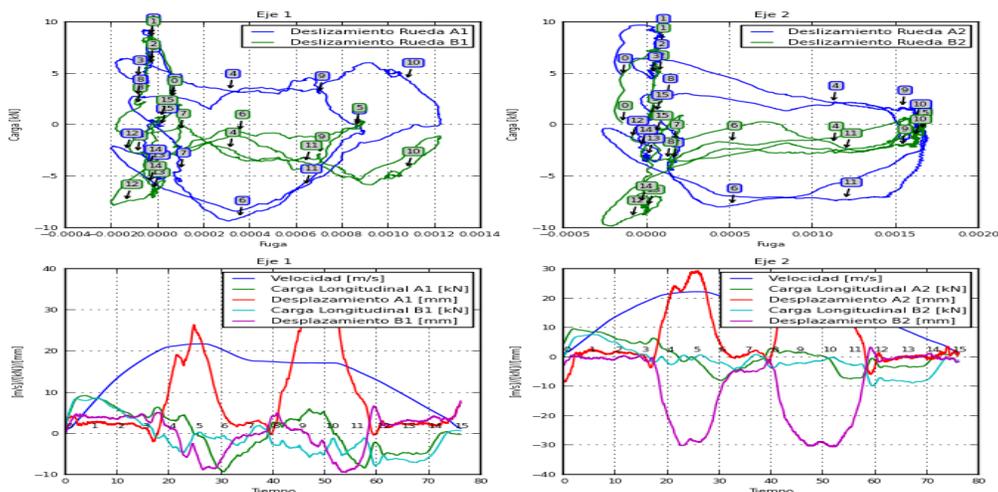
D.2) Tramo “Plaza Sucre” a “Gato Negro”



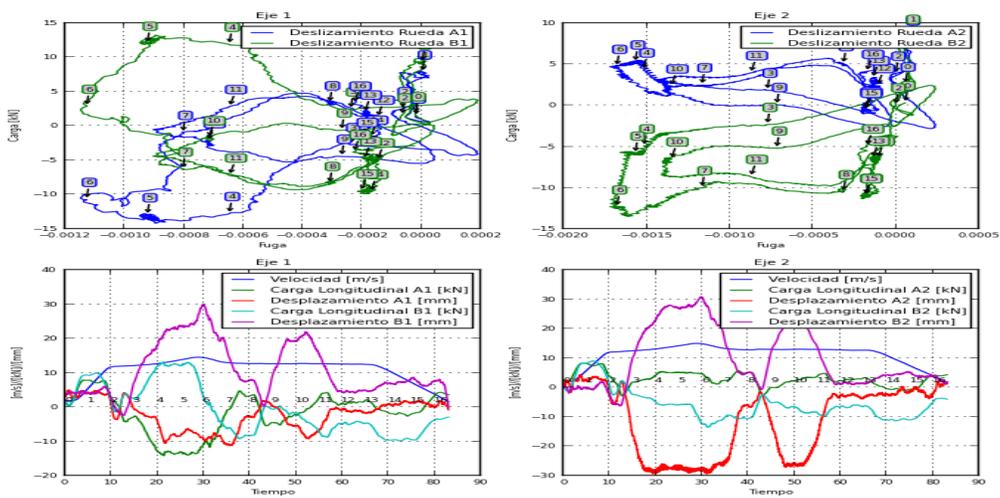
D.3) Tramo “Gato Negro” a “Agua Salud”



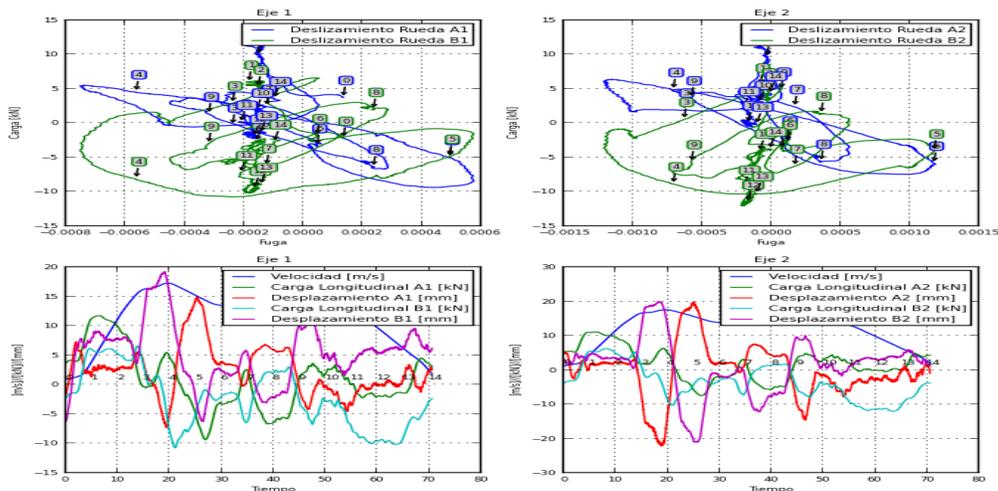
D.4) Tramo “Agua Salud” a “Caño Amarillo”



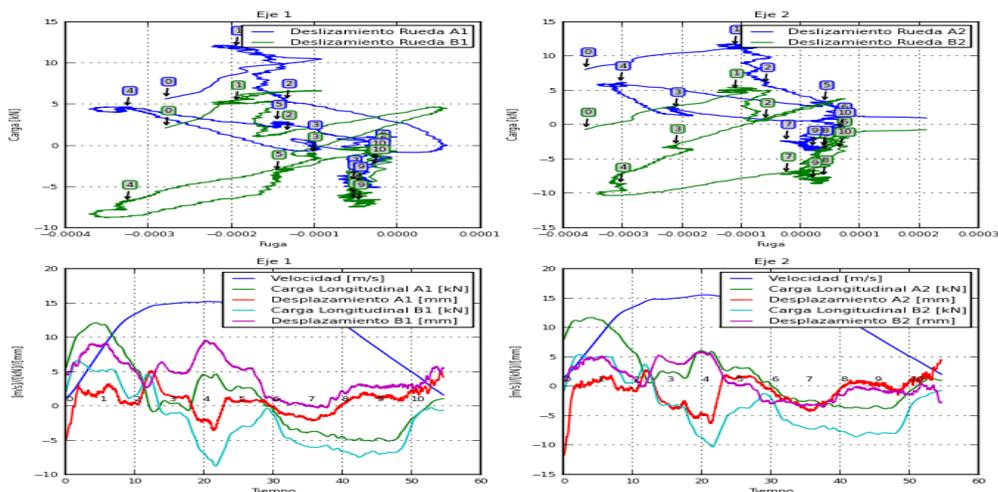
D.5) Tramo “Caño Amarillo” a “Capitolio”



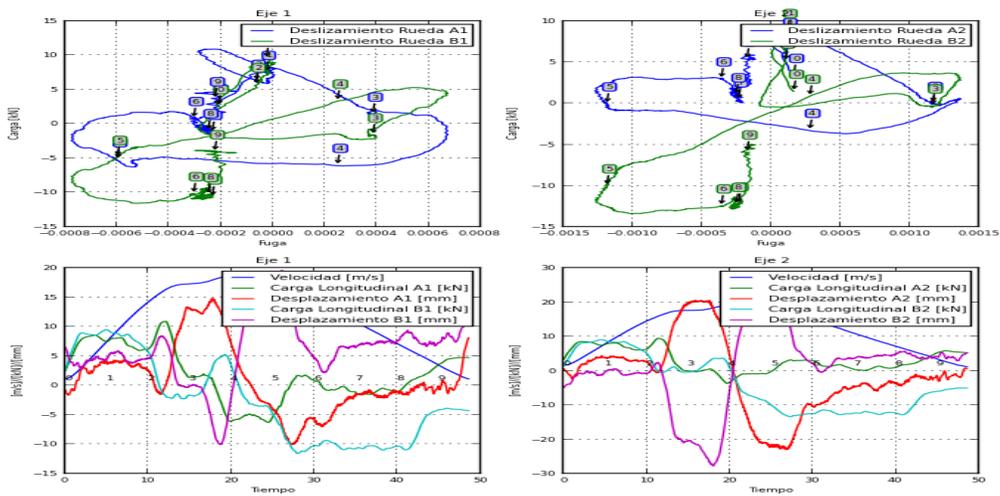
D.6) Tramo “Capitolio” a “Hoyada”



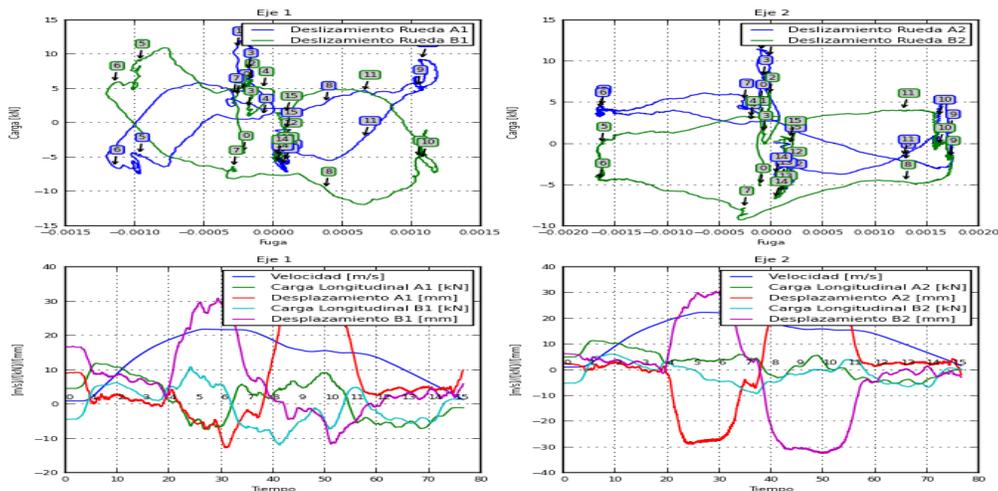
D.7) Tramo “Hoyada” a “Parque Carabobo”



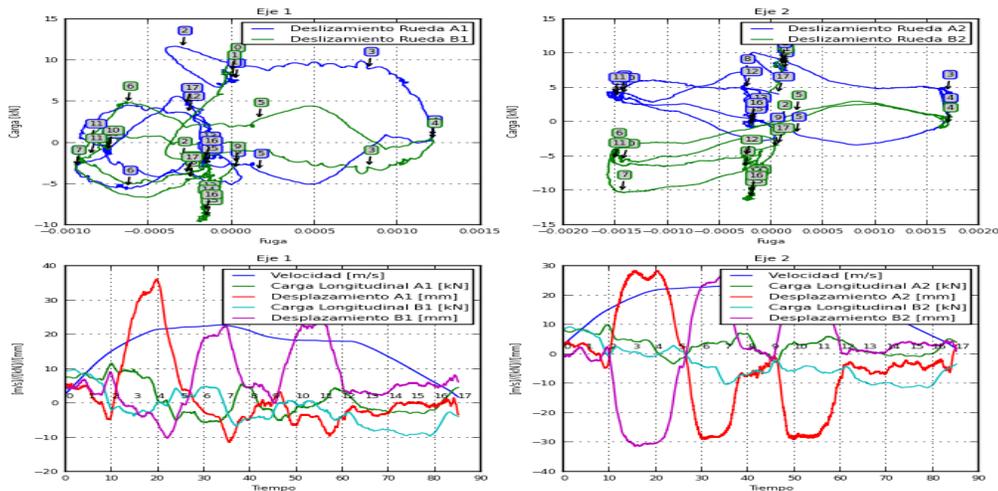
D.8) Tramo “Parque Carabobo” a “Bellas Artes”



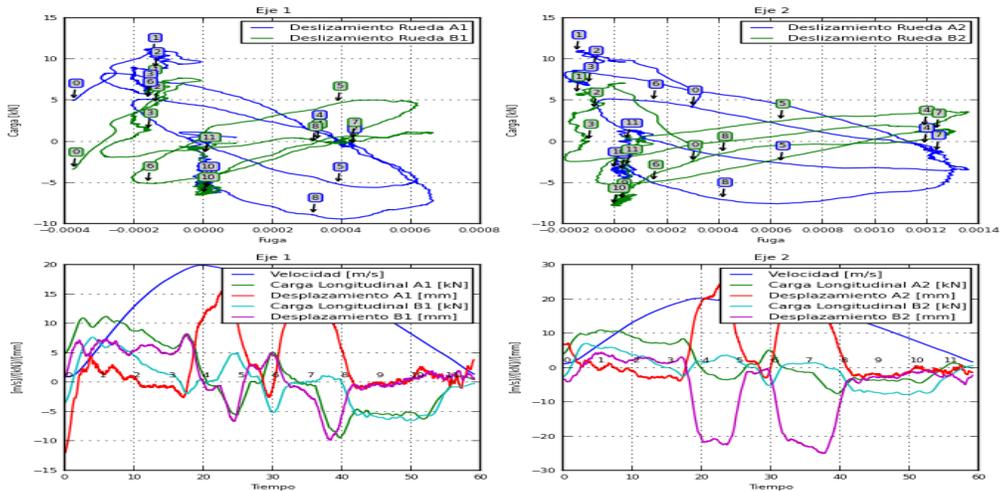
D.9) Tramo “Bellas Artes” a “Colegio de Ingenieros”



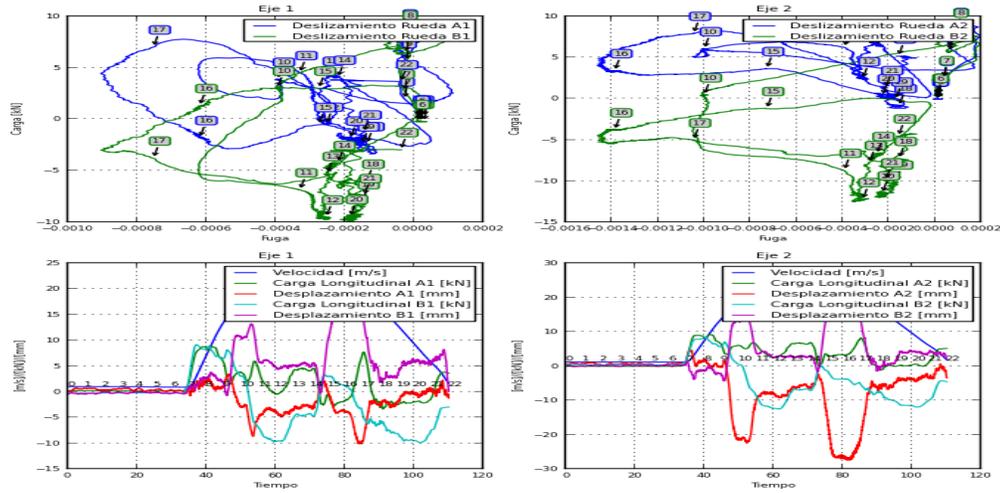
D.10) Tramo “Colegio de Ingenieros” a “Plaza Venezuela”



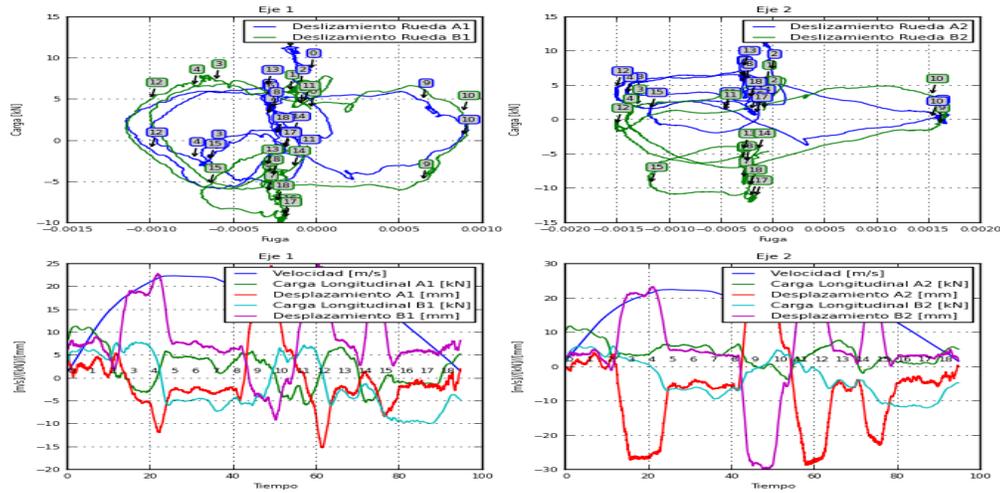
D.11) Tramo “Plaza Venezuela” a “Sabana Grande”



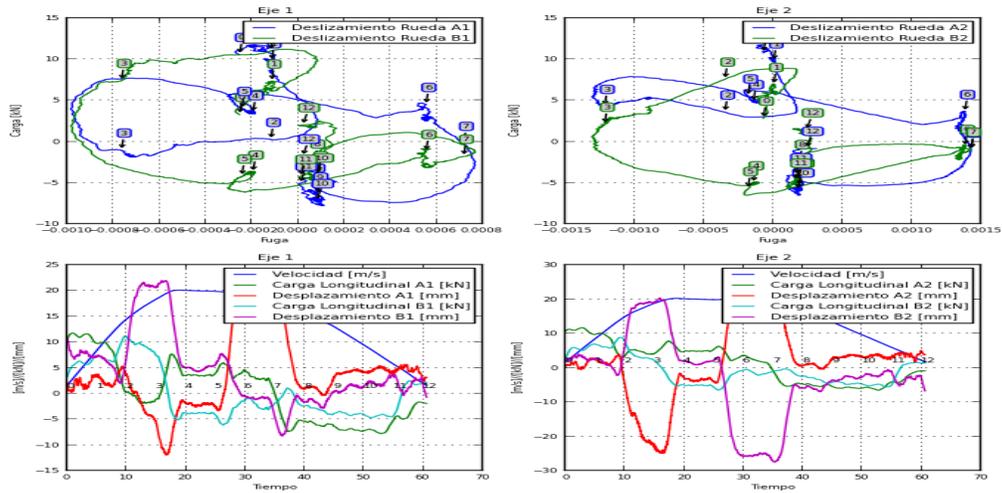
D.12) Tramo “Sabana Grande” a “Chacaito”



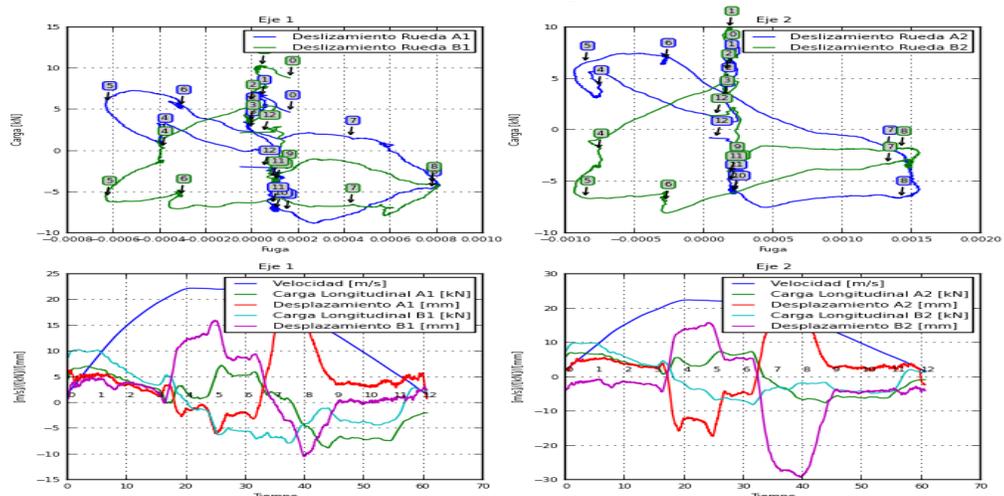
D.13) Tramo “Chacaito” a “Chacao”



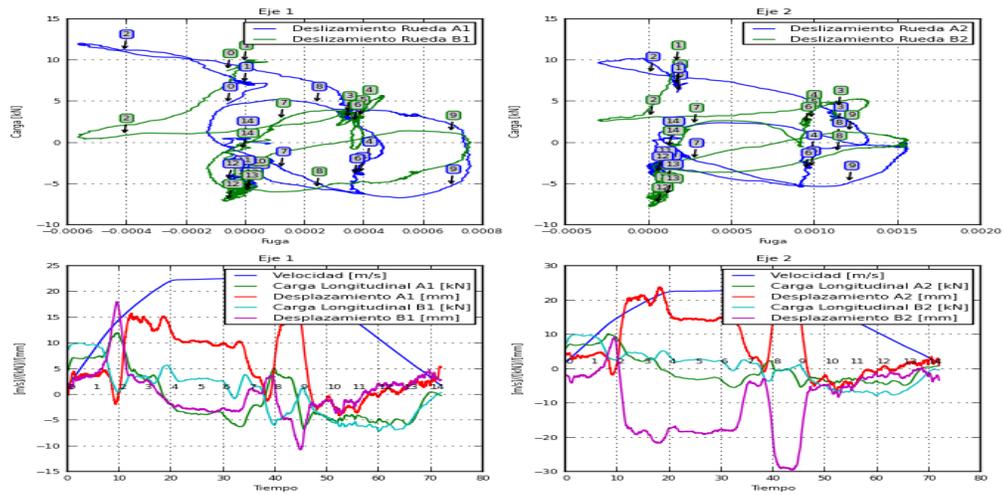
D.14) Tramo “Chacao” a “Altamira”



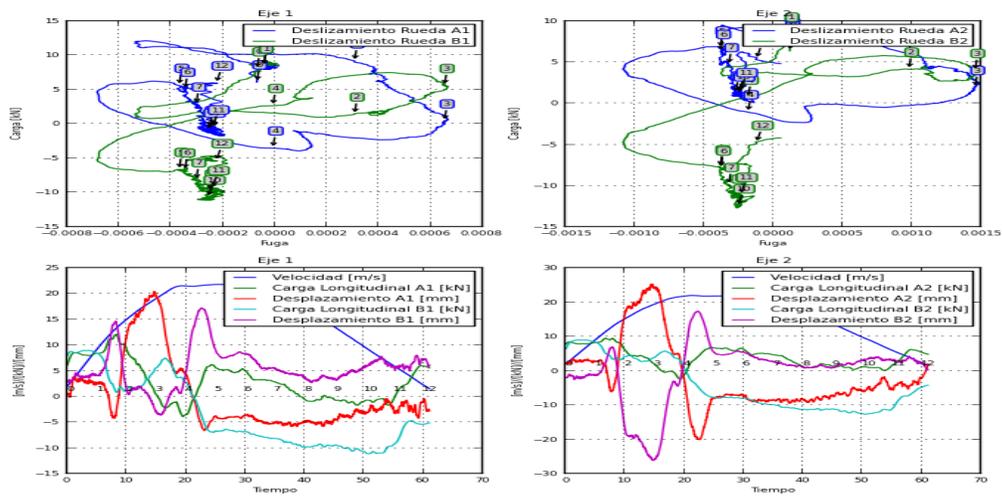
D.15) Tramo “Altamira” a “Parque del este” (“Miranda”)



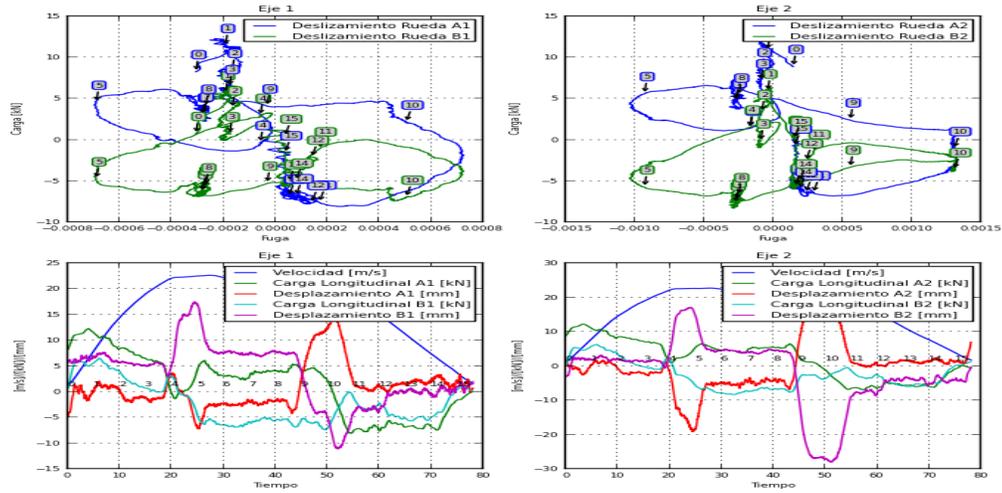
D.16) Tramo “Parque del este” a “Los dos caminos”



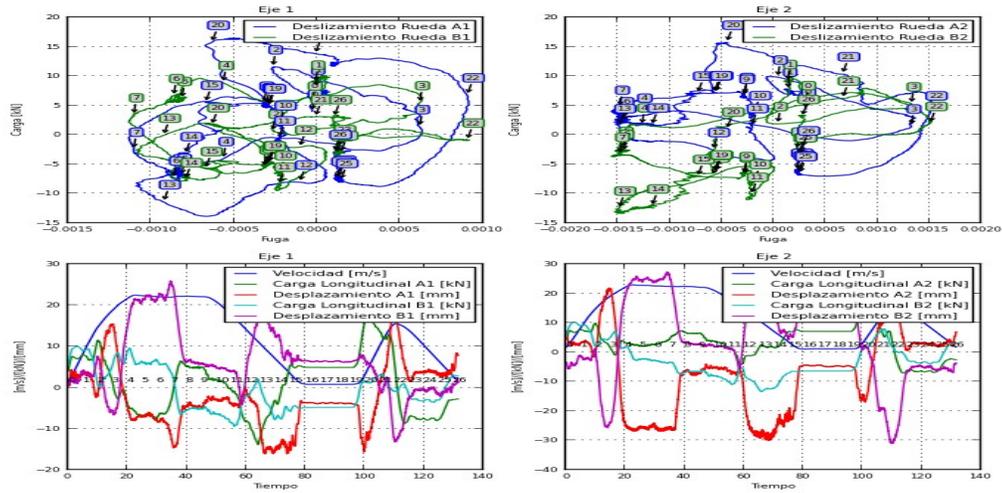
D.17) Tramo “Los dos caminos” a “Los Cortijos”



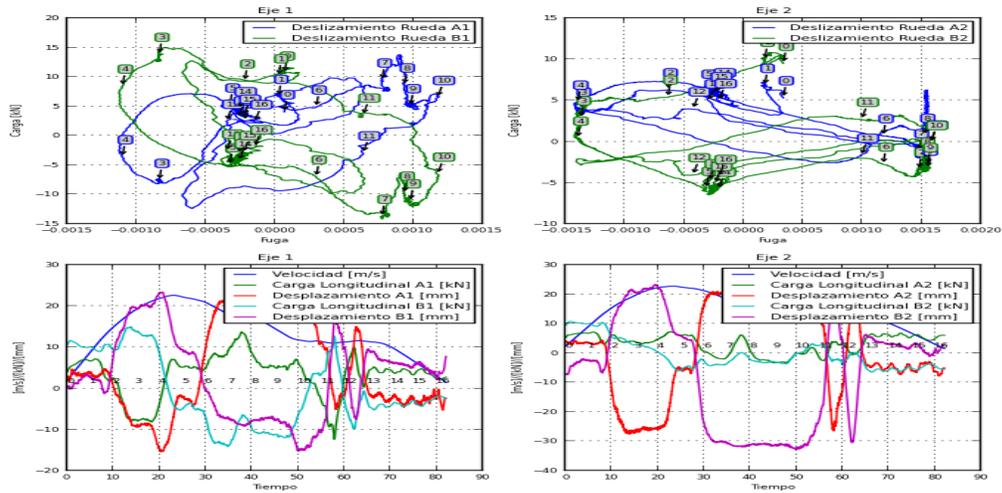
D.18) Tramo “Los Cortijos” a “La California”



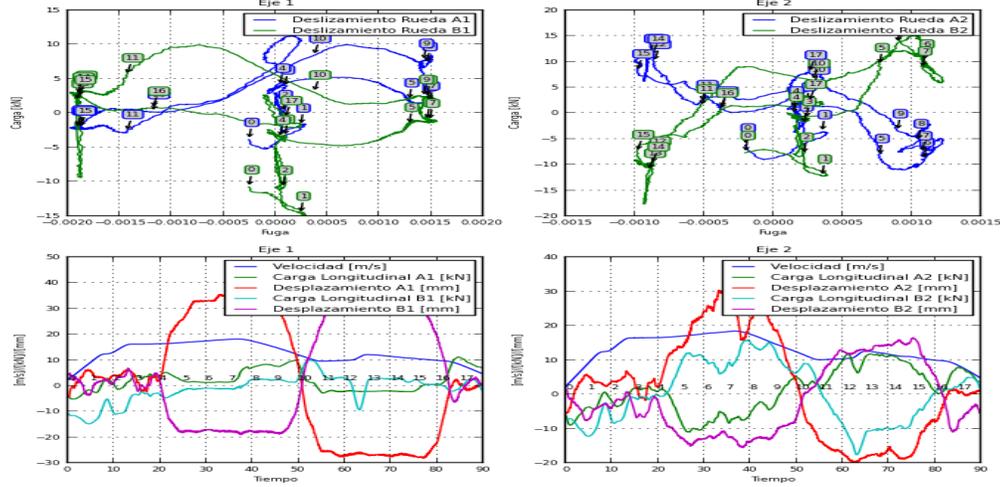
D.19) Tramo “La California” a “Petare”



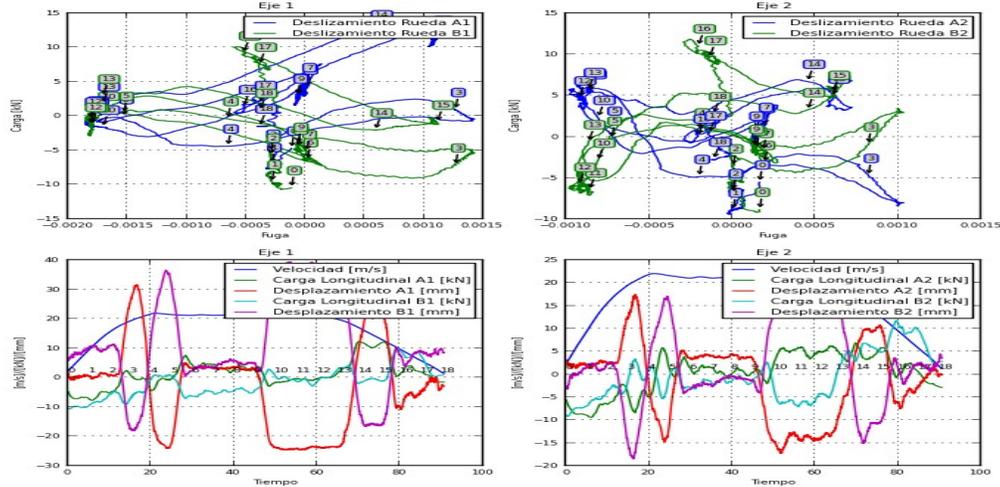
D.20) Tramo “Petare” a “Palo Verde”



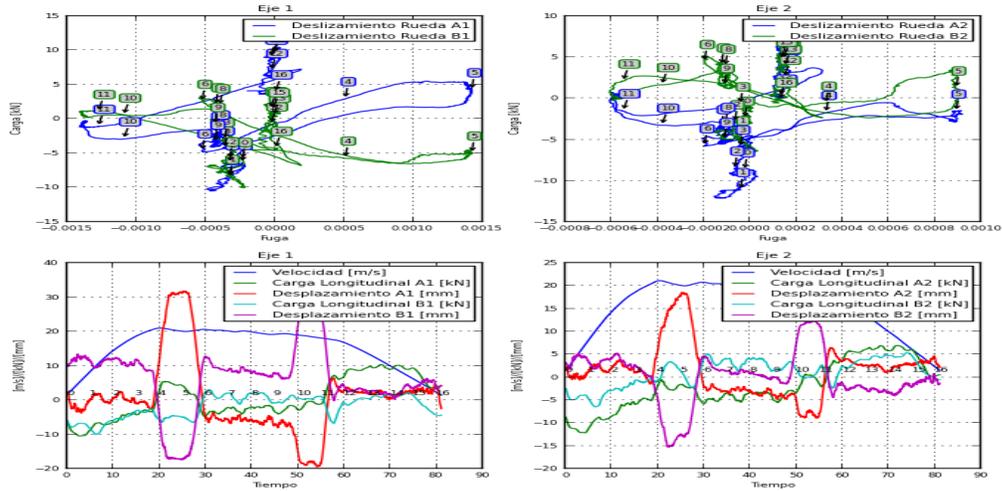
D.21) Tramo “Palo Verde” a “Petare”



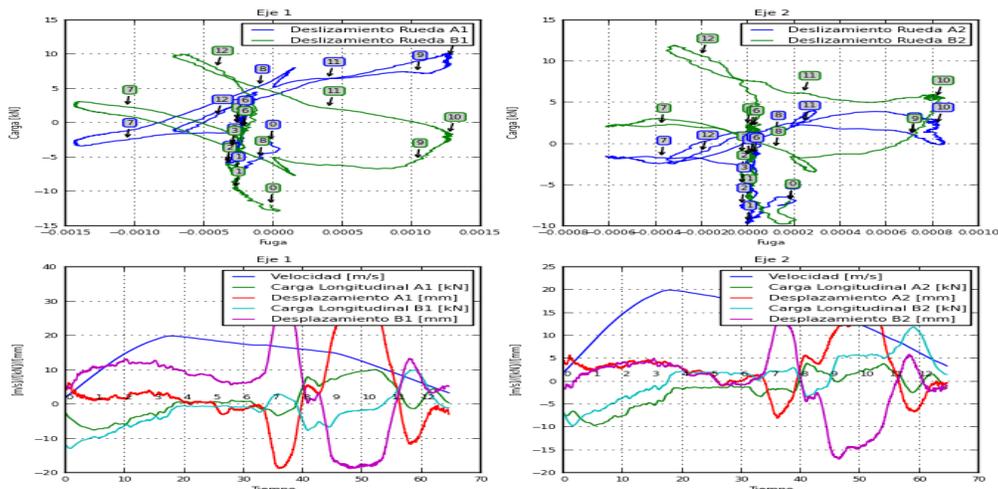
D.22) Tramo “Petare” a “La California”



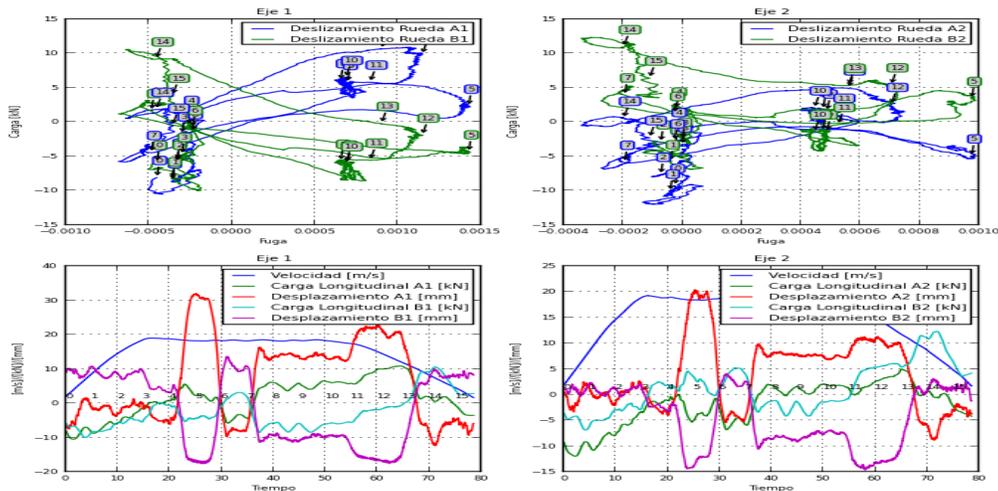
D.23) Tramo “La California” a “Los Cortijos”



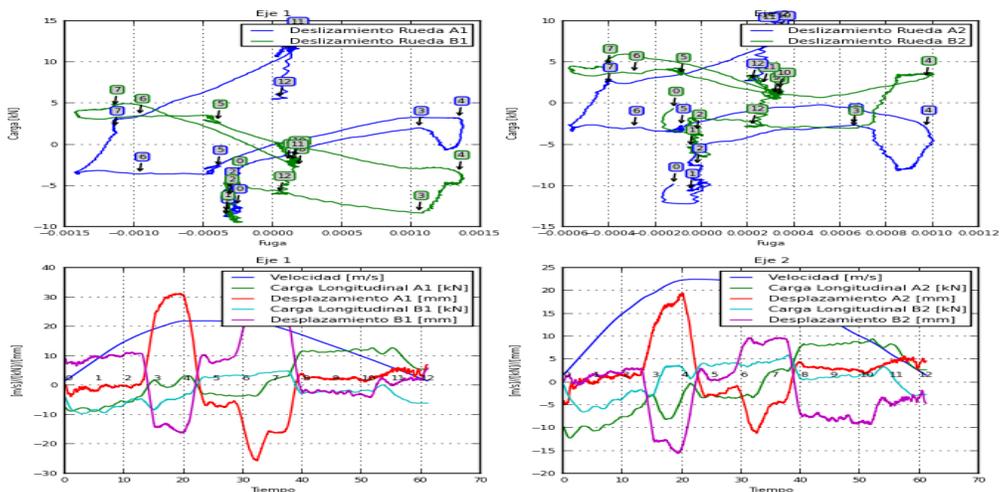
D.24) Tramo “Los Cortijos” a “Los dos caminos”



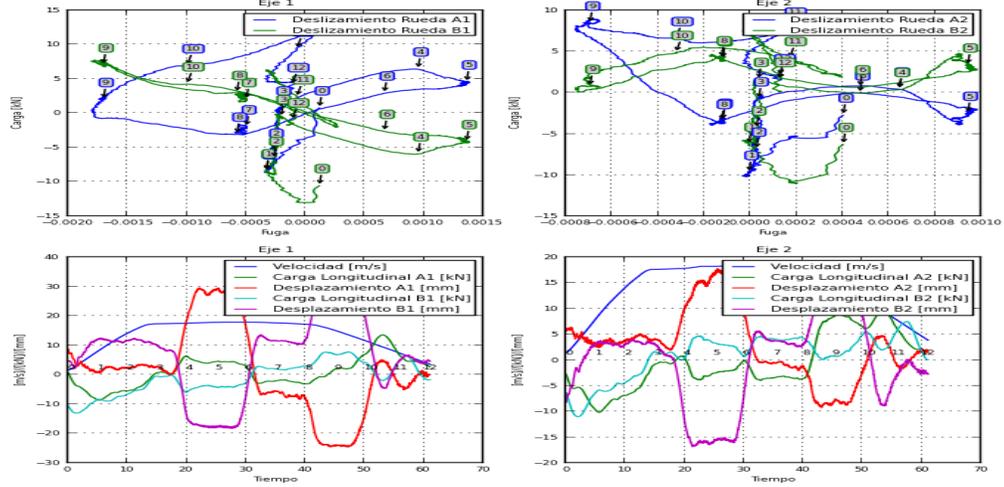
D.25) Tramo “Los Dos caminos” a “Parque del este”



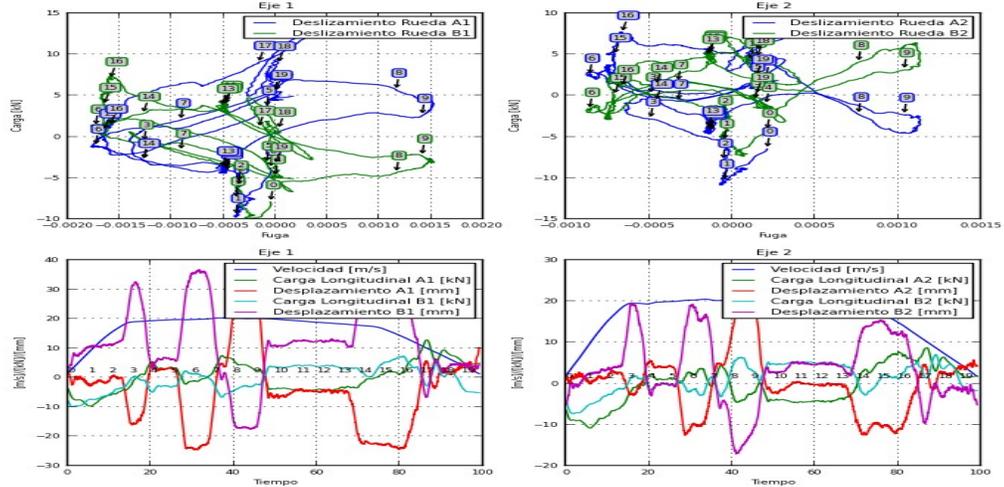
D.26) Tramo “Parque del este” a “Altamira”



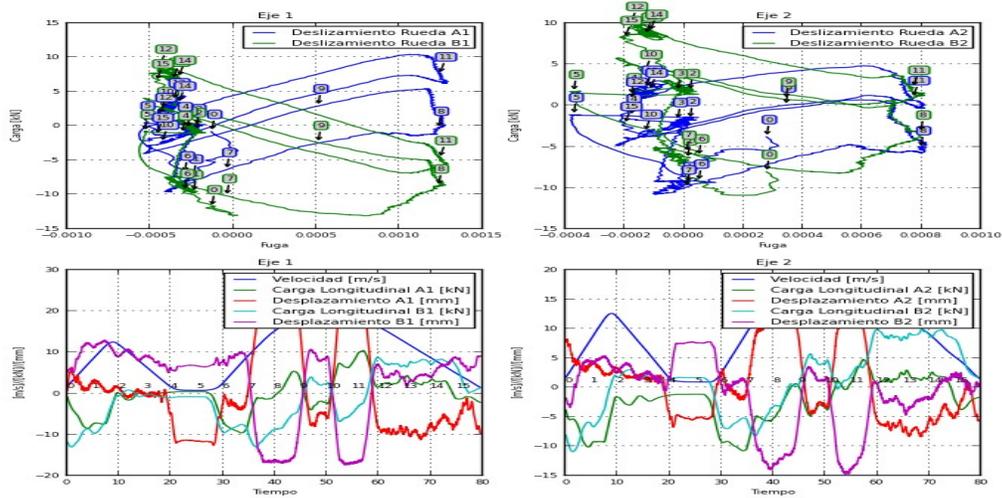
D.27) Tramo "Altamira" a "Chacao"



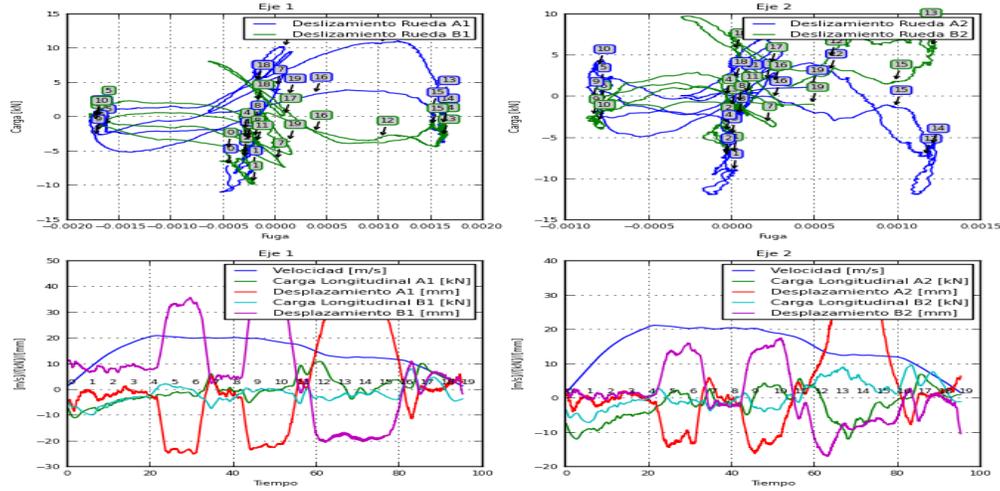
D.28) Tramo "Chacao" a Chacaito"



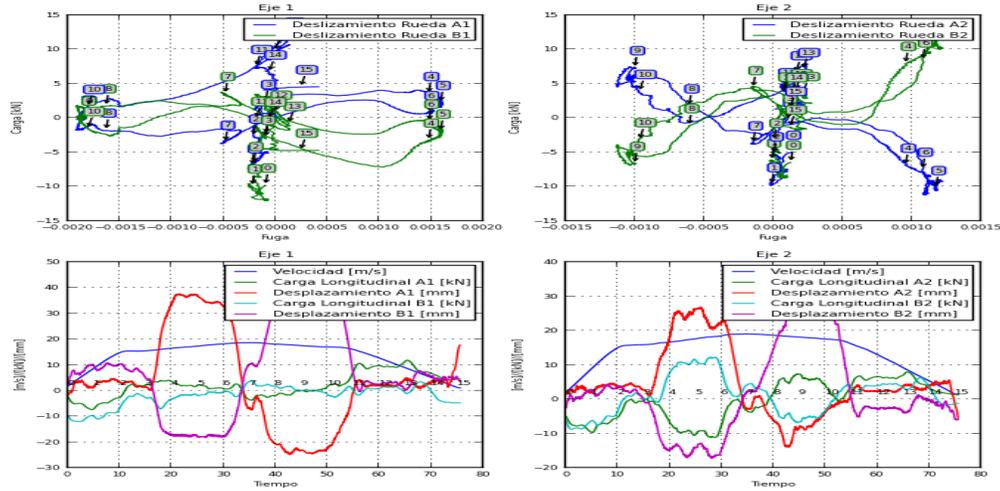
D.29) Tramo "Chacaito" a "Sabana Grande"



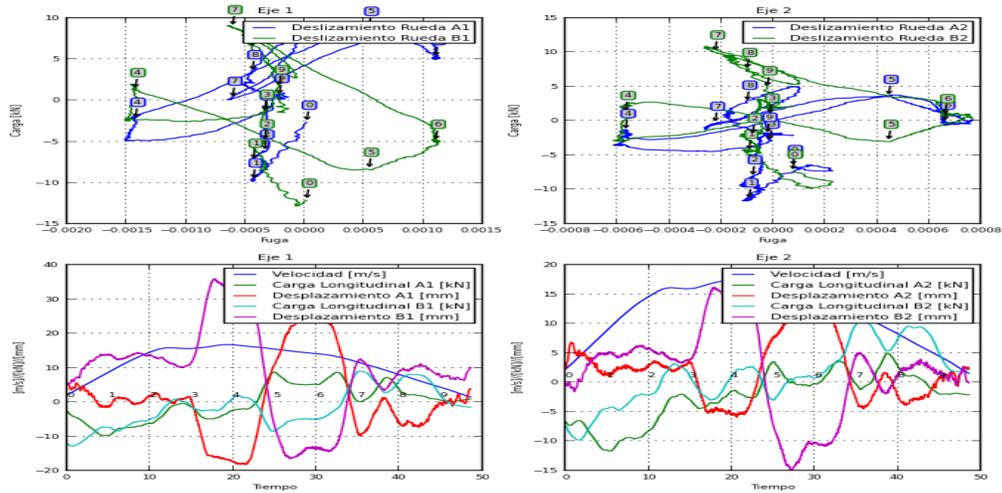
D.30) Tramo “Sabana Grande” a “Plaza Venezuela”



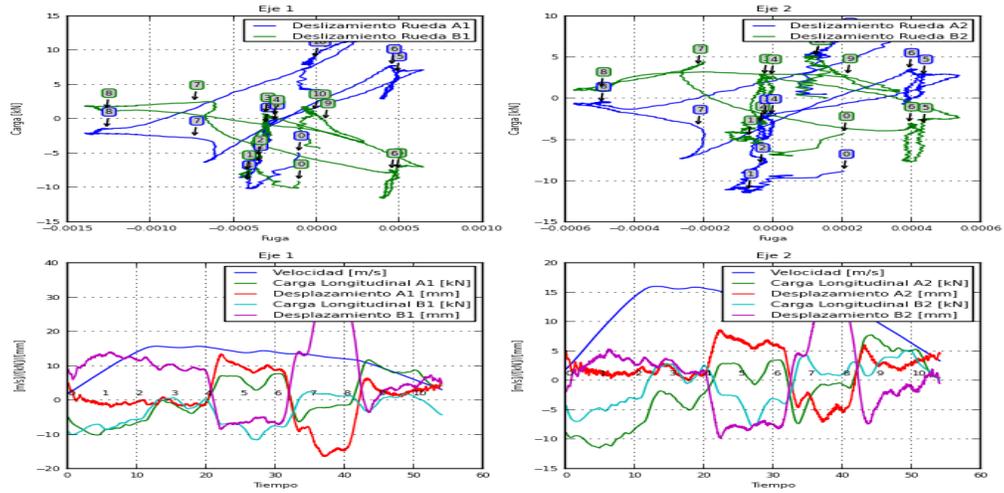
D.31) Tramo “Plaza Venezuela” a “Colegio de Ingenieros”



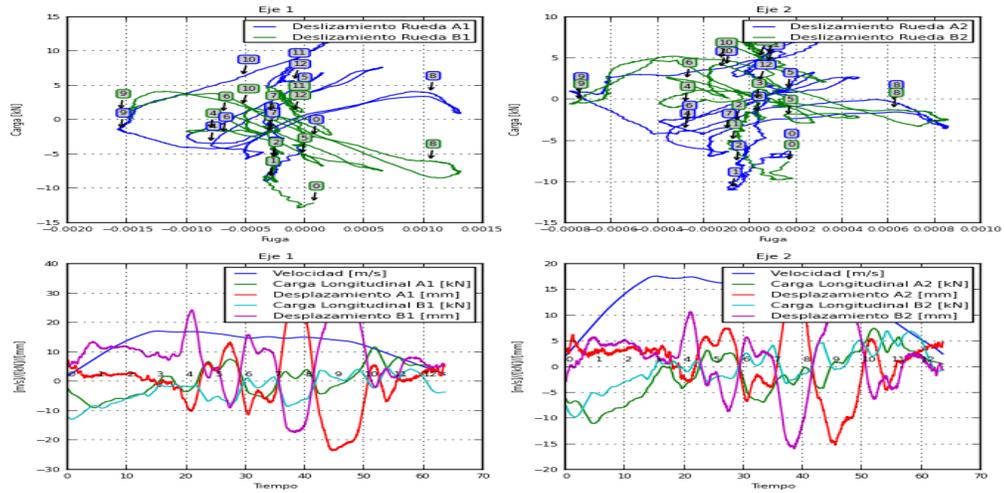
D.32) Tramo “Colegio de Ingenieros” a “Bellas Artes”



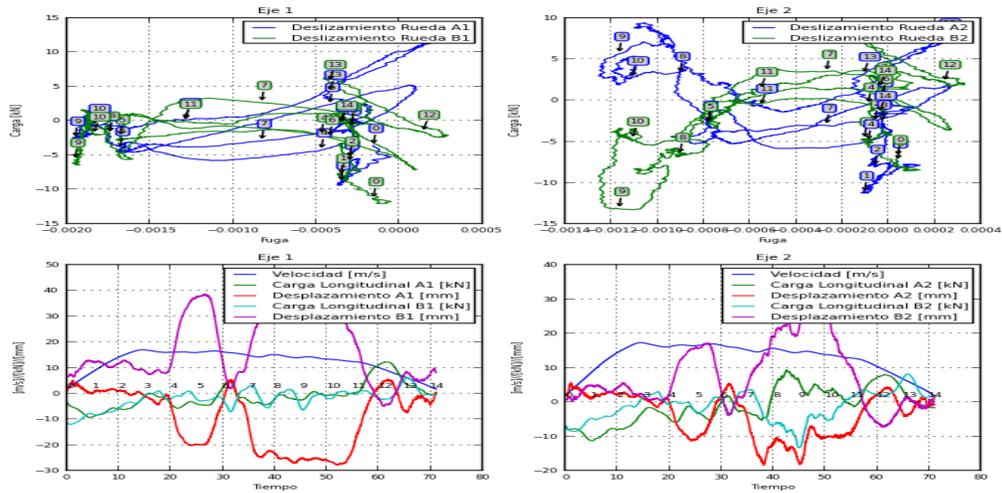
D.33) Tramo “Bellas Artes” a “Parque Carabobo”



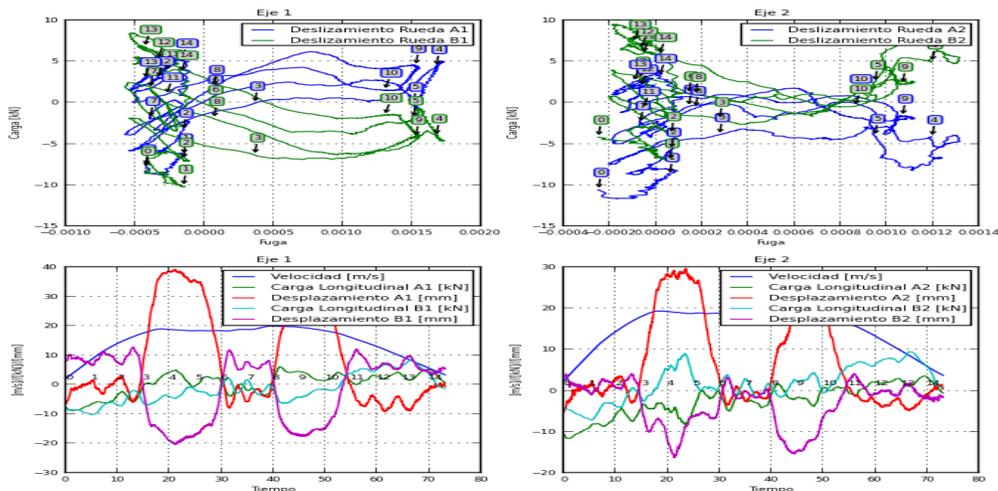
D.34) Tramo “Parque Carabobo” a “Hoyada”



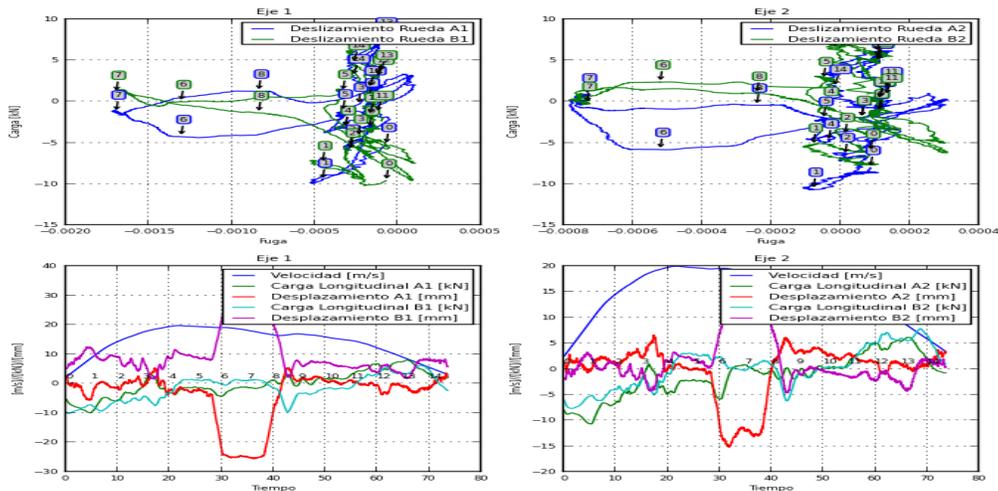
D.35) Tramo “Hoyada” a “Capitolio”



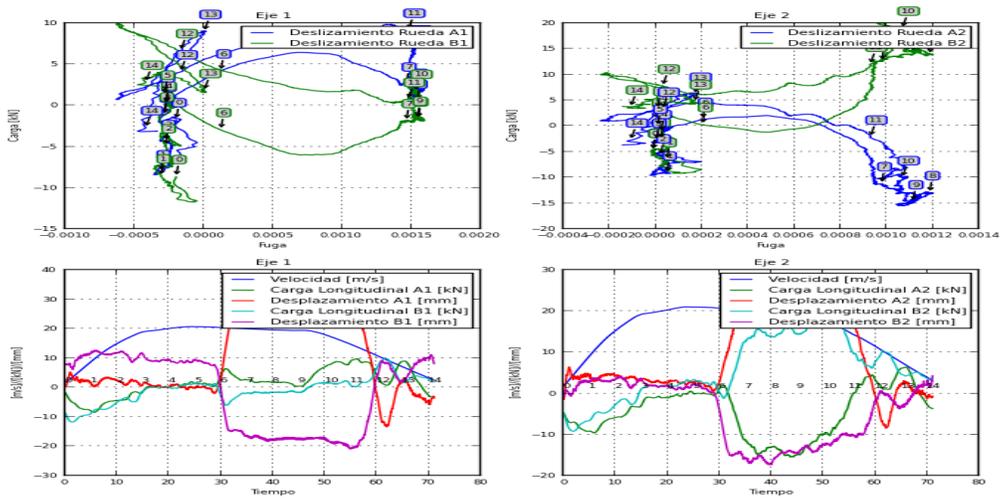
D.36) Tramo “Capitolio” a “Caño Amarillo”



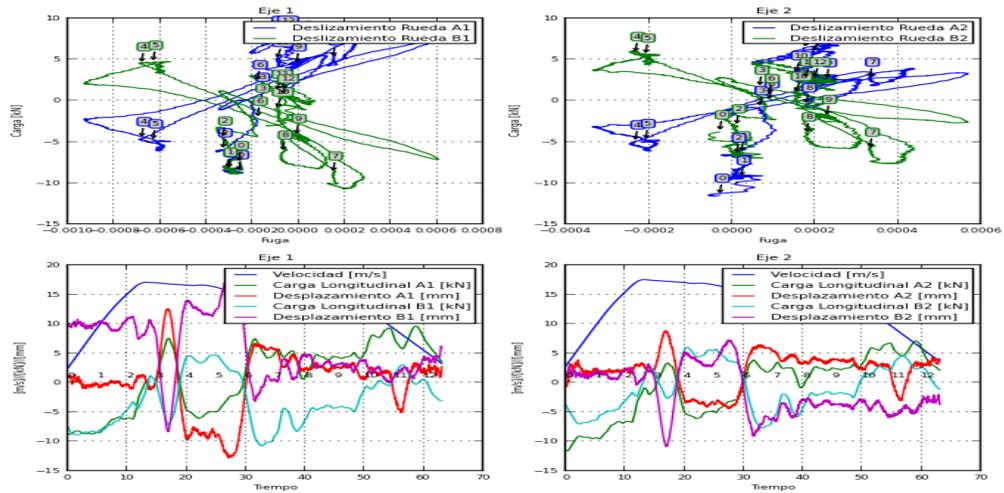
D.37) Tramo “Caño Amarillo” a “Agua Salud”



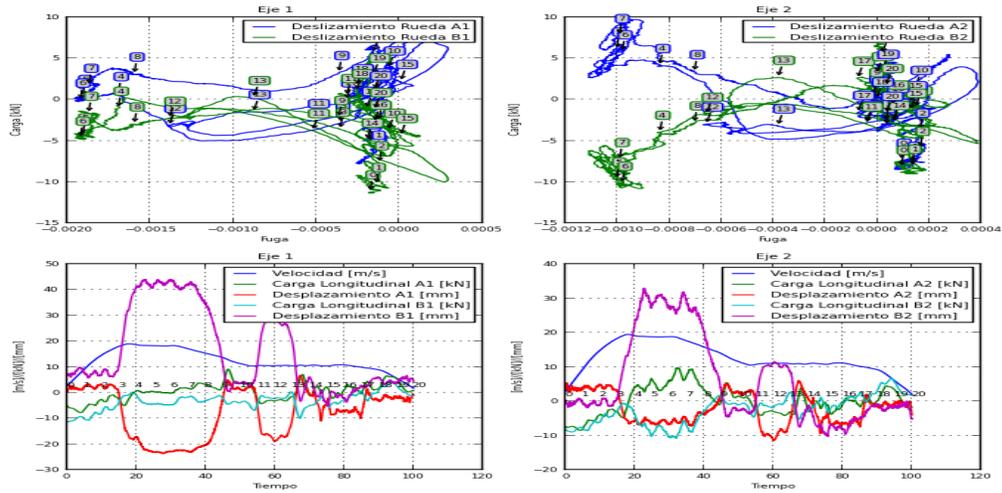
D.38) Tramo “Agua Salud” a “Gato Negro”



D.39) Tramo “Gato Negro” a “Plaza Sucre”

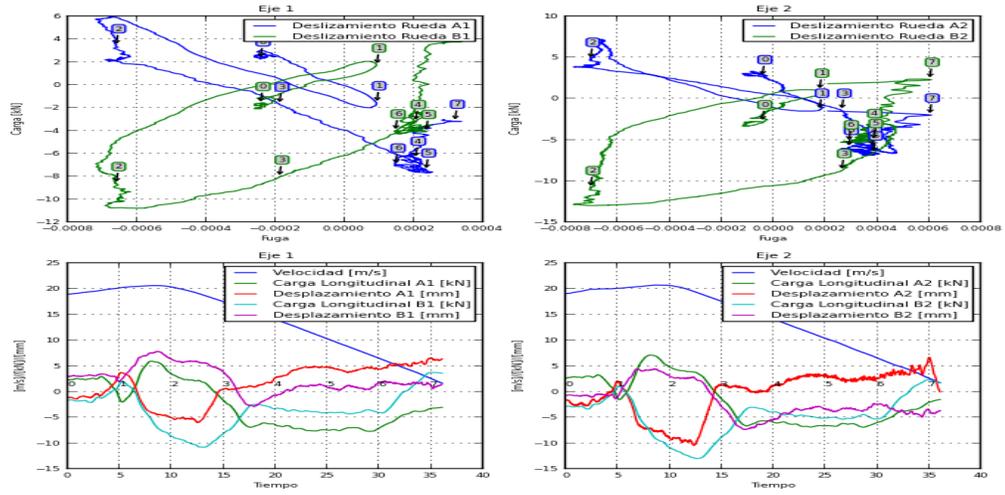


D.40) Tramo “Plaza Sucre” a “Perez Bonalde”

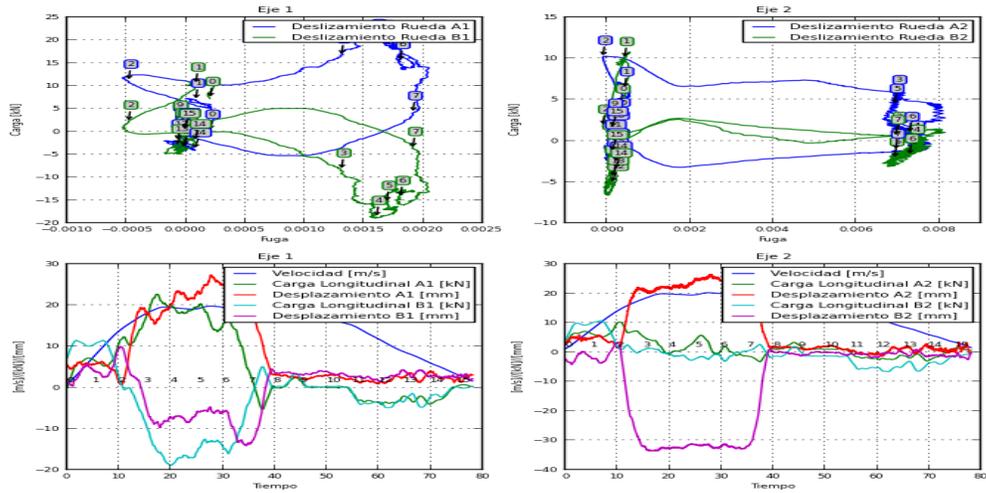


Apéndice E:
**Gráficos de las cargas vs la fuga longitudinal
considerando la propuesta de radio comun de contacto y
discretización del perfil de la rueda obtenidos mediante
los resultados de la empresa Transportation Technology
Center, Inc. en cada tramo de la Línea 1.**

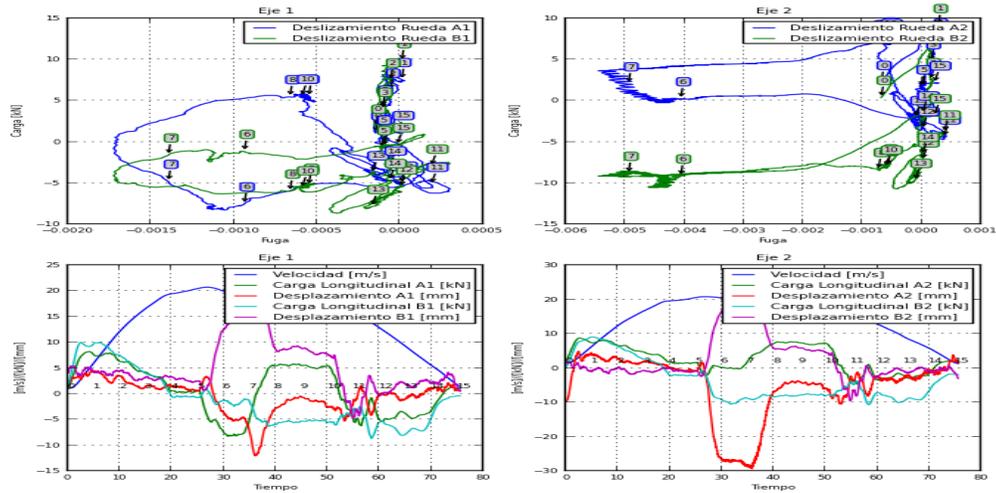
E.1) Tramo “Perez Bonalde” a “Plaza Sucre”



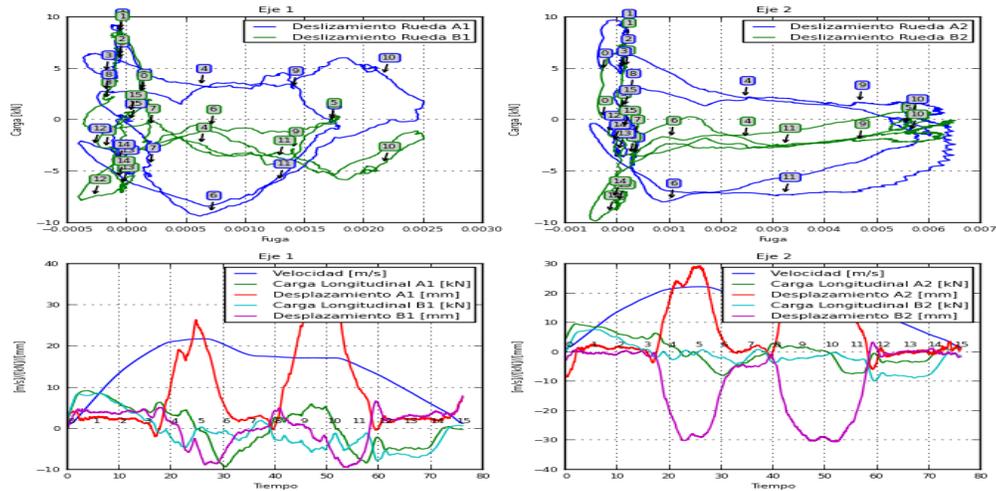
E.2) Tramo “Plaza Sucre” a “Gato Negro”



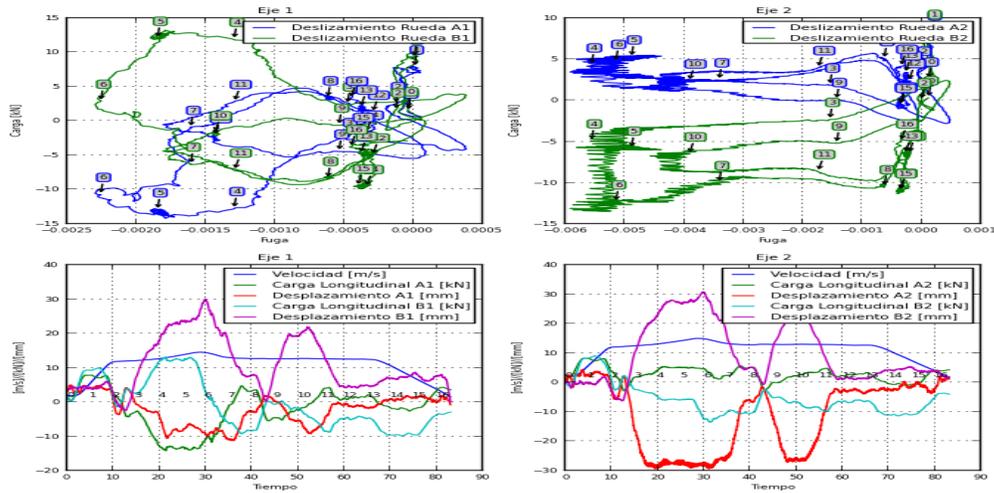
E.3) Tramo “Gato Negro” a “Agua Salud”



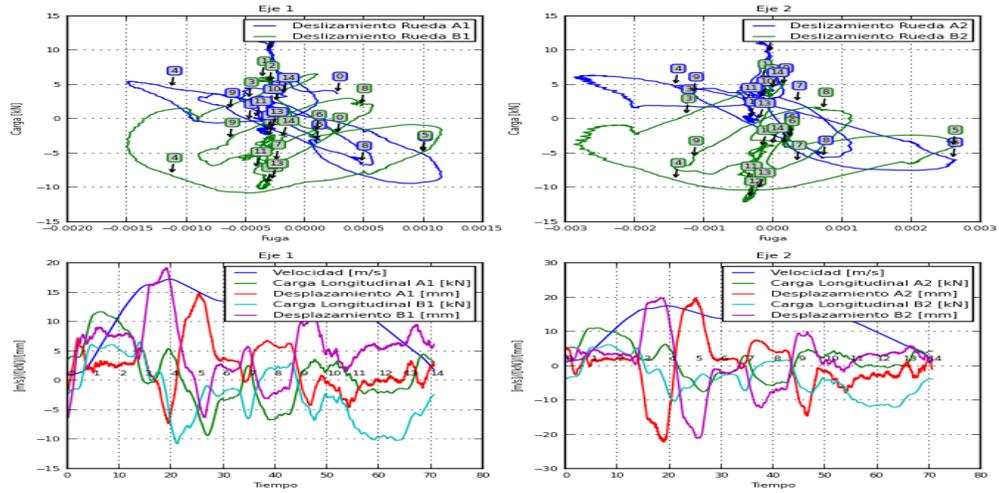
E.4) Tramo “Agua Salud” a “Caño Amarillo”



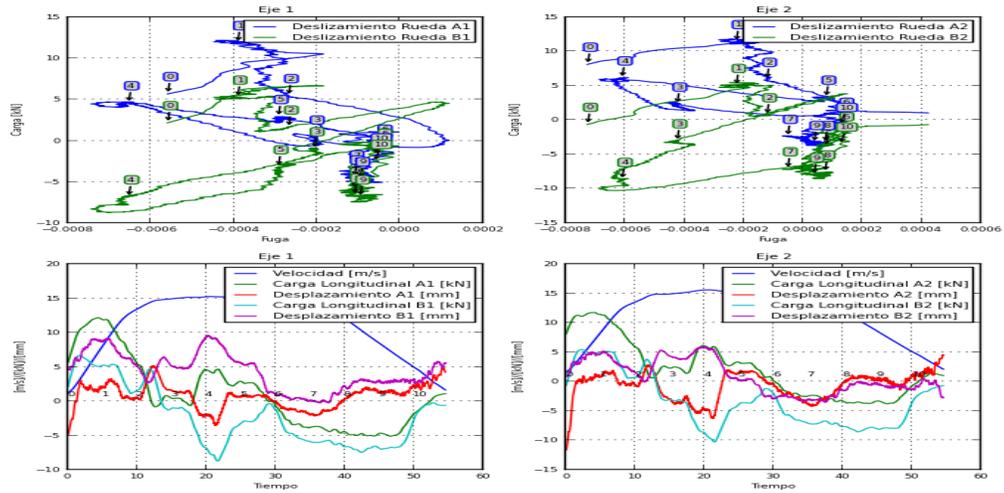
E.5) Tramo “Caño Amarillo” a “Capitolio”



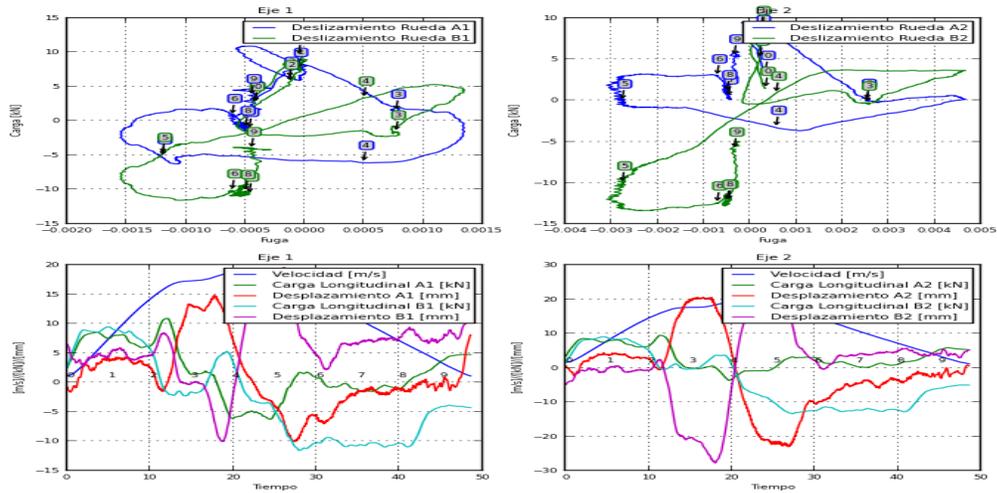
E.6) Tramo “Capitolio” a “Hoyada”



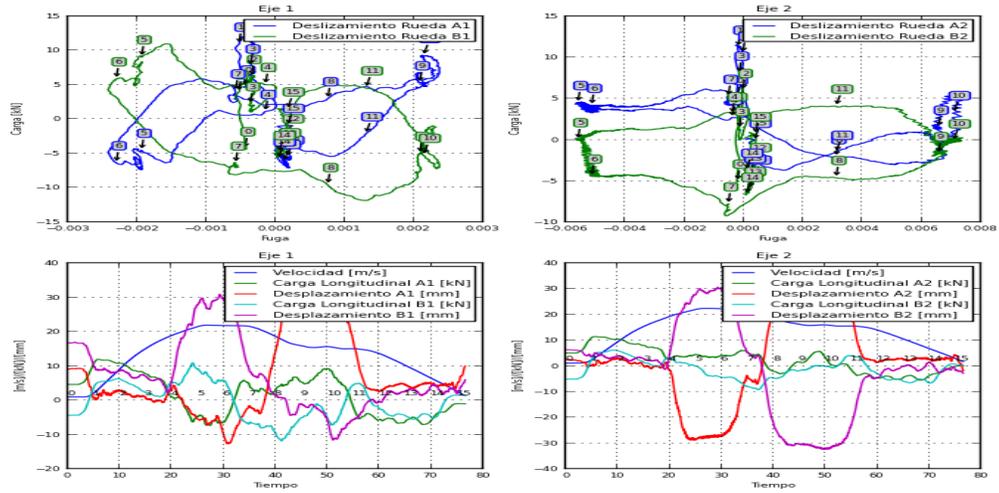
E.7) Tramo “Hoyada” a “Parque Carabobo”



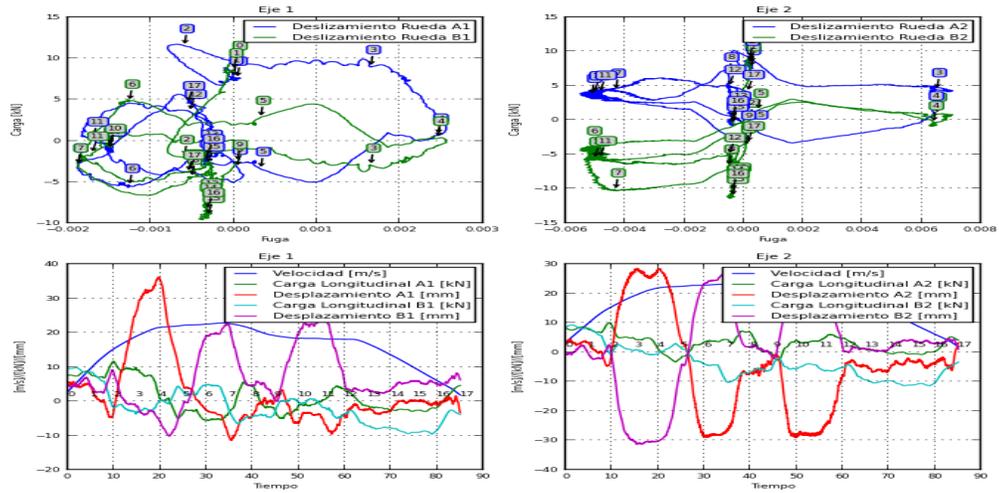
E.8) Tramo “Parque Carabobo” a “Bellas Artes”



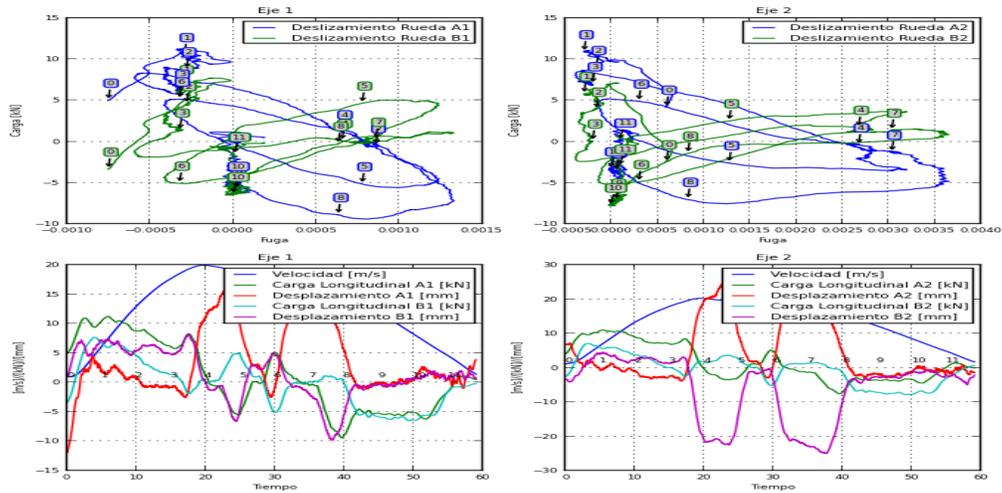
E.9) Tramo “Bellas Artes” a “Colegio de Ingenieros”



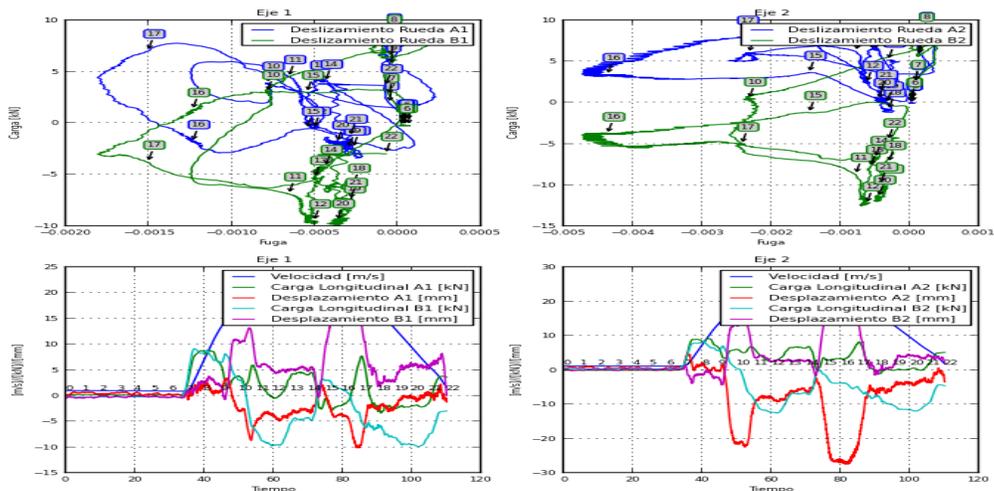
E.10) Tramo “Colegio de Ingenieros” a “Plaza Venezuela”



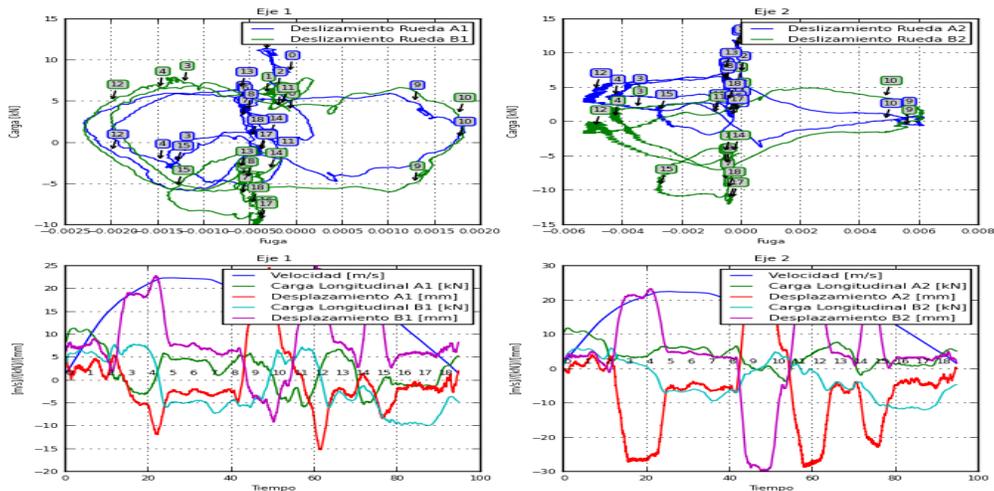
E.11) Tramo “Plaza Venezuela” a “Sabana Grande”



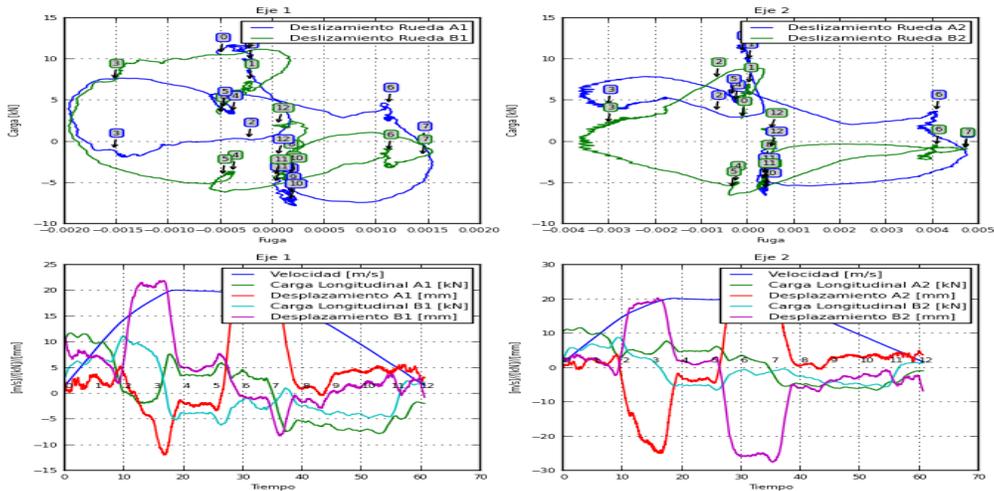
E.12) Tramo “Sabana Grande” a “Chacaito”



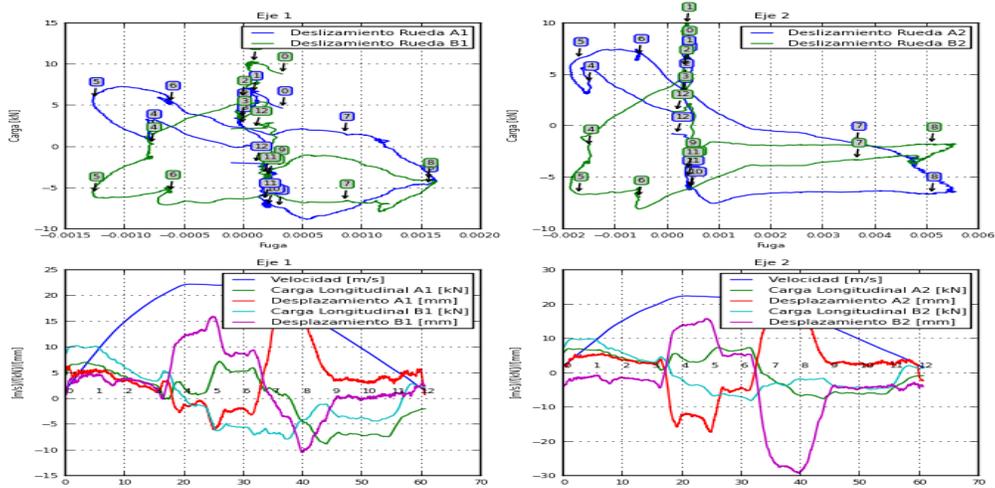
E.13) Tramo “Chacaito” a “Chacao”



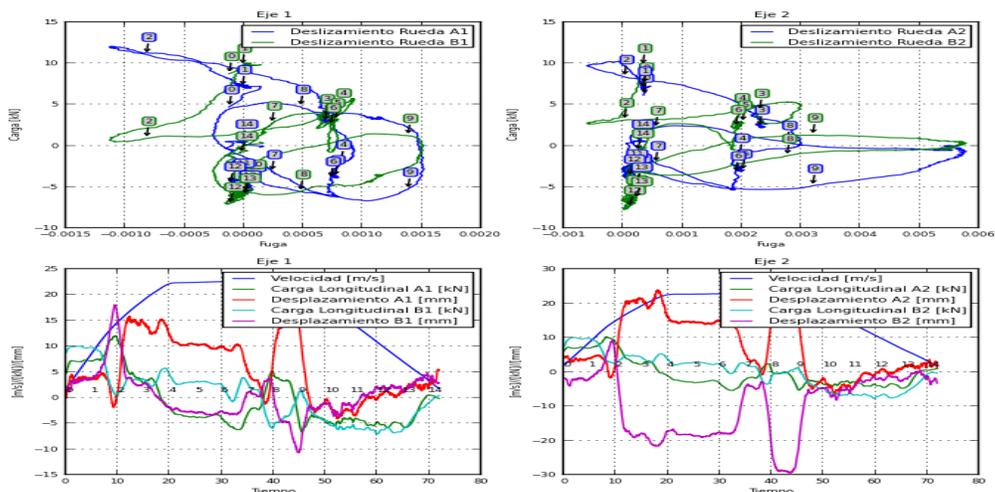
E.14) Tramo “Chacao” a “Altamira”



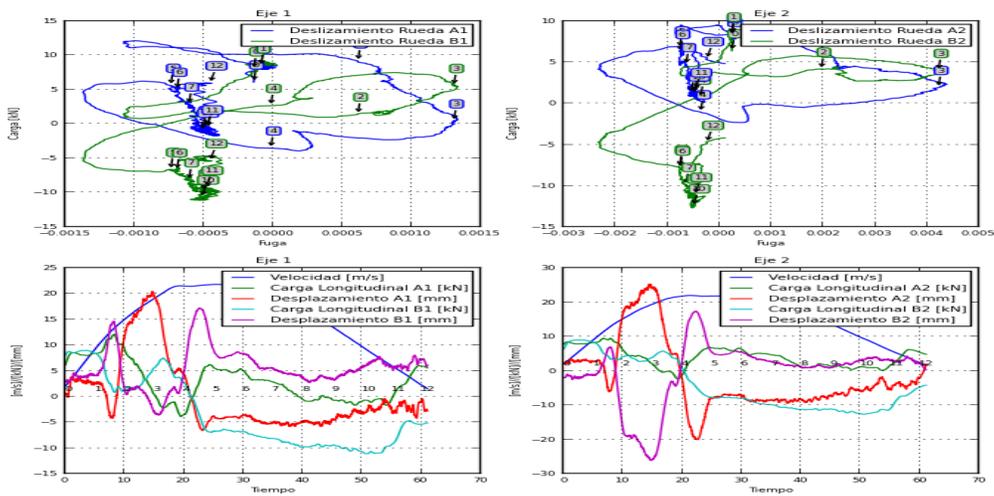
E.15) Tramo “Altamira” a “Parque del este” (“Miranda”)



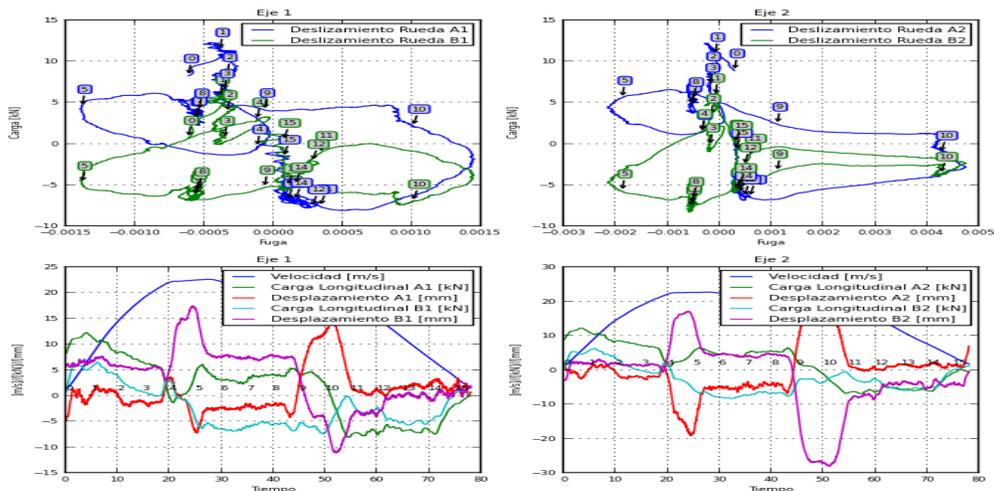
E.16) Tramo “Parque del este” a “Los dos caminos”



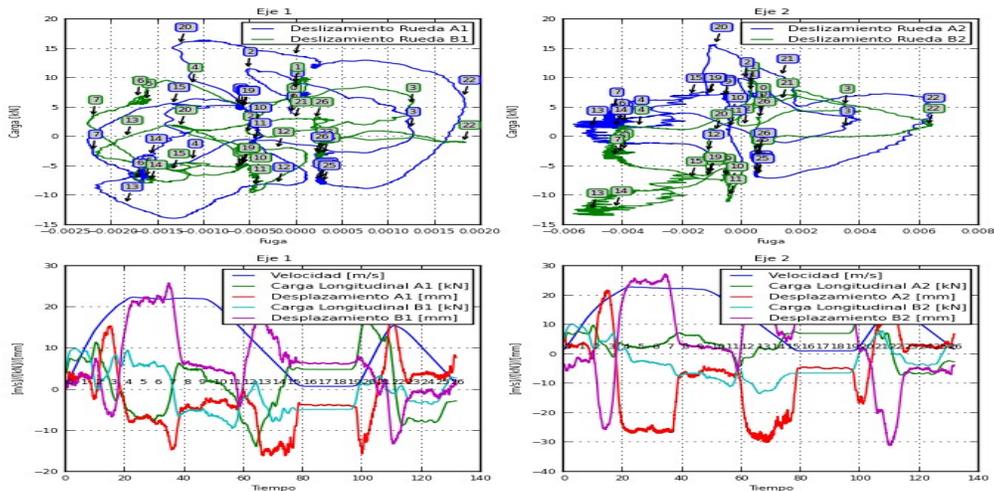
E.17) Tramo “Los dos caminos” a “Los Cortijos”



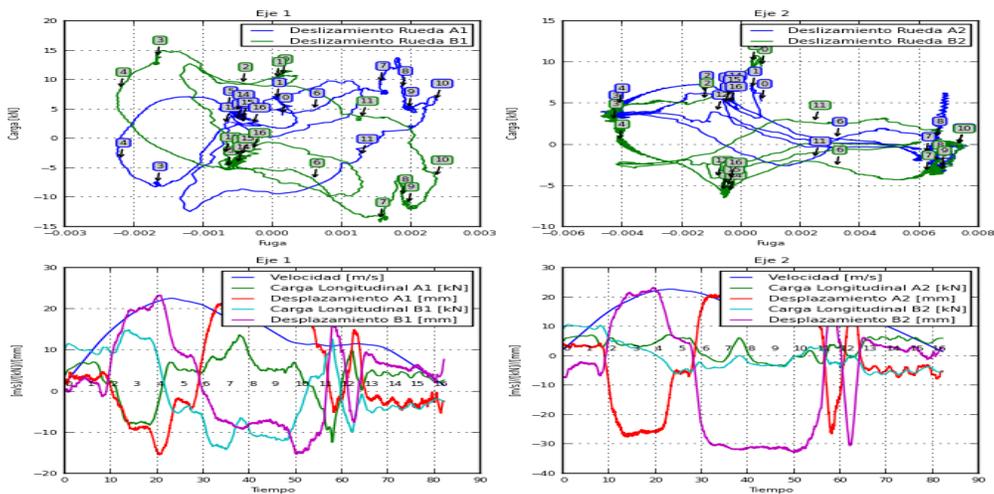
E.18) Tramo “Los Cortijos” a “La California”



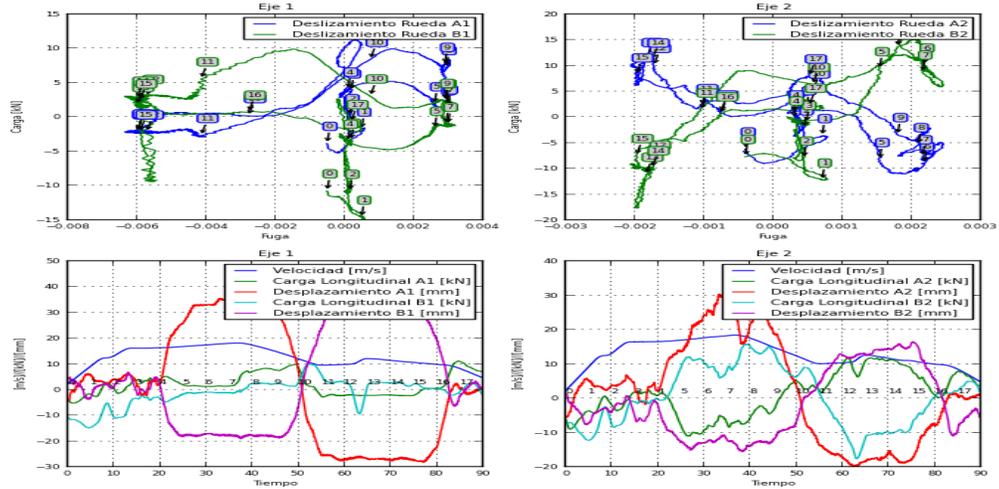
E.19) Tramo “La California” a “Petare”



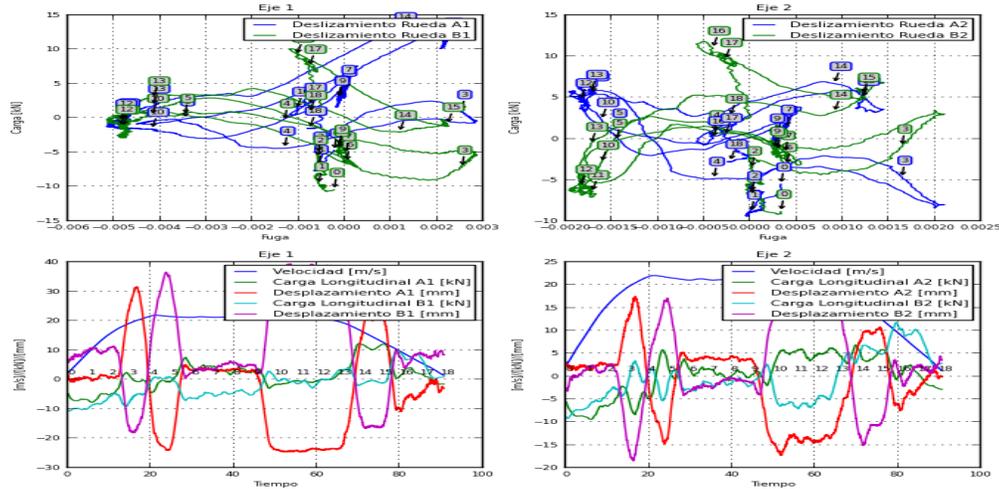
E.20) Tramo “Petare” a “Palo Verde”



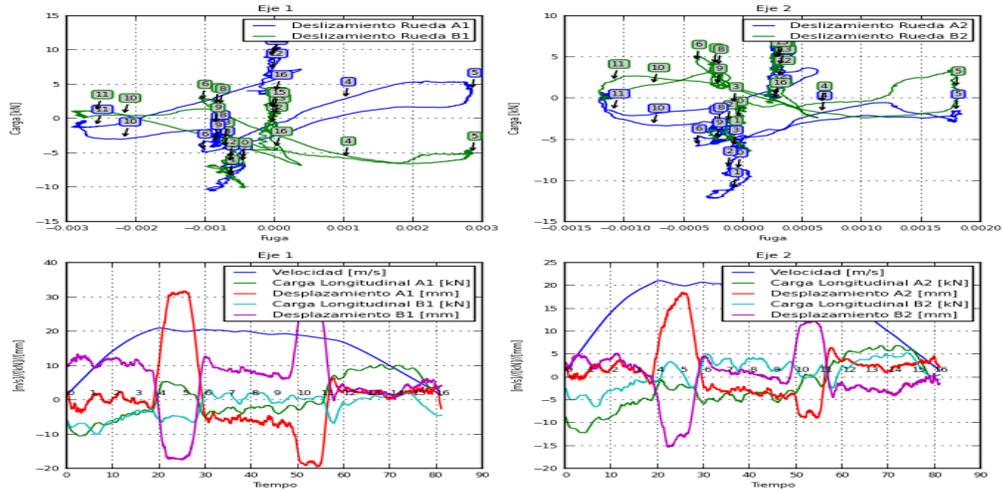
E.21) Tramo “Palo Verde” a “Petare”



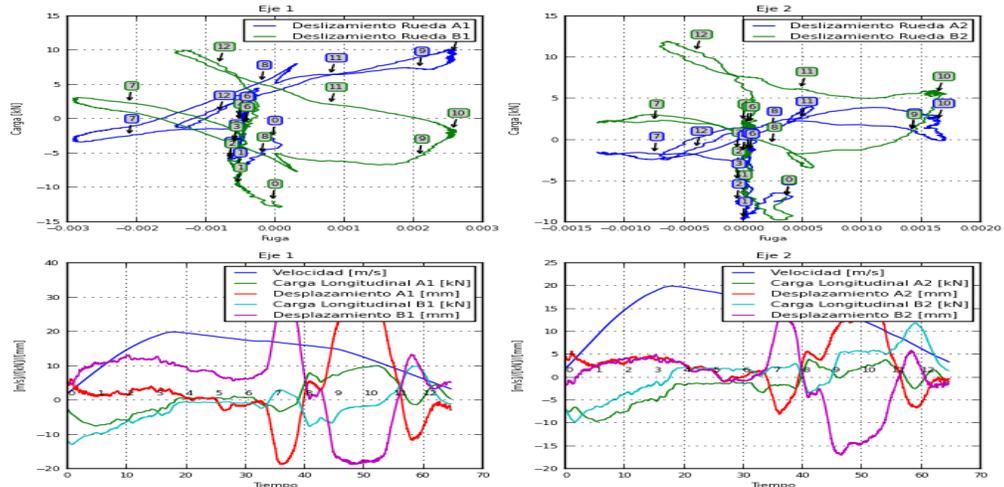
E.22) Tramo “Petare” a “La California”



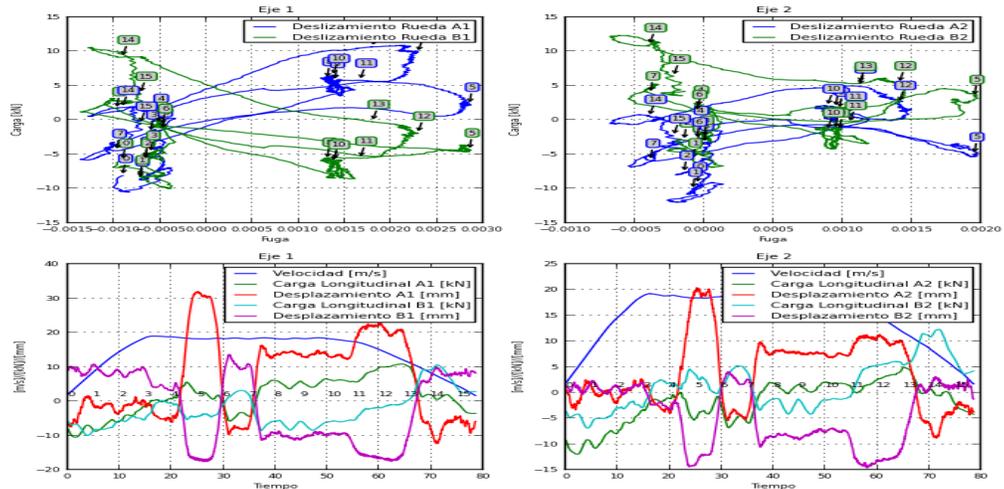
E.23) Tramo “La California” a “Los Cortijos”



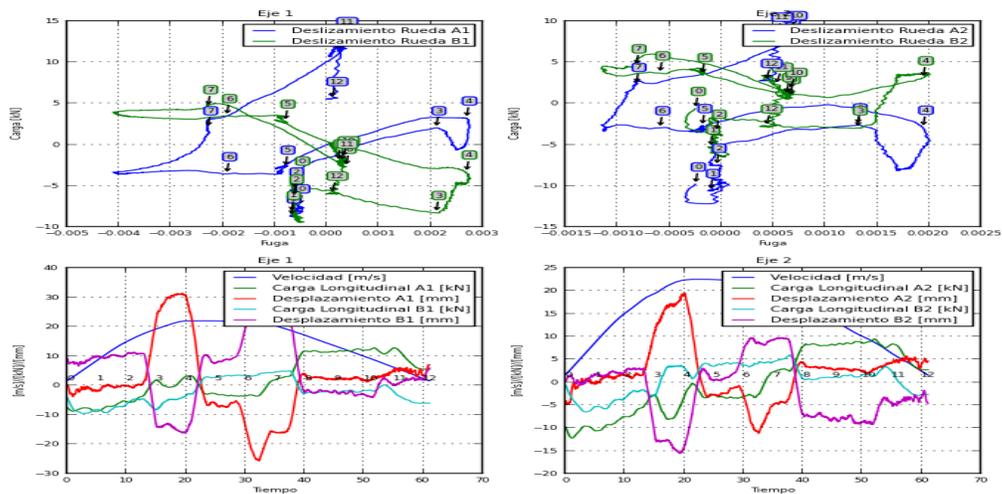
E.24) Tramo “Los Cortijos” a “Los dos caminos”



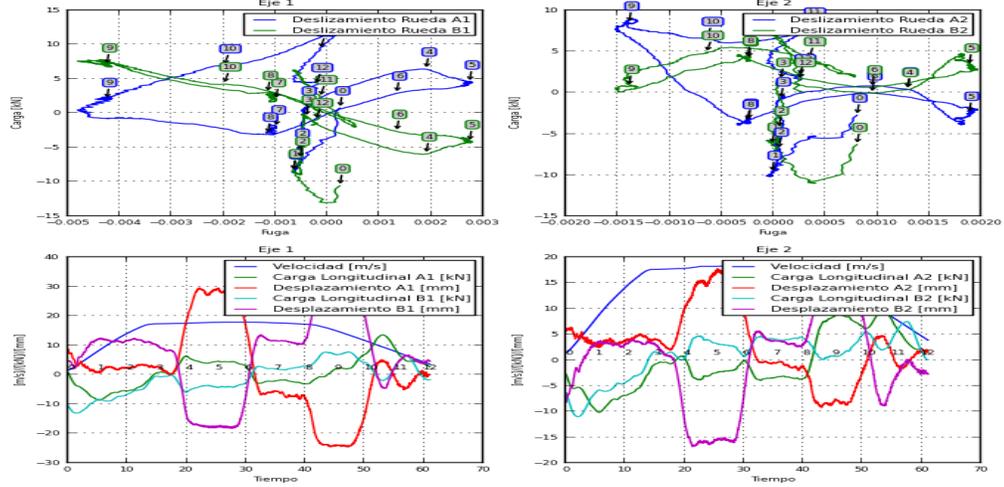
E.25) Tramo “Los Dos caminos” a “Parque del este”



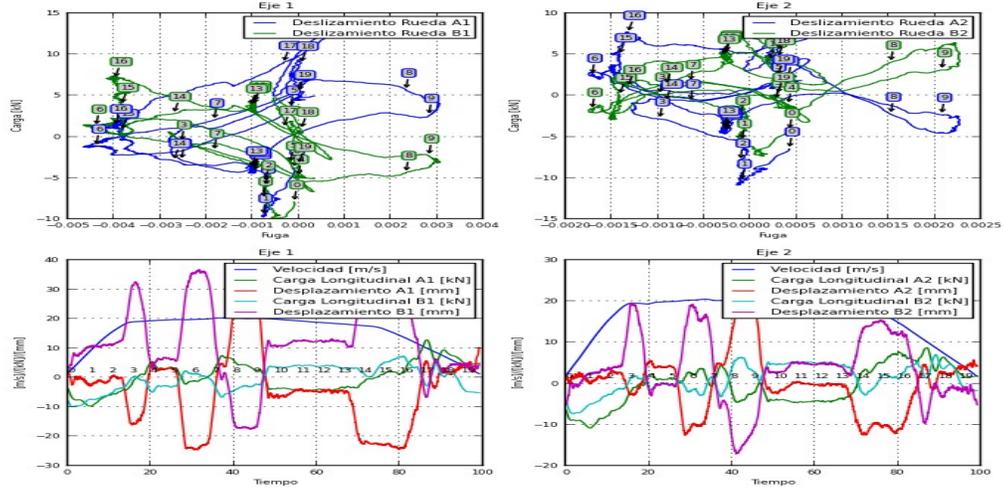
E.26) Tramo “Parque del este” a “Altamira”



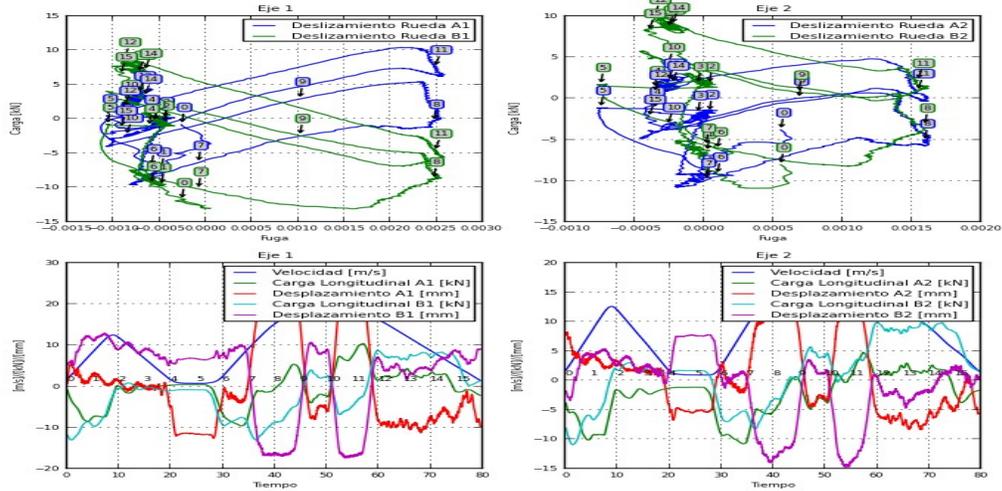
E.27) Tramo “Altamira” a “Chacao”



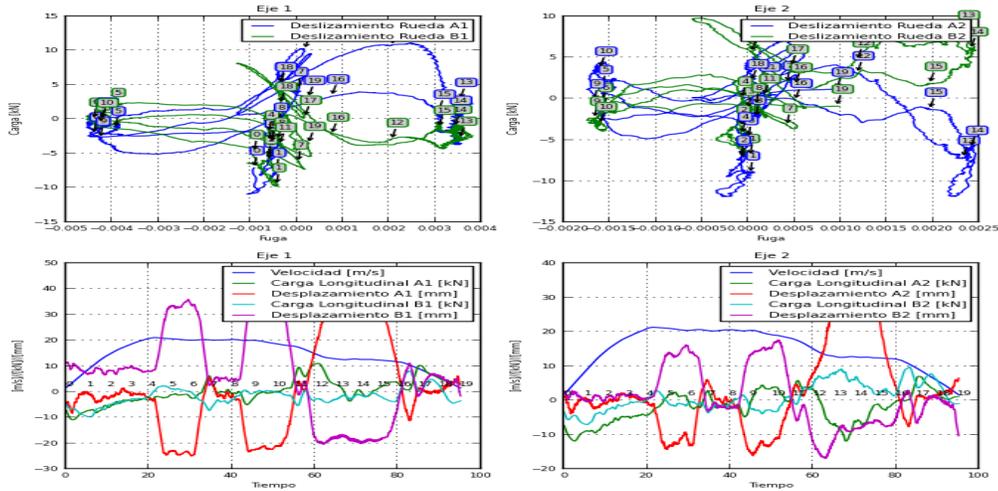
E.28) Tramo “Chacao” a Chacaito”



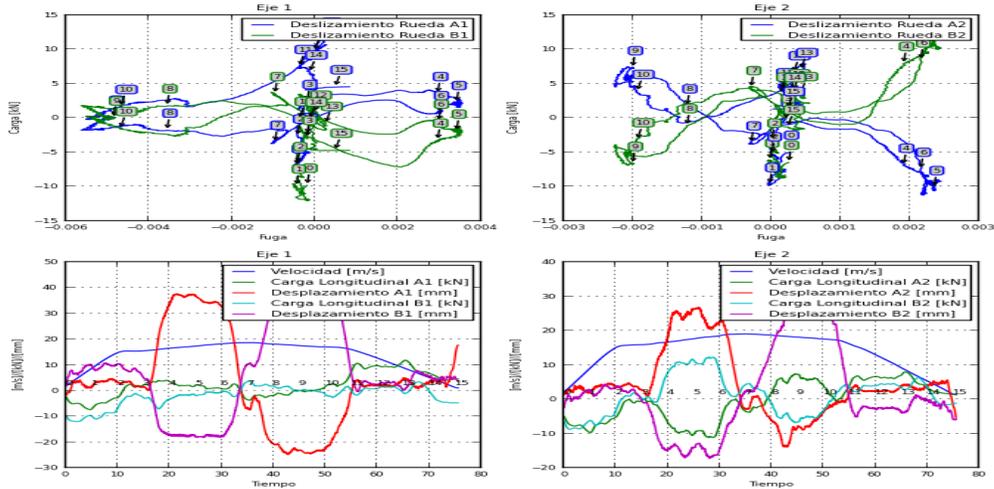
E.29) Tramo “Chacaito” a “Sabana Grande”



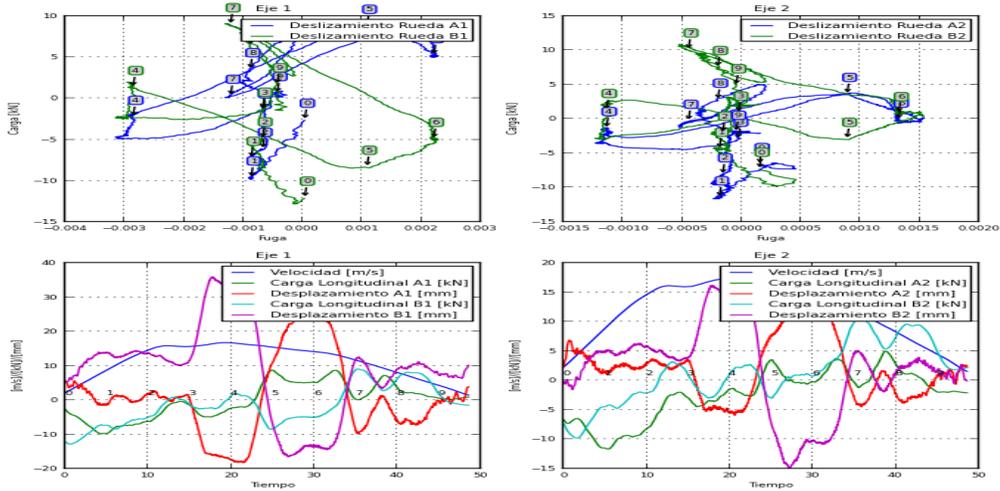
E.30) Tramo “Sabana Grande” a “Plaza Venezuela”



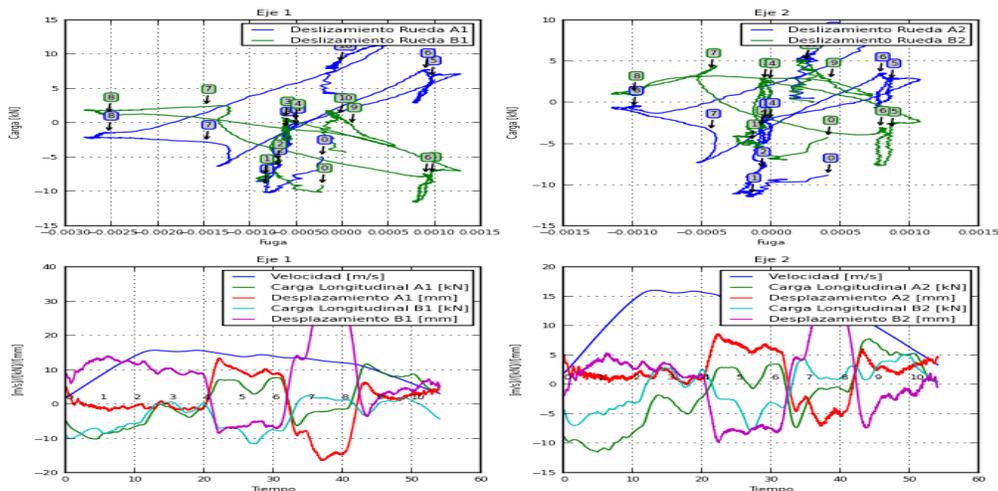
E.31) Tramo “Plaza Venezuela” a “Colegio de Ingenieros”



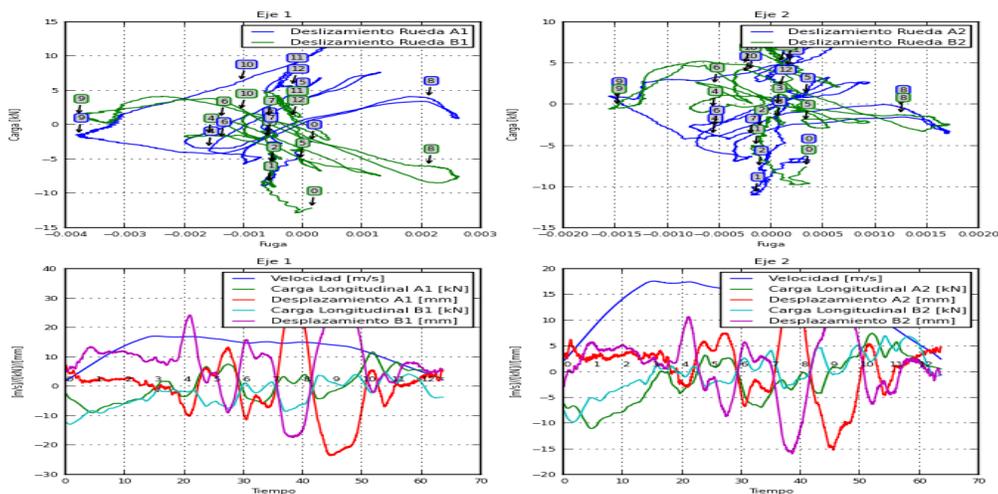
E.32) Tramo “Colegio de Ingenieros” a “Bellas Artes”



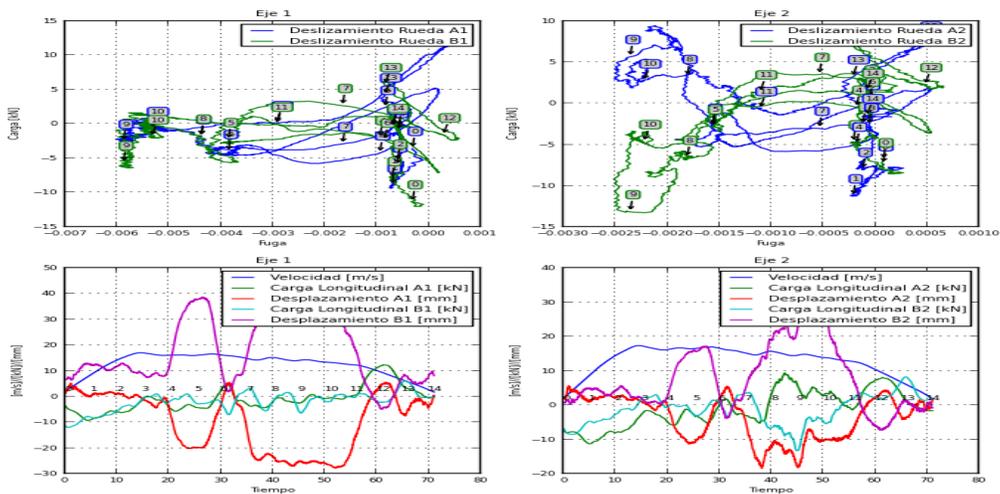
E.33) Tramo “Bellas Artes” a “Parque Carabobo”



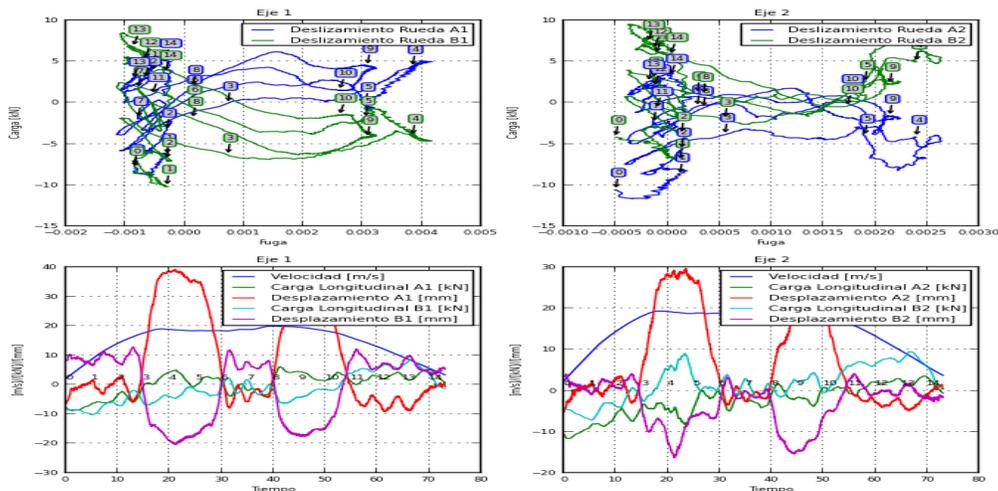
E.34) Tramo “Parque Carabobo” a “Hoyada”



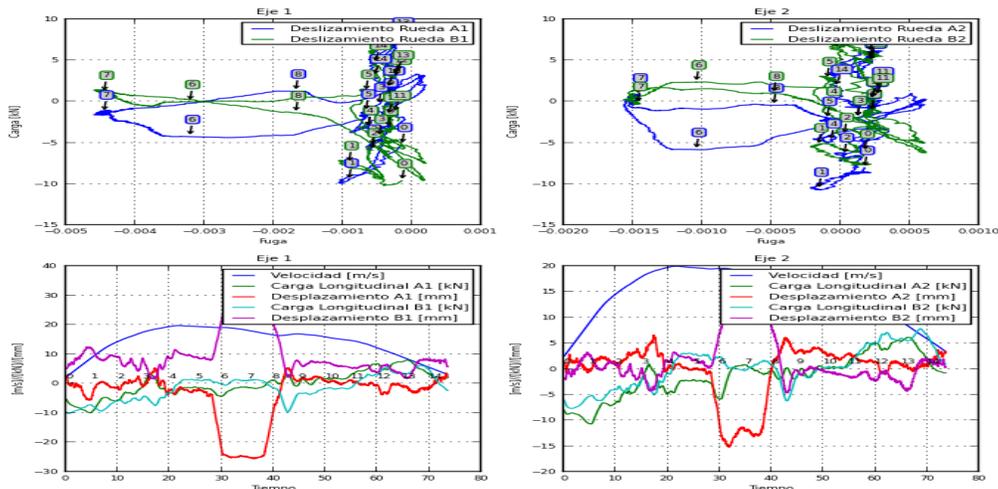
E.35) Tramo “Hoyada” a “Capitolio”



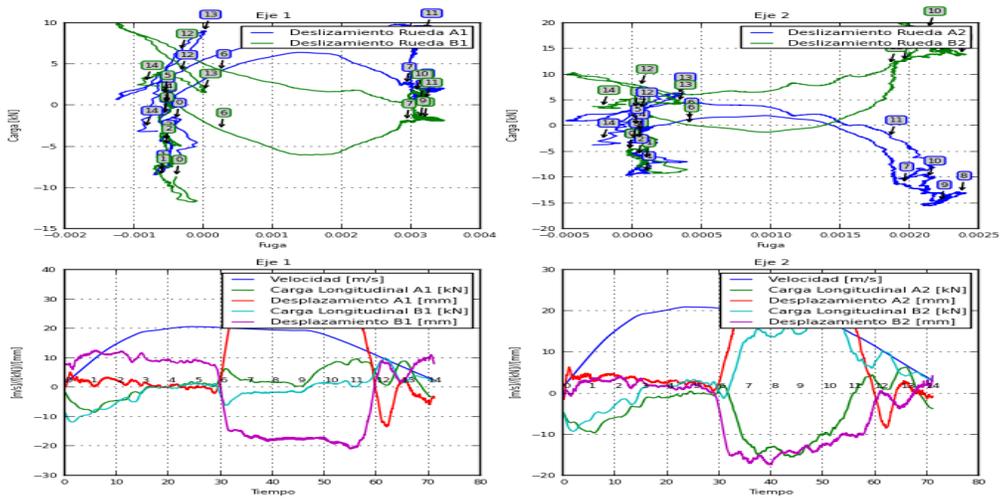
E.36) Tramo “Capitolio” a “Caño Amarillo”



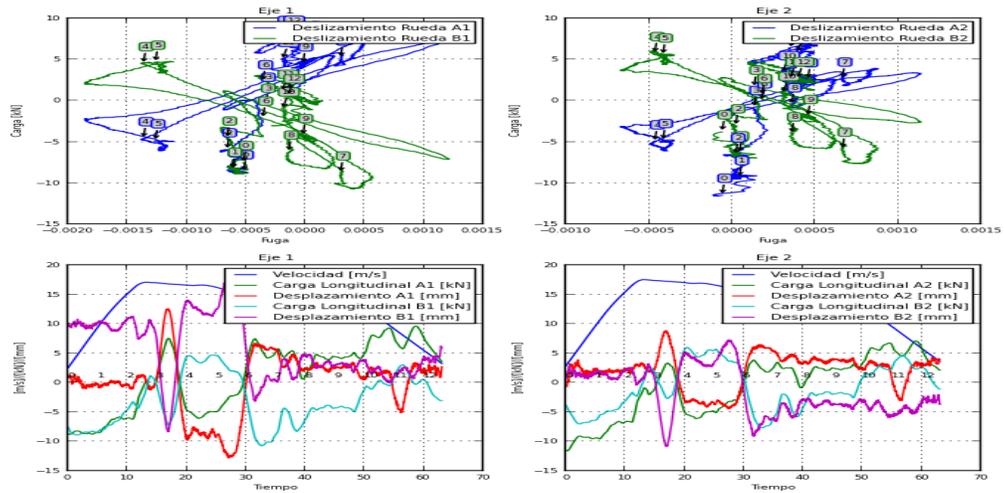
E.37) Tramo “Caño Amarillo” a “Agua Salud”



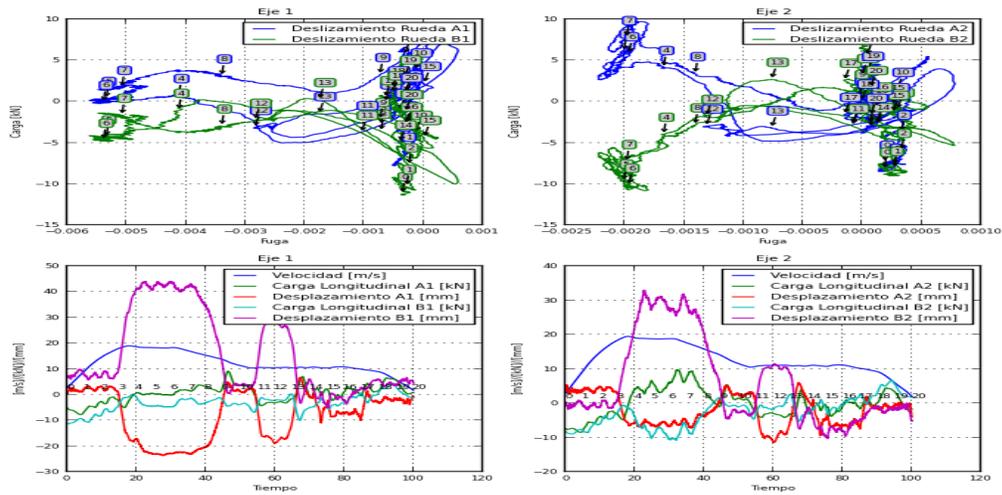
E.38) Tramo “Agua Salud” a “Gato Negro”



E.39) Tramo “Gato Negro” a “Plaza Sucre”

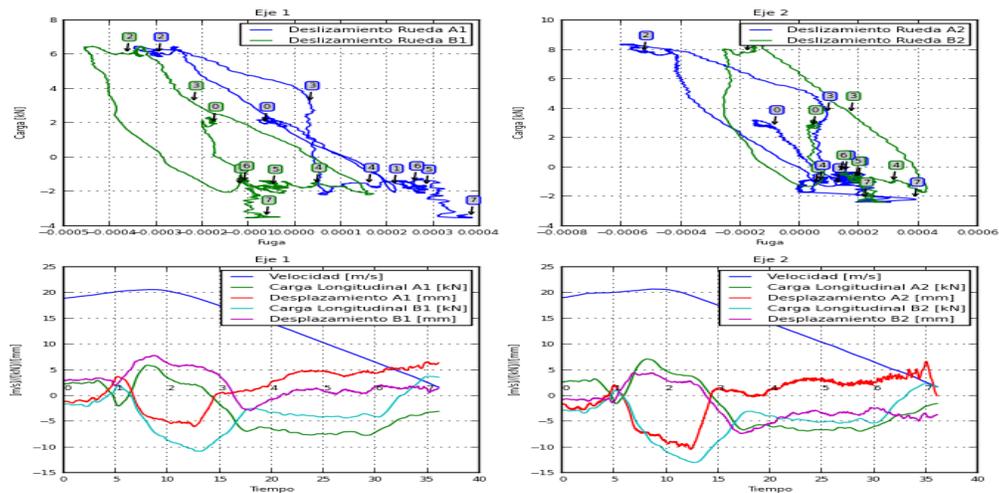


E.40) Tramo “Plaza Sucre” a “Perez Bonalde”

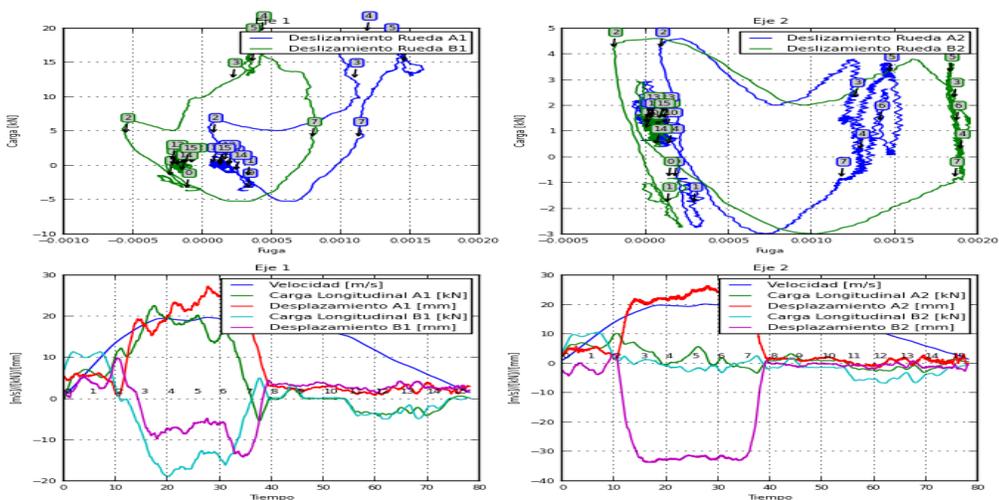


Apéndice F:
Gráficos de las diferencia de carga vs la fuga longitudinal según los resultados obtenidos por la empresa Transportation Technology Center, Inc. en cada tramo de la Línea 1.

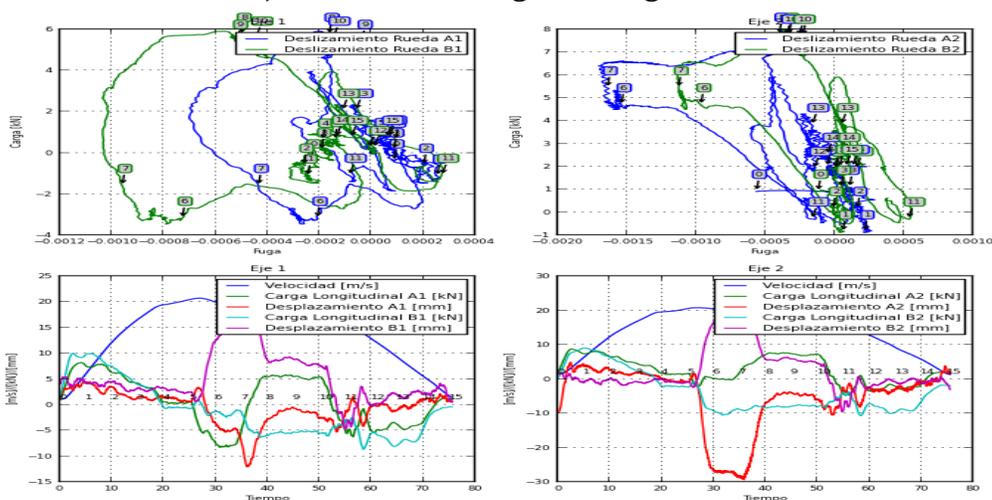
F.1) Tramo “Perez Bonalde” a “Plaza Sucre”



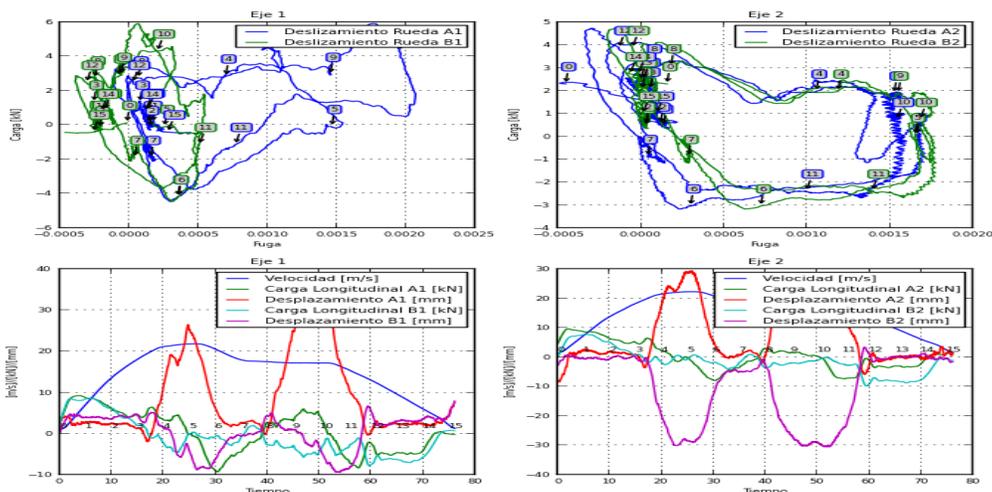
F.2) Tramo “Plaza Sucre” a “Gato Negro”



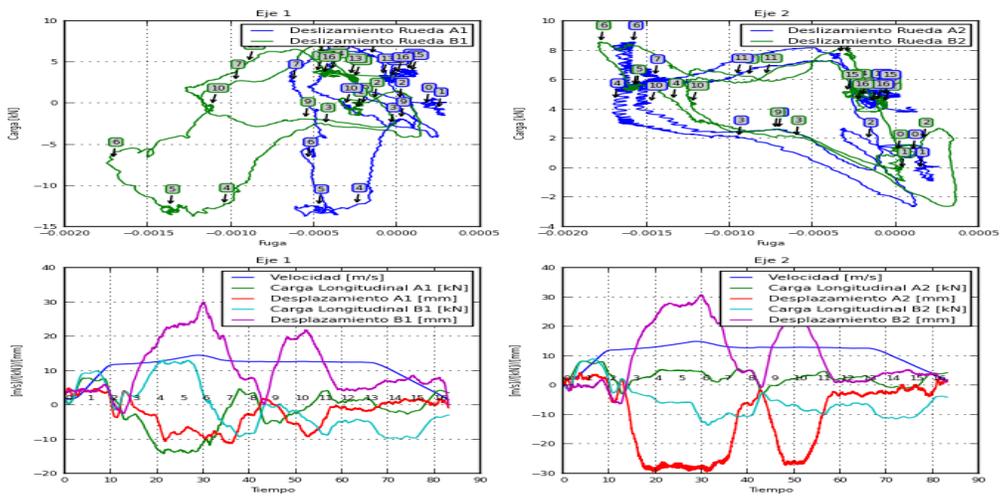
F.3) Tramo “Gato Negro” a “Agua Salud”



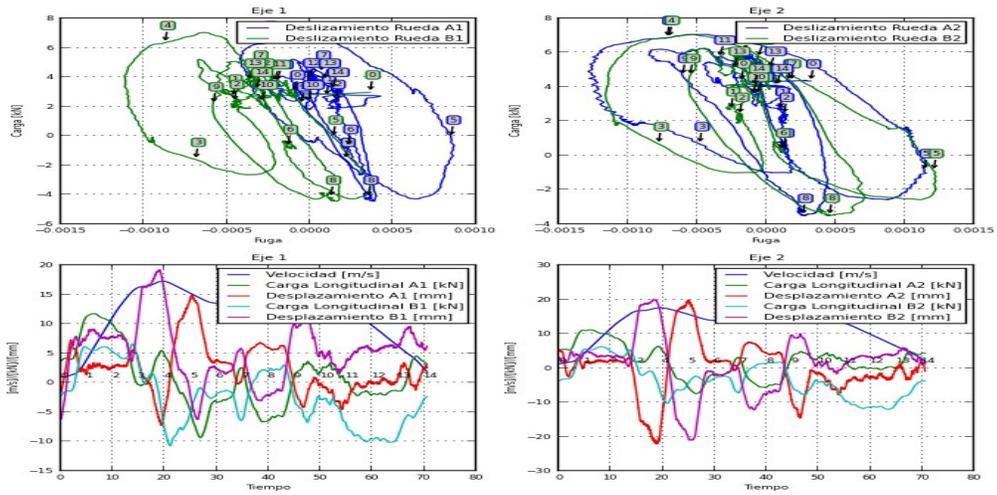
F.4) Tramo “Agua Salud” a “Caño Amarillo”



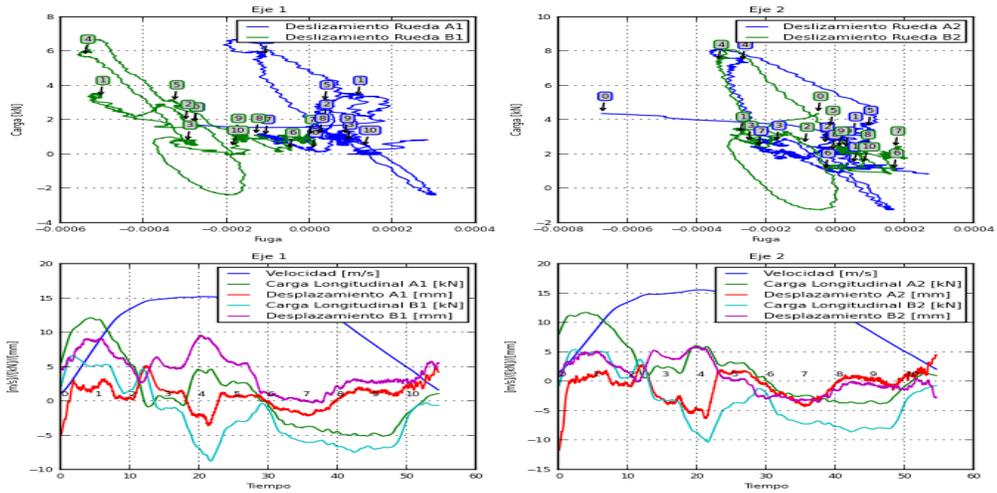
F.5) Tramo “Caño Amarillo” a “Capitolio”



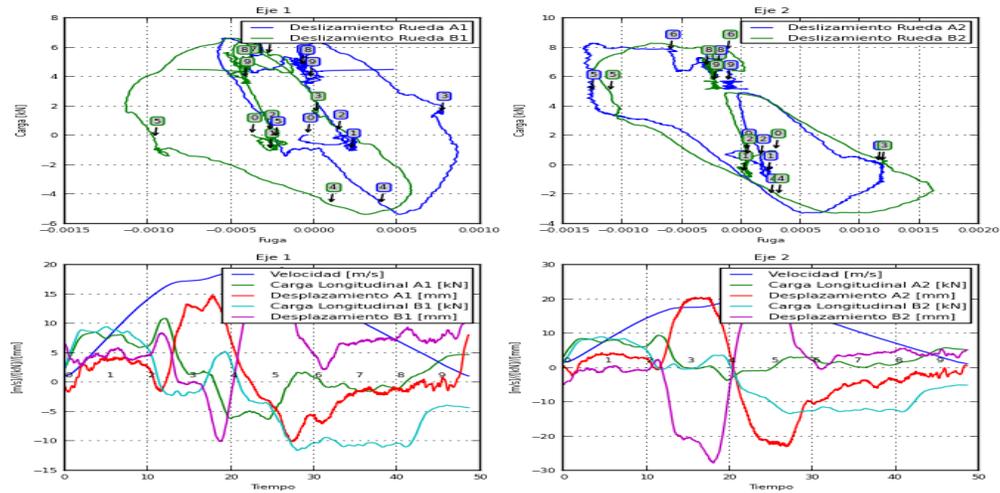
F.6) Tramo “Capitolio” a “Hoyada”



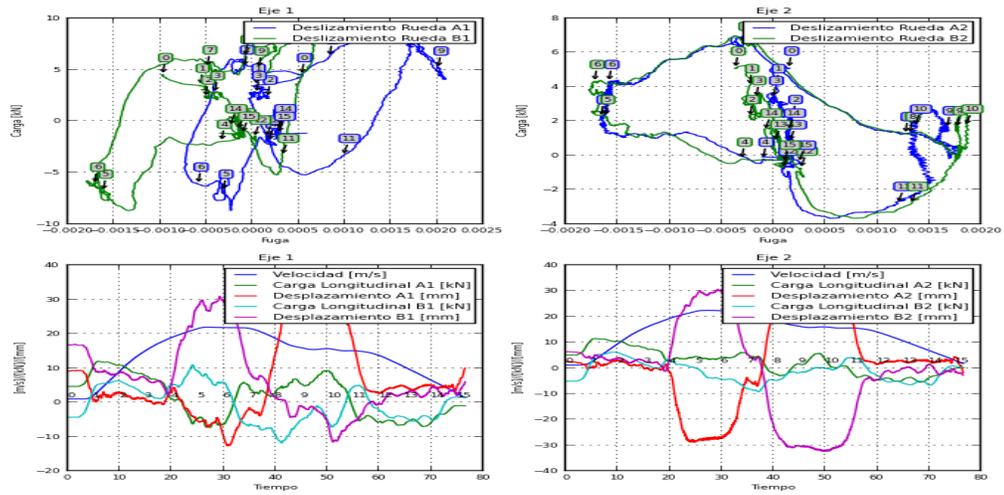
F.7) Tramo “Hoyada” a “Parque Carabobo”



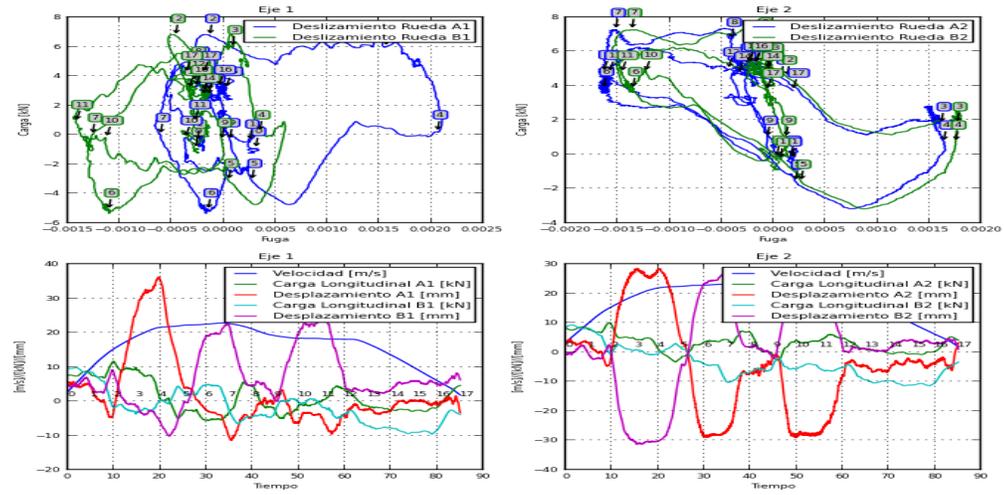
F.8) Tramo “Parque Carabobo” a “Bellas Artes”



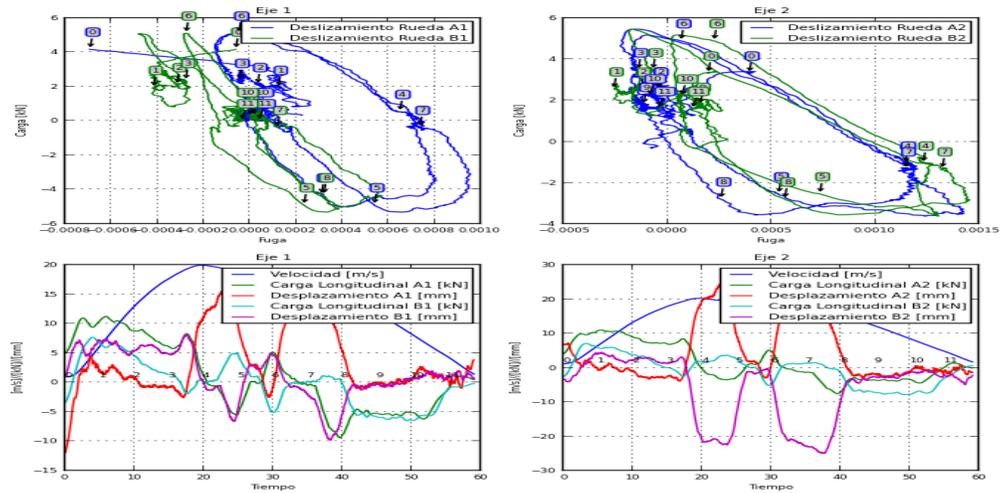
F.9) Tramo “Bellas Artes” a “Colegio de Ingenieros”



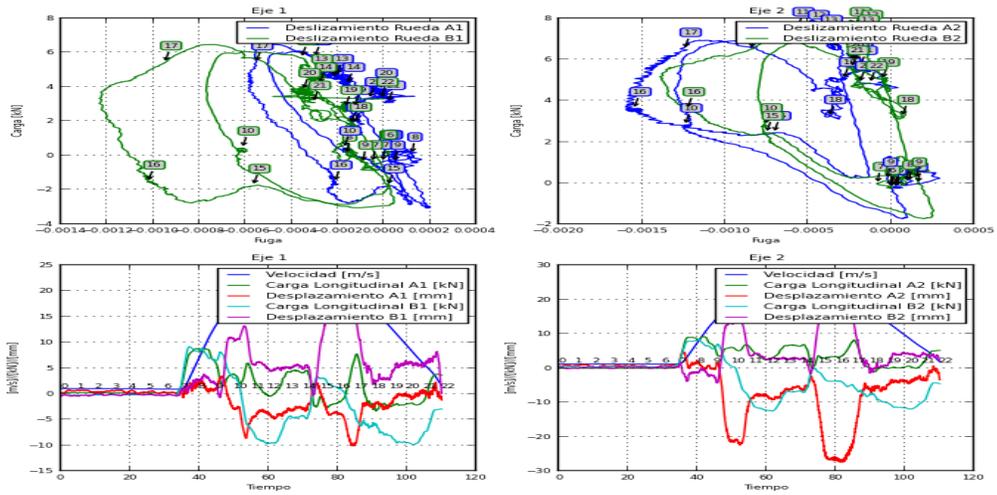
F.10) Tramo “Colegio de Ingenieros” a “Plaza Venezuela”



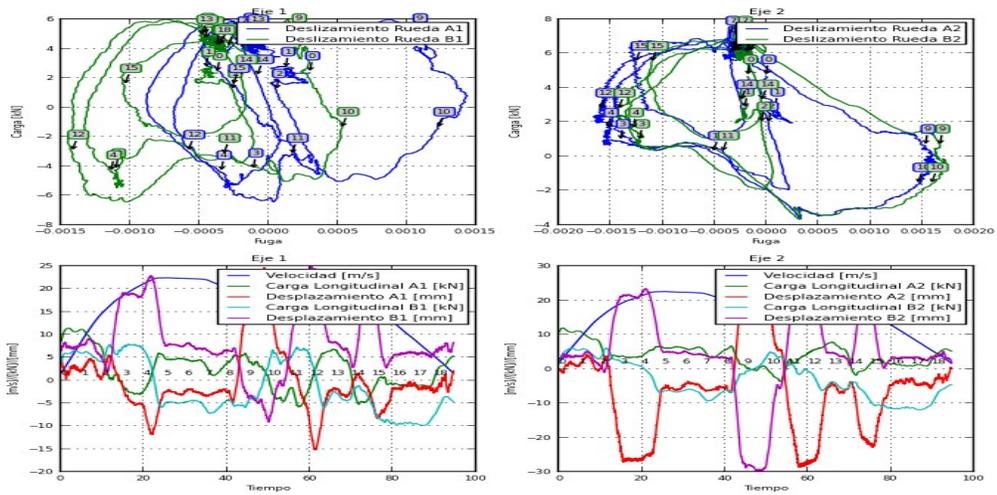
F.11) Tramo “Plaza Venezuela” a “Sabana Grande”



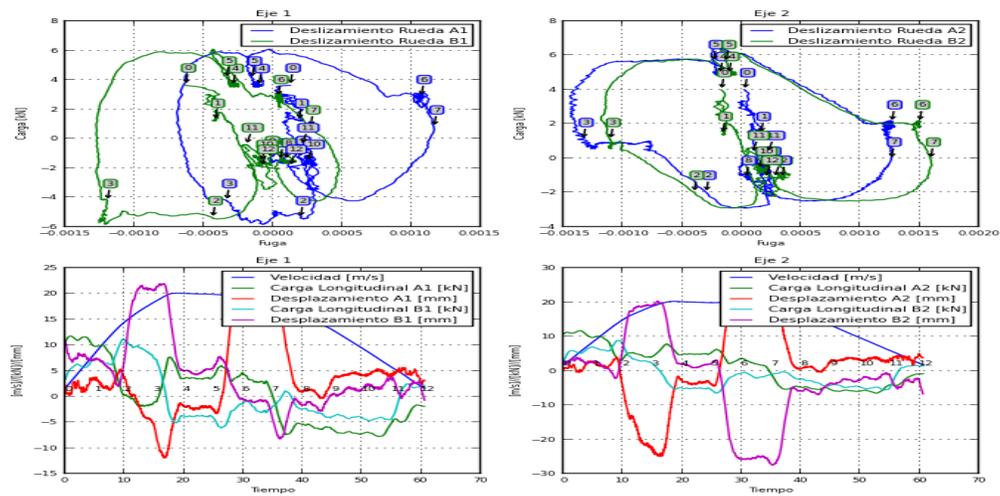
F.12) Tramo “Sabana Grande” a “Chacaito”



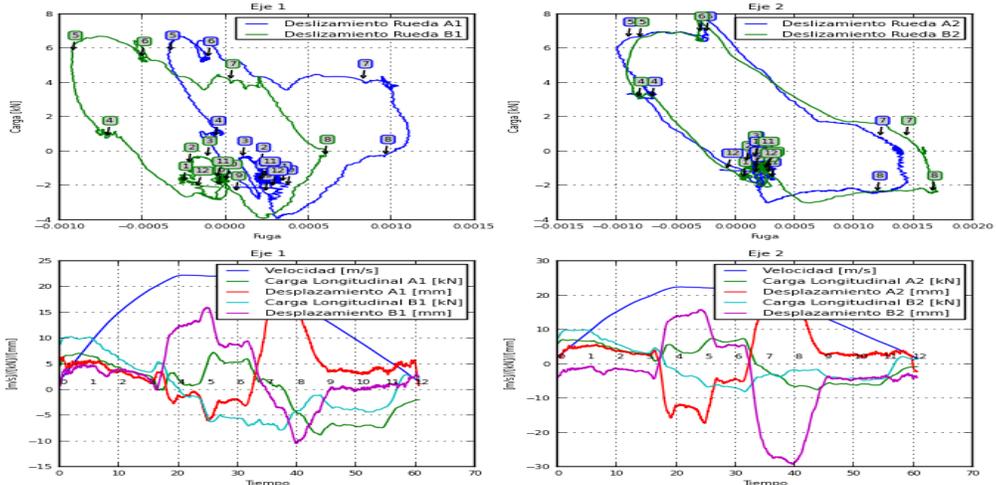
F.13) Tramo “Chacaito” a “Chacao”



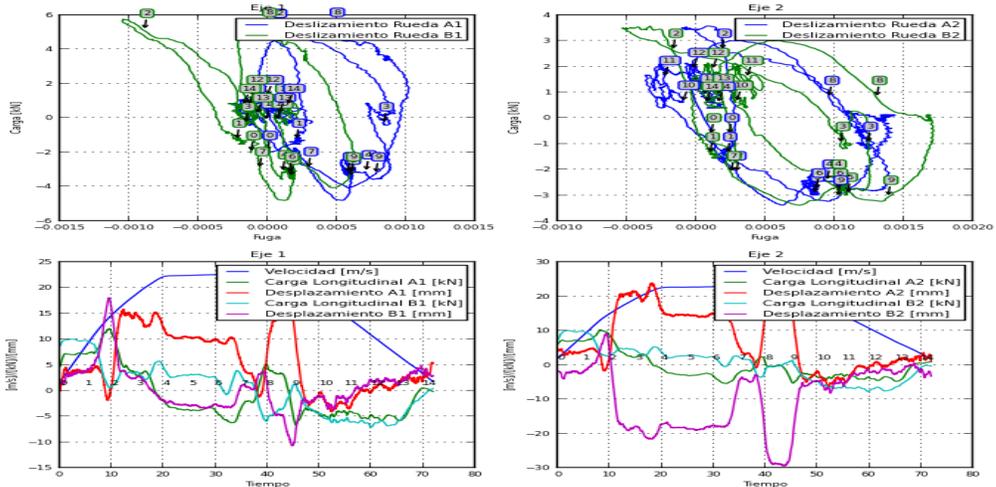
F.14) Tramo “Chacao” a “Altamira”



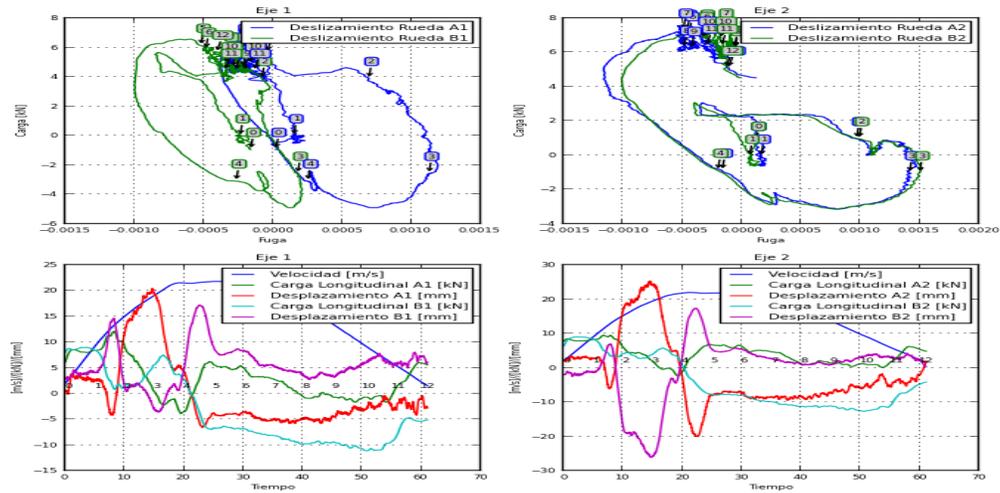
F.15) Tramo "Altamira" a "Parque del este" ("Miranda")



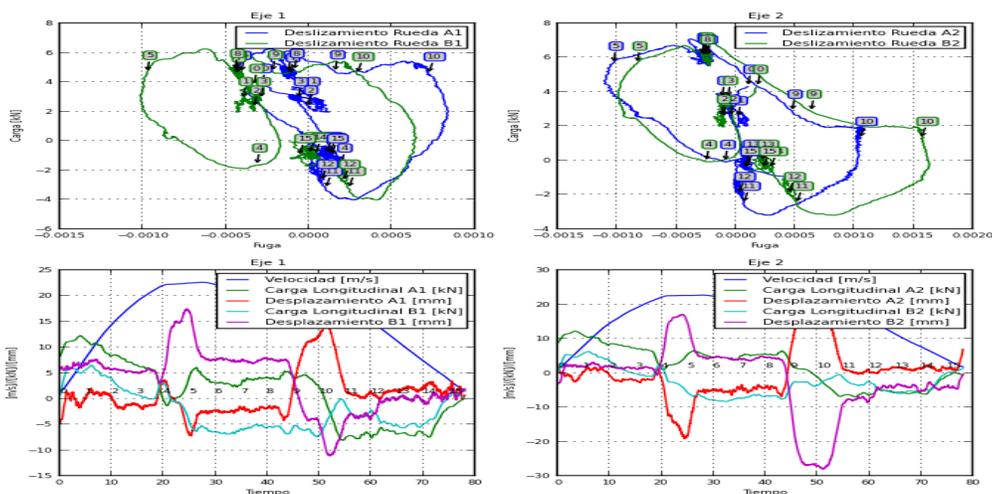
F.16) Tramo "Parque del este" a "Los dos caminos"



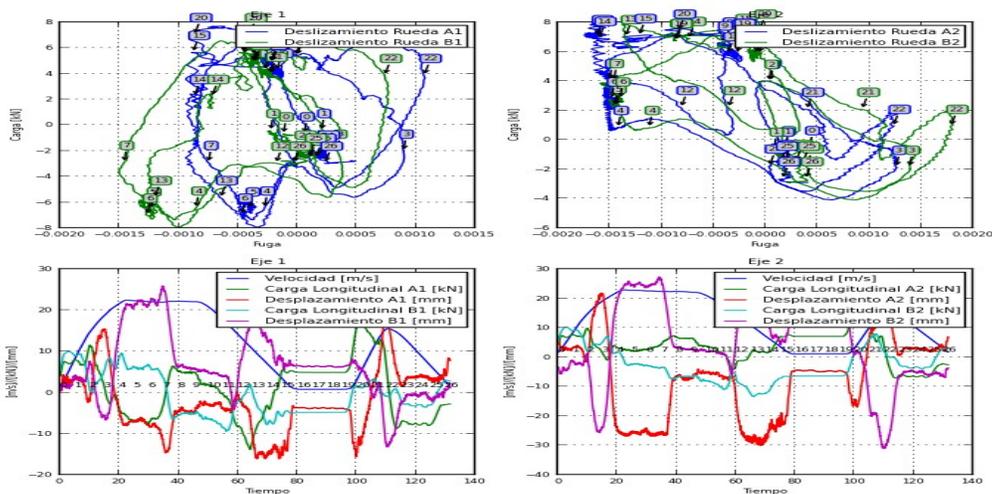
F.17) Tramo "Los dos caminos" a "Los Cortijos"



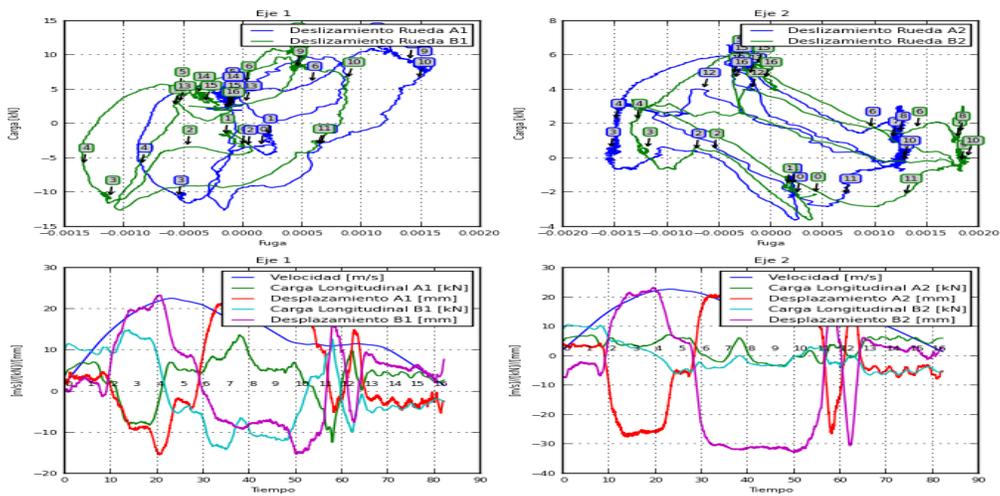
F.18) Tramo “Los Cortijos” a “La California”



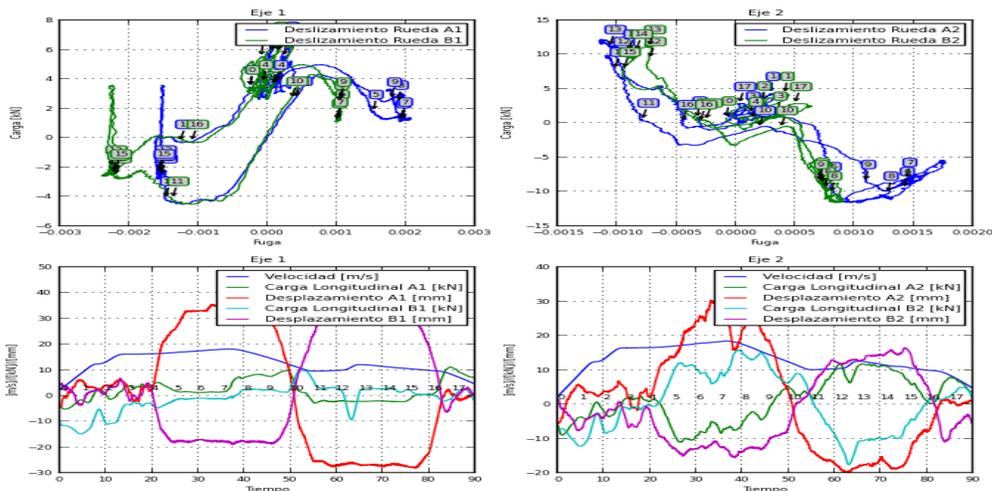
F.19) Tramo “La California” a “Petare”



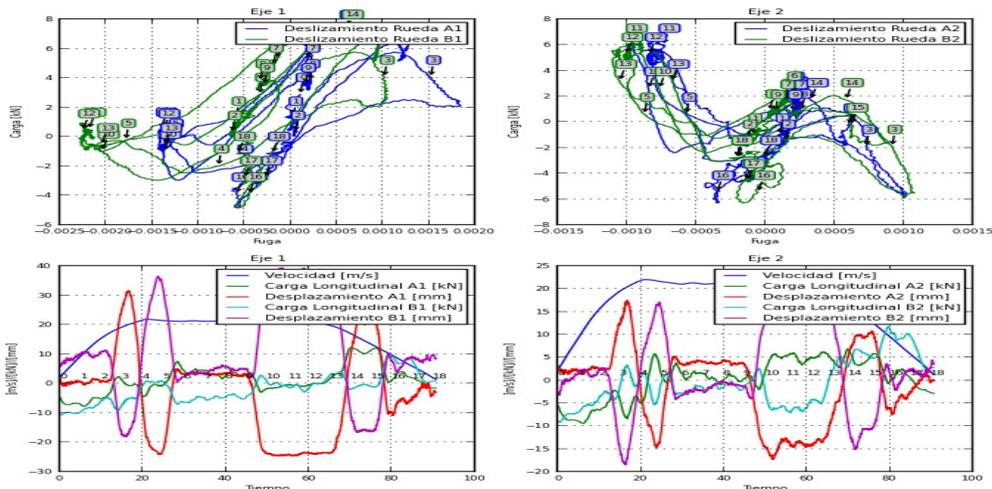
F.20) Tramo “Petare” a “Palo Verde”



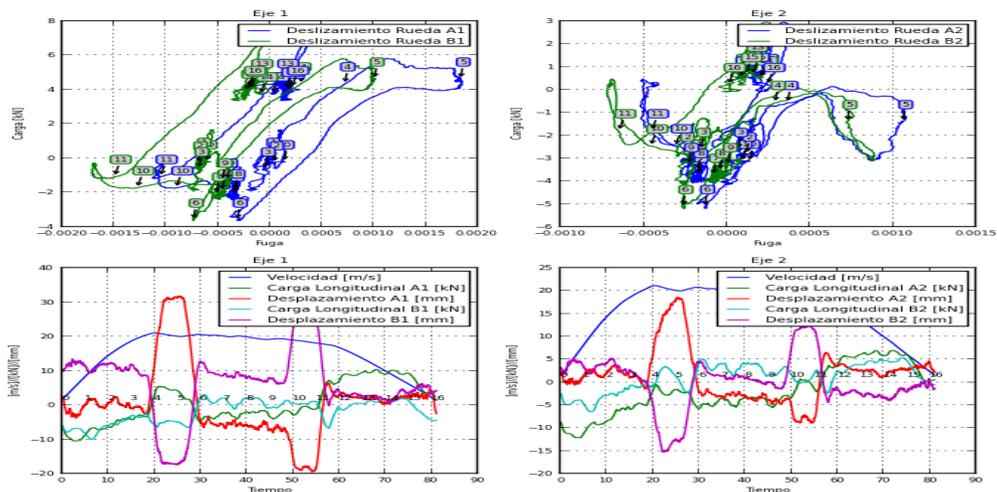
F.21) Tramo “Palo Verde” a “Petare”



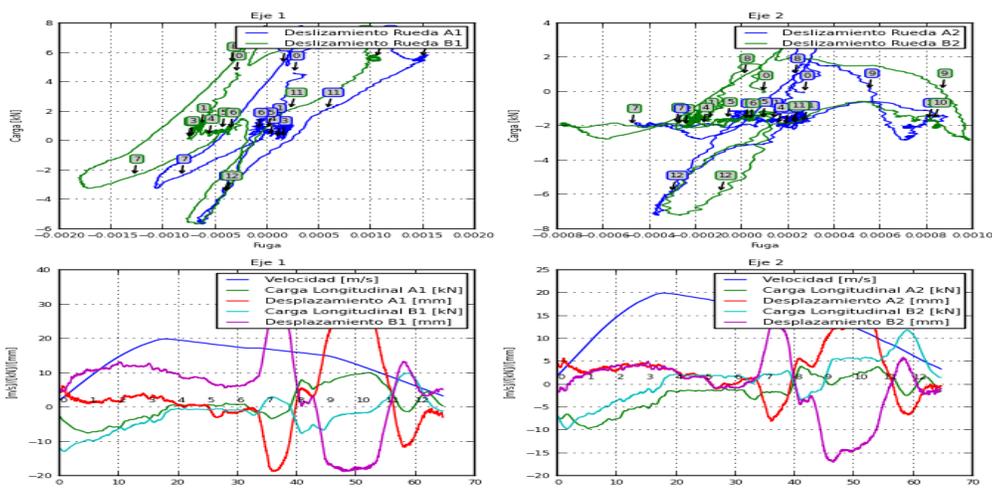
F.22) Tramo “Petare” a “La California”



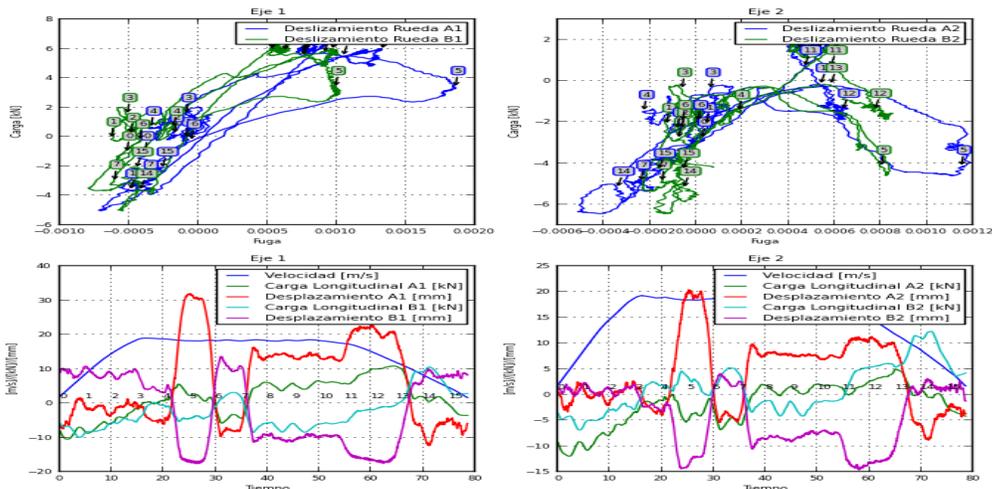
F.23) Tramo “La California” a “Los Cortijos”



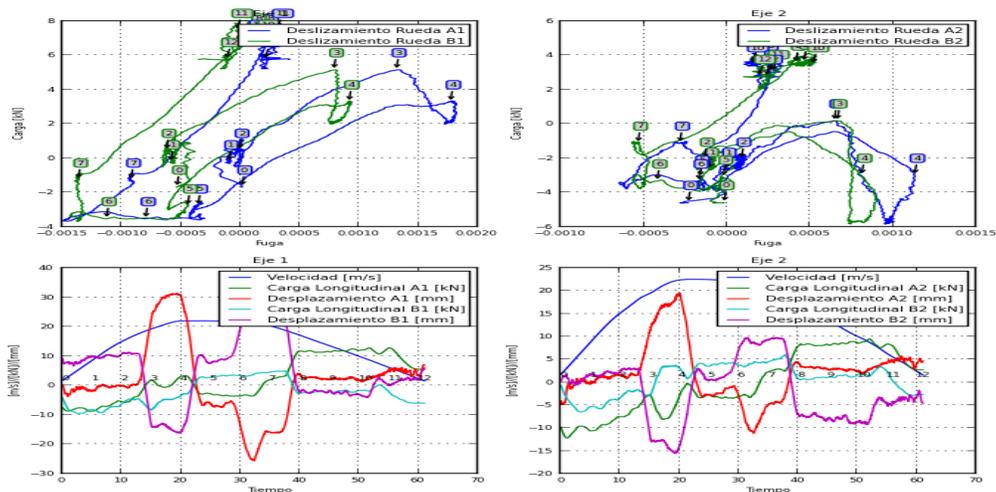
F.24) Tramo “Los Cortijos” a “Los dos caminos”



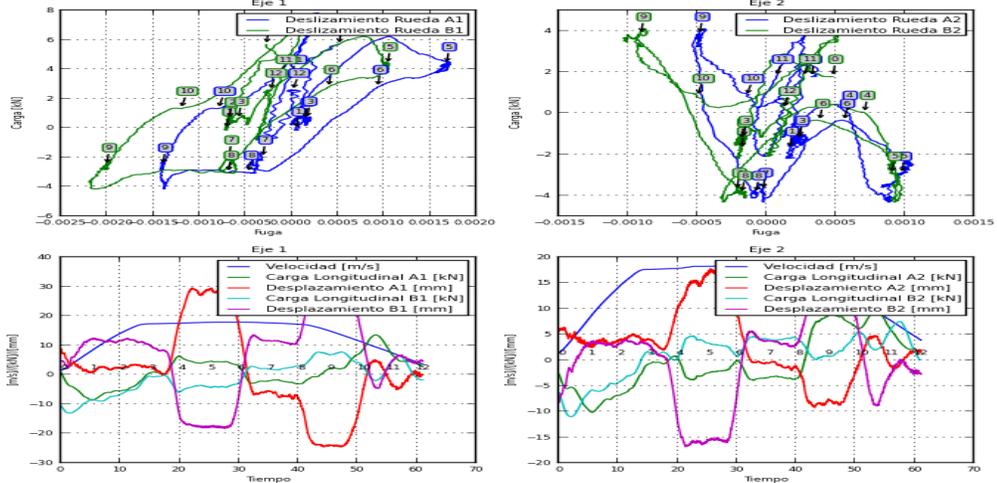
F.25) Tramo “Los Dos caminos” a “Parque del este”



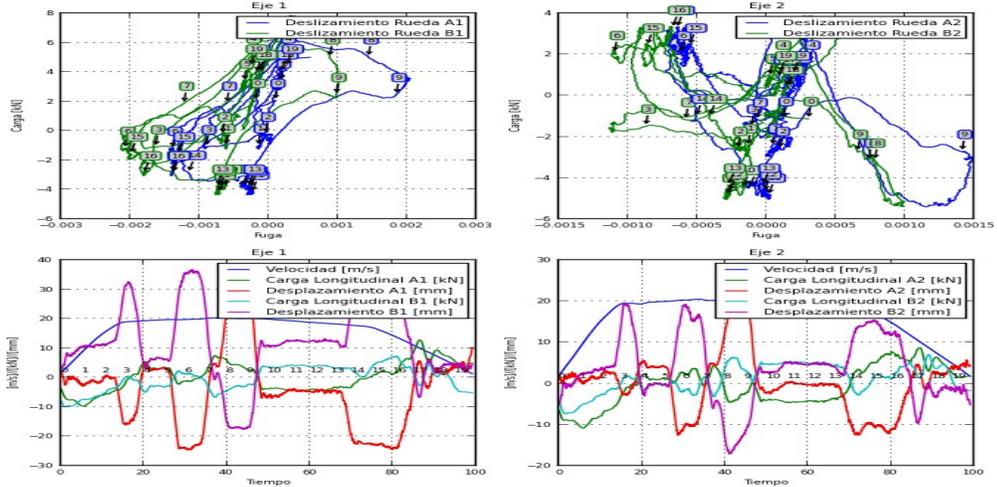
F.26) Tramo “Parque del este” a “Altamira”



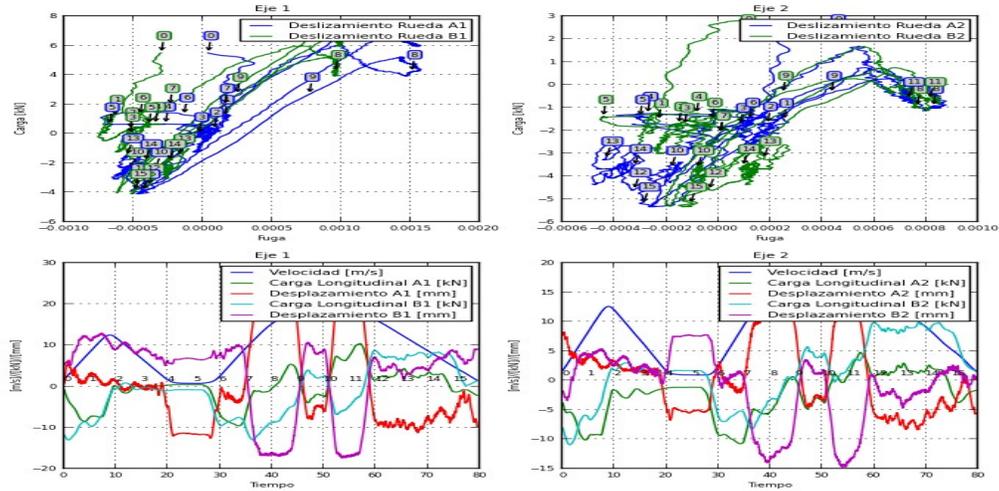
F.27) Tramo "Altamira" a "Chacao"



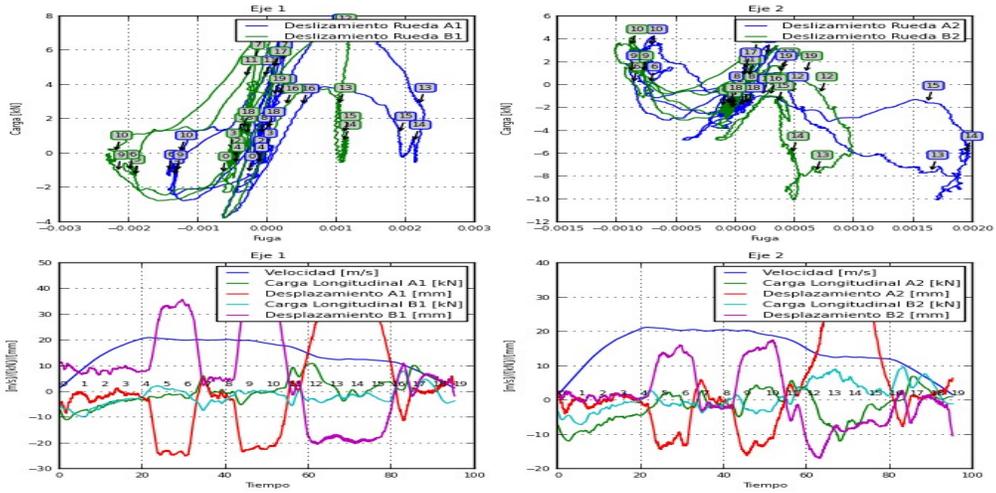
F.28) Tramo "Chacao" a Chacaito"



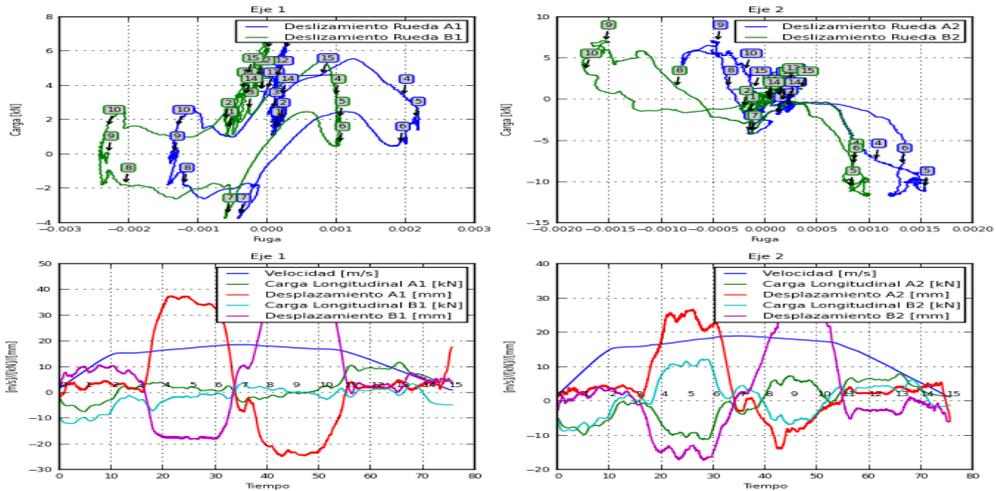
F.29) Tramo "Chacaito" a "Sabana Grande"



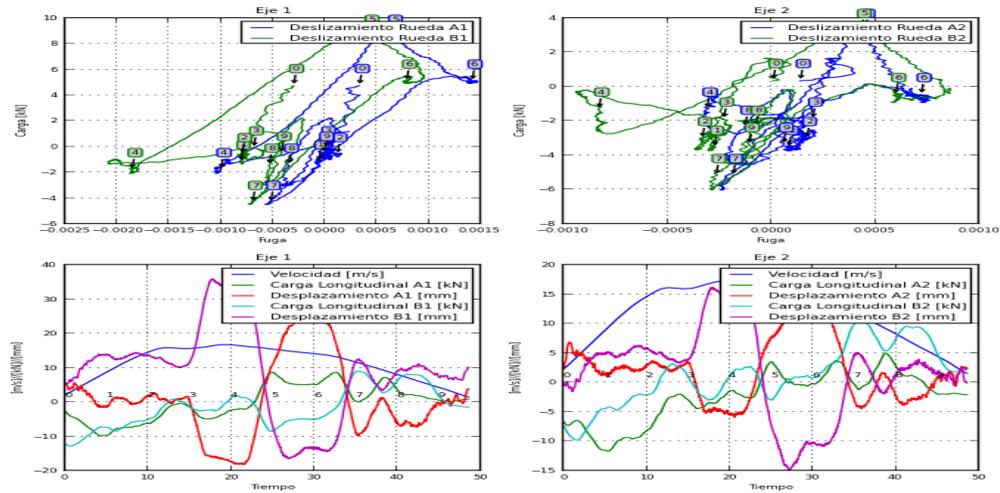
F.30) Tramo “Sabana Grande” a “Plaza Venezuela”



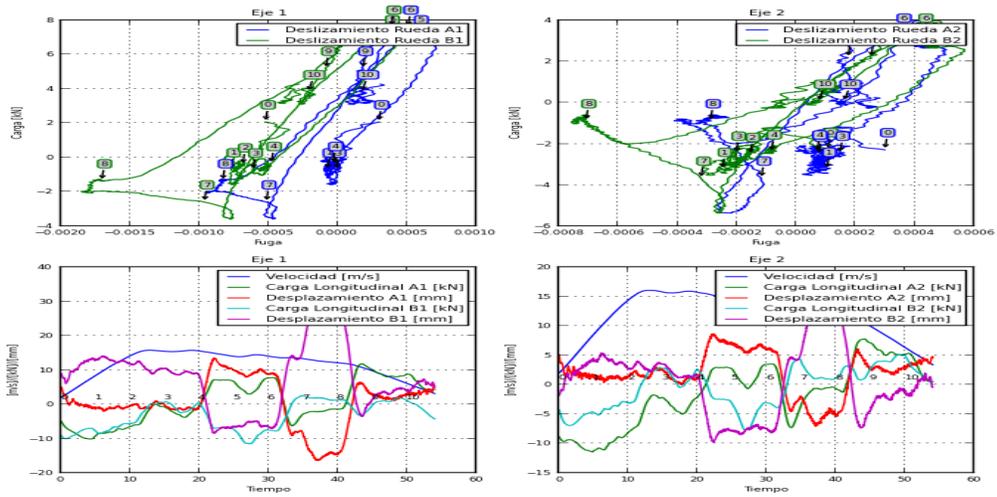
F.31) Tramo “Plaza Venezuela” a “Colegio de Ingenieros”



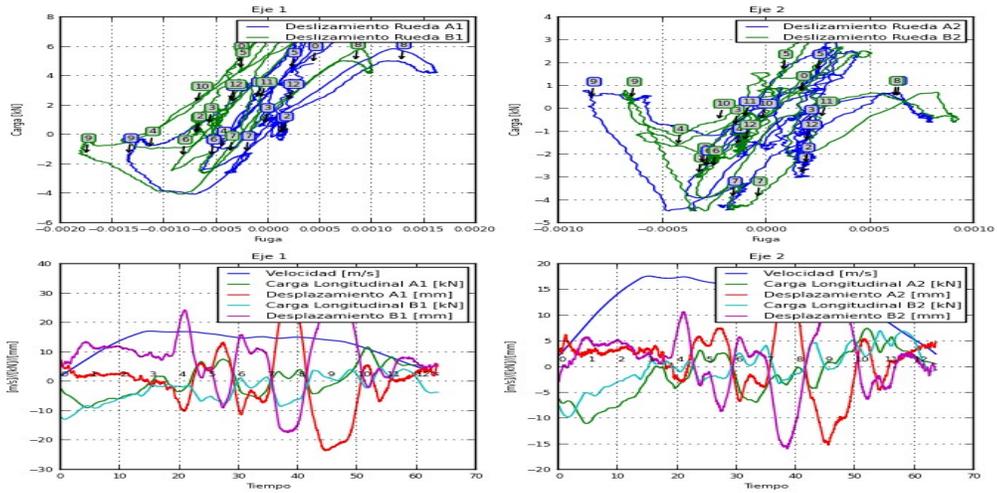
F.32) Tramo “Colegio de Ingenieros” a “Bellas Artes”



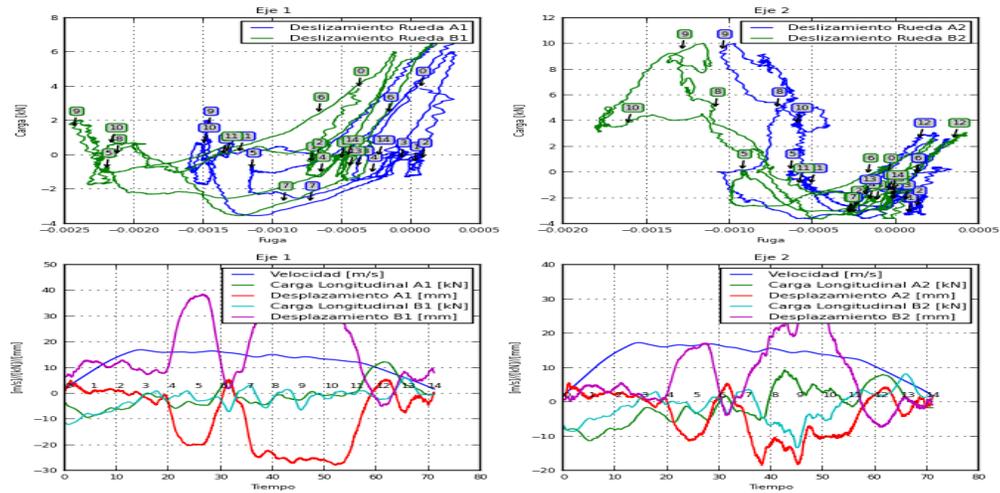
F.33) Tramo “Bellas Artes” a “Parque Carabobo”



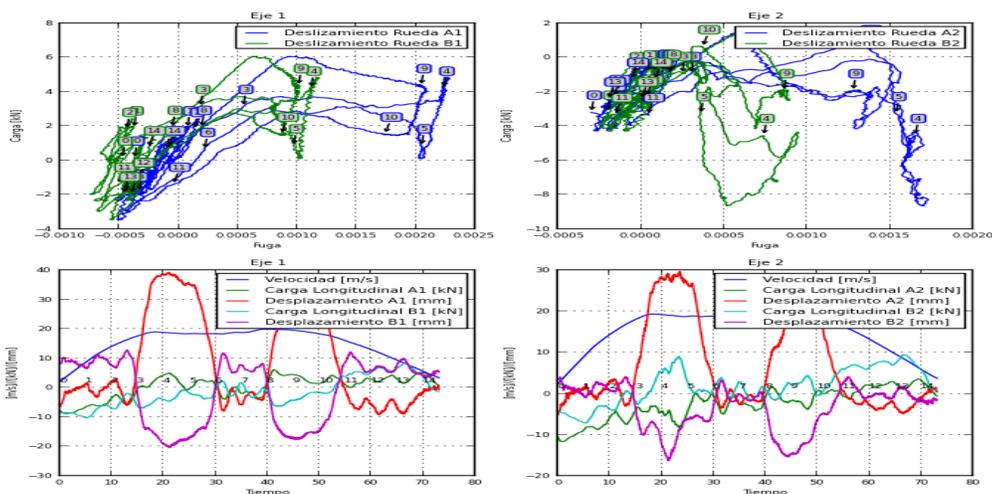
F.34) Tramo “Parque Carabobo” a “Hoyada”



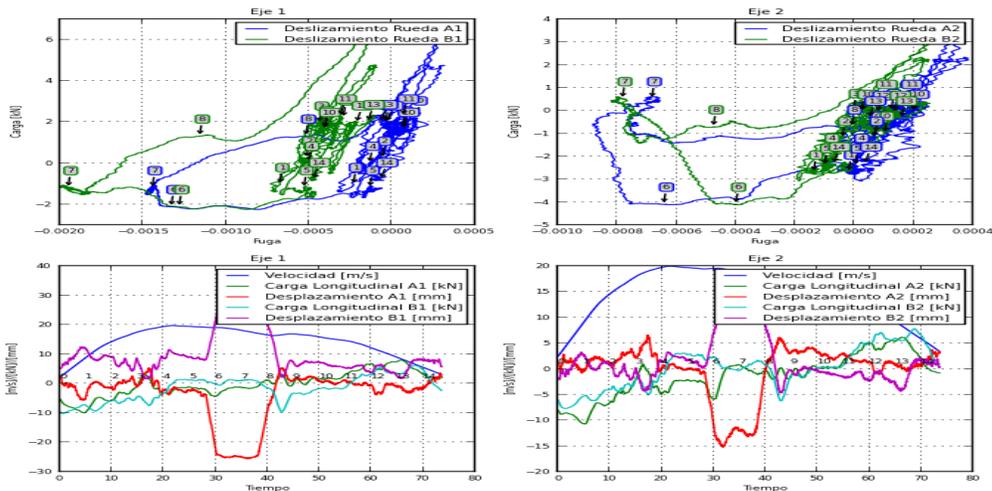
F.35) Tramo “Hoyada” a “Capitolio”



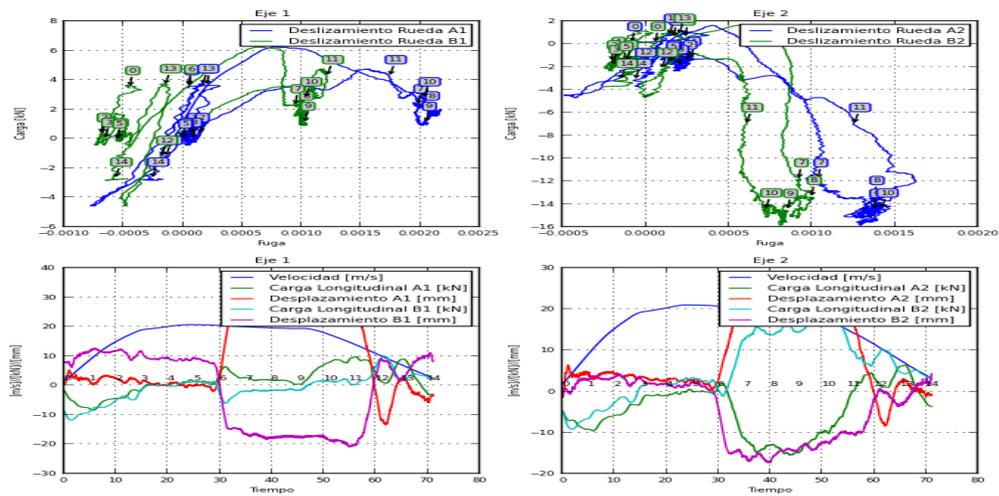
F.36) Tramo “Capitolio” a “Caño Amarillo”



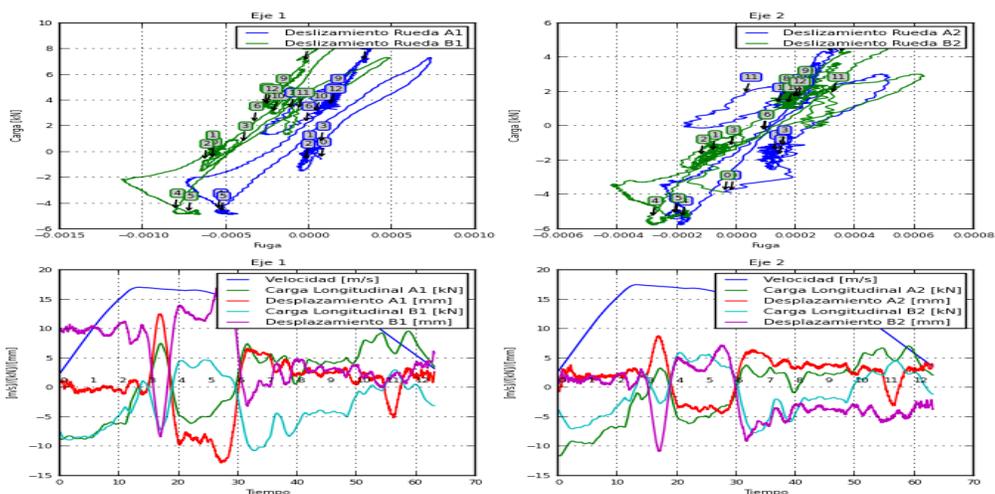
F.37) Tramo “Caño Amarillo” a “Agua Salud”



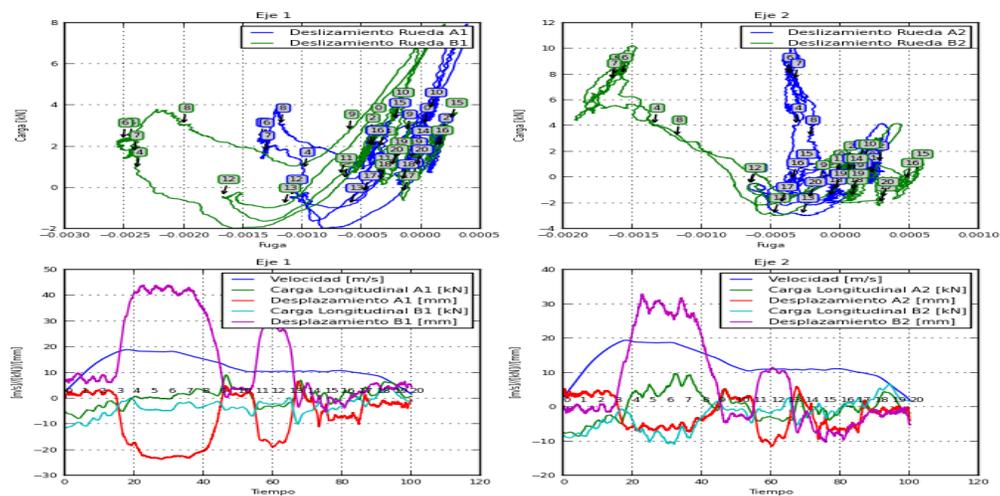
F.38) Tramo “Agua Salud” a “Gato Negro”



F.39) Tramo “Gato Negro” a “Plaza Sucre”

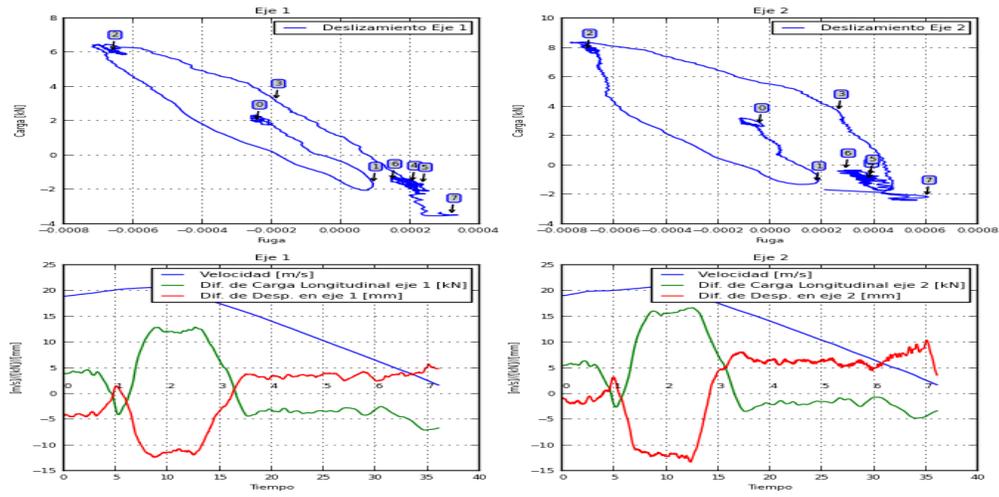


F.40) Tramo “Plaza Sucre” a “Perez Bonalde”

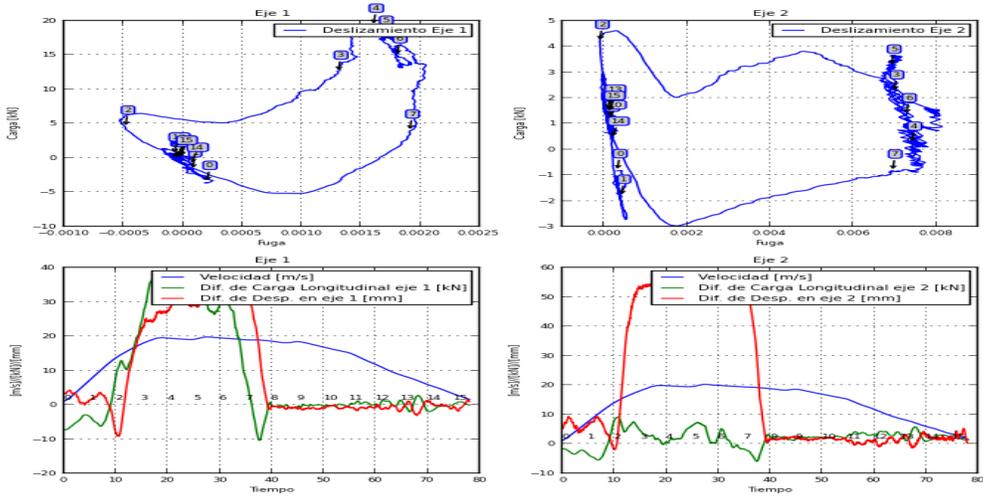


Apéndice G:
Gráficos de la diferencia de cargas en el eje vs las fugas longitudinales considerando un radio común de contacto resultados obtenidos por la empresa Transportation Technology Center, Inc. en cada tramo de la Línea 1.

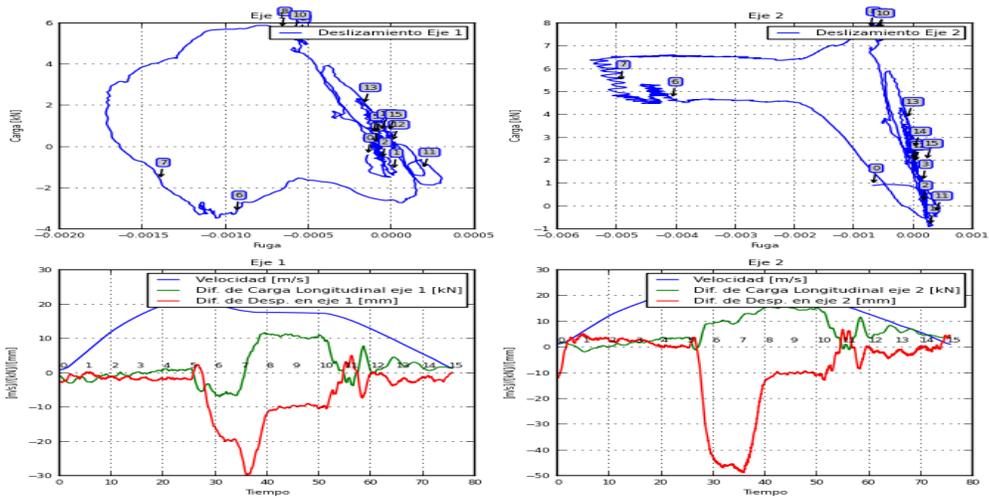
G.1) Tramo “Perez Bonalde” a “Plaza Sucre”



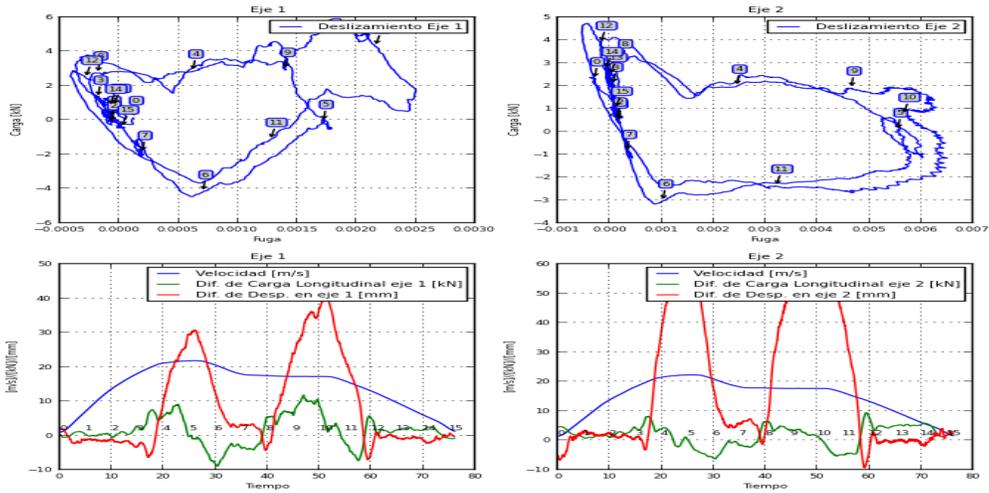
G.2) Tramo “Plaza Sucre” a “Gato Negro”



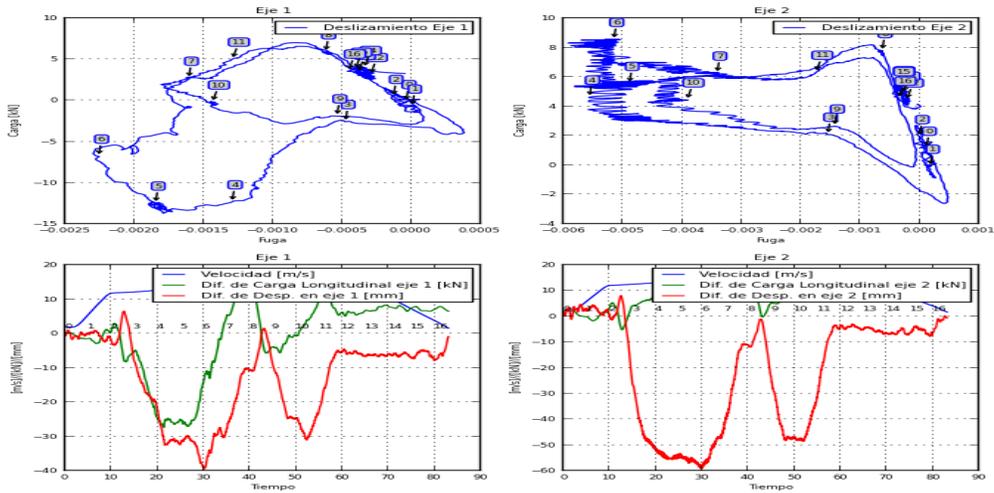
G.3) Tramo “Gato Negro” a “Agua Salud”



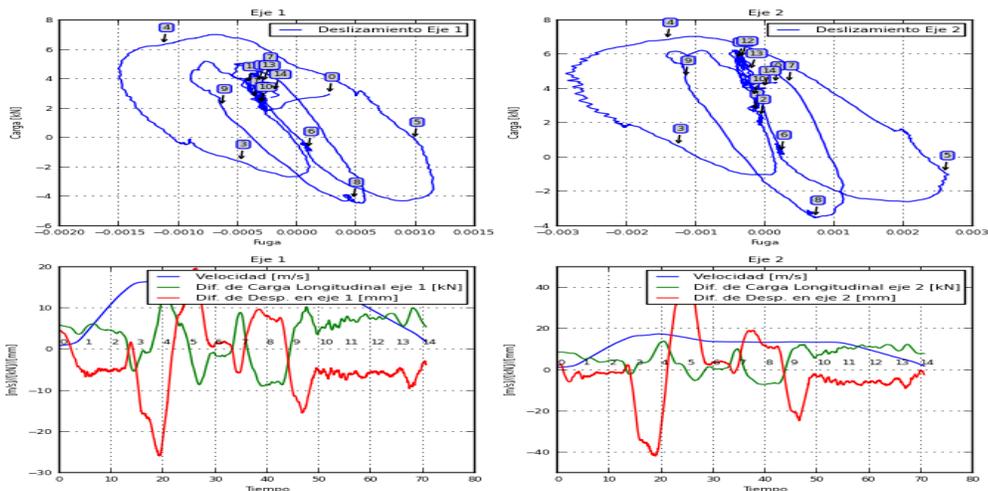
G.4) Tramo “Agua Salud” a “Caño Amarillo”



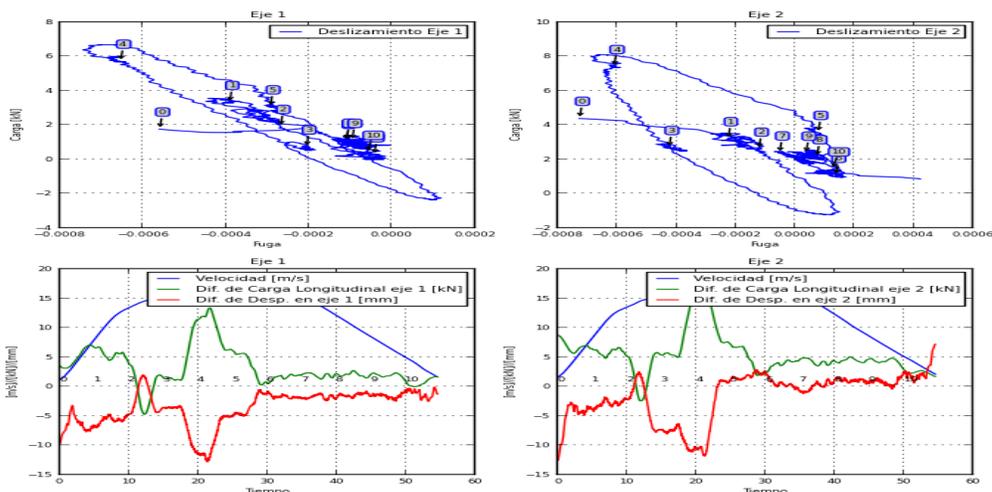
G.5) Tramo “Caño Amarillo” a “Capitolio”



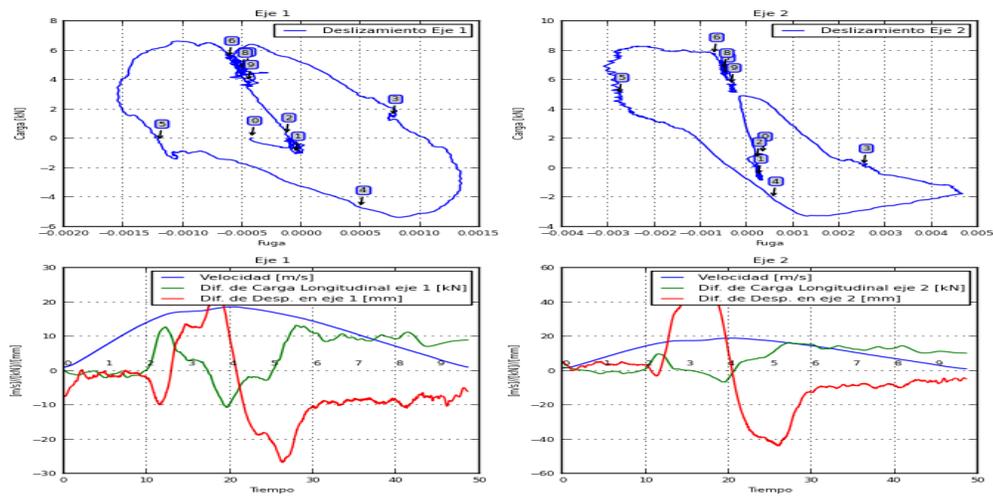
G.6) Tramo “Capitolio” a “Hoyada”



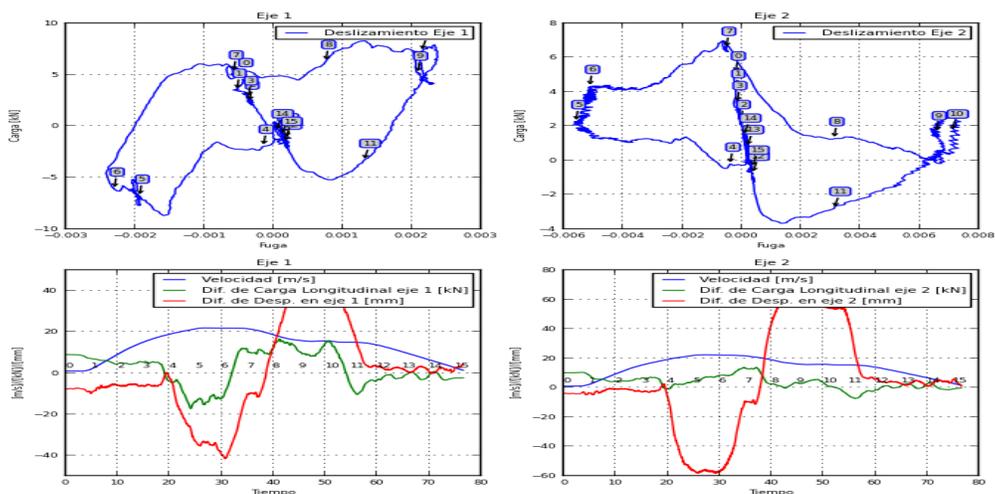
G.7) Tramo “Hoyada” a “Parque Carabobo”



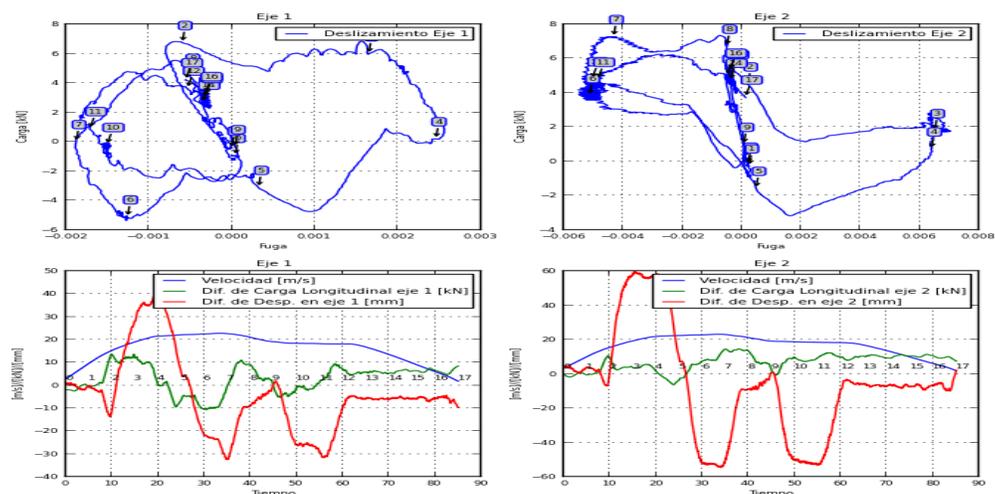
G.8) Tramo “Parque Carabobo” a “Bellas Artes”



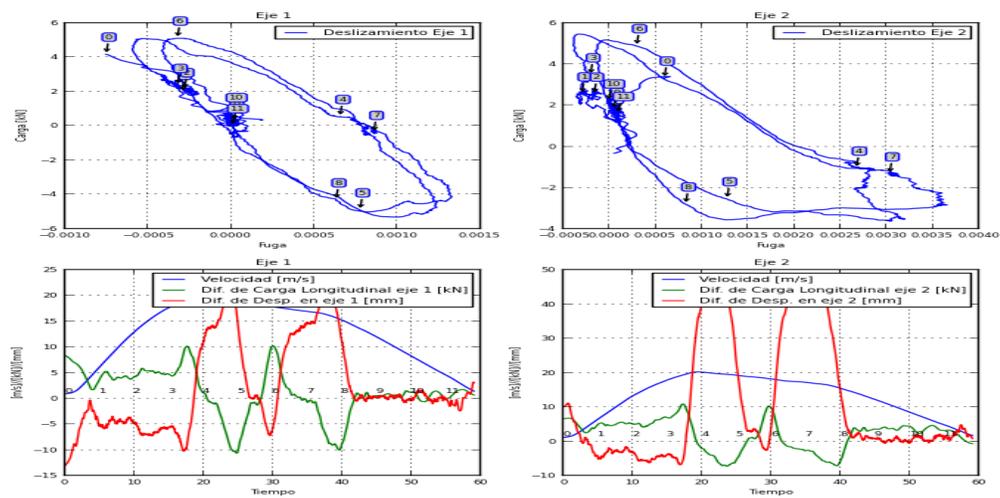
G.9) Tramo “Bellas Artes” a “Colegio de Ingenieros”



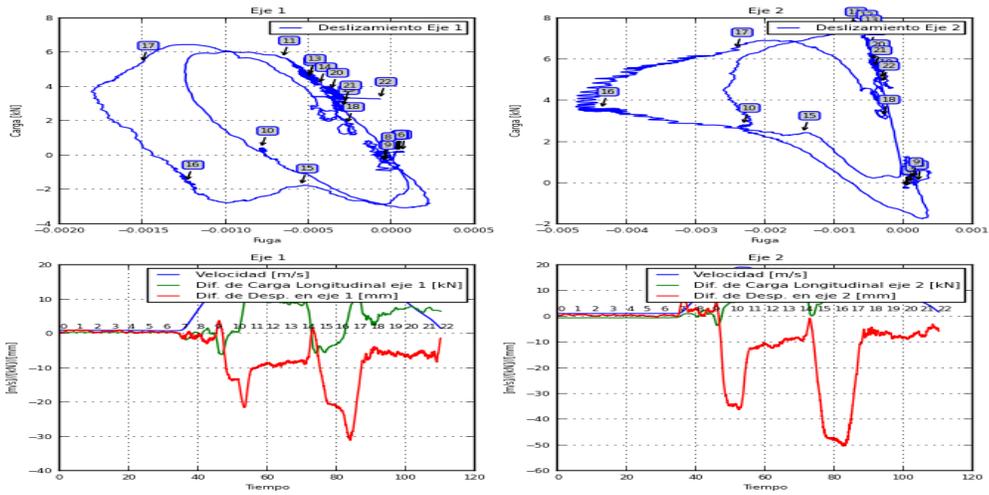
G.10) Tramo “Colegio de Ingenieros” a “Plaza Venezuela”



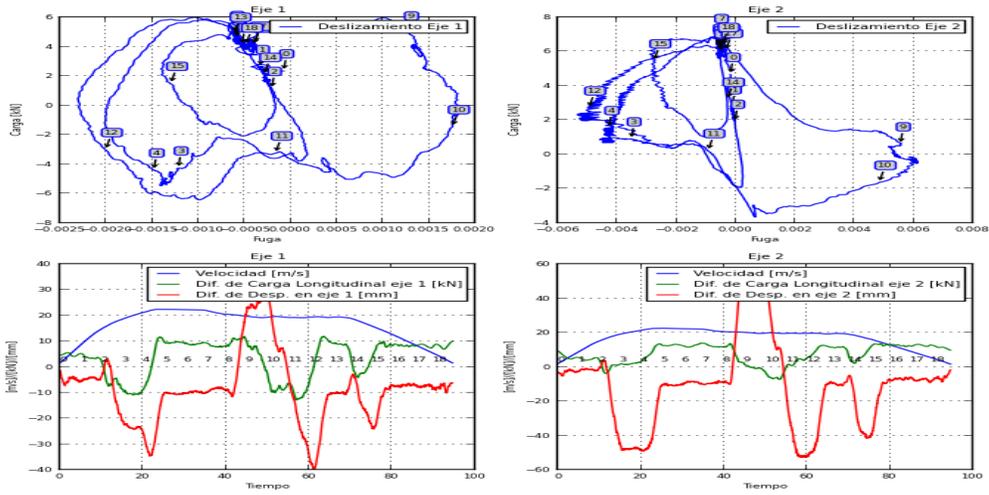
G.11) Tramo “Plaza Venezuela” a “Sabana Grande”



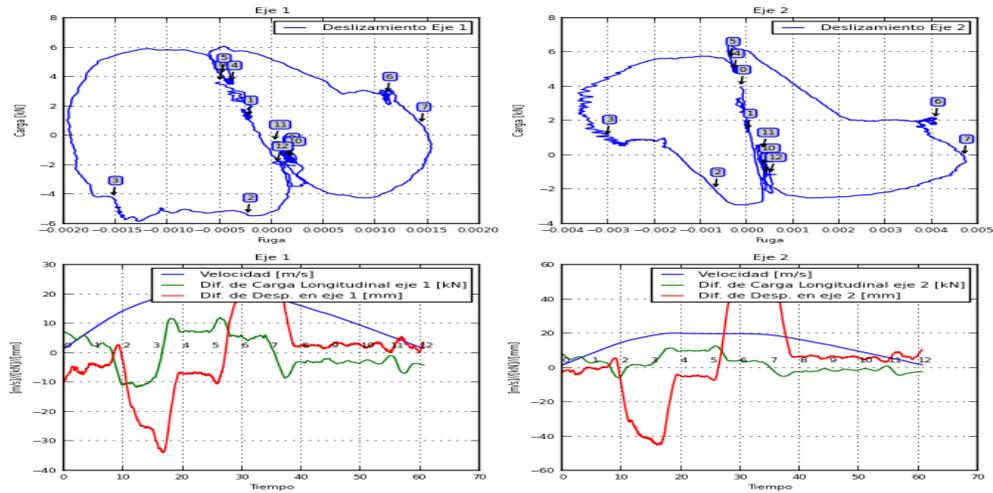
G.12) Tramo “Sabana Grande” a “Chacaito”



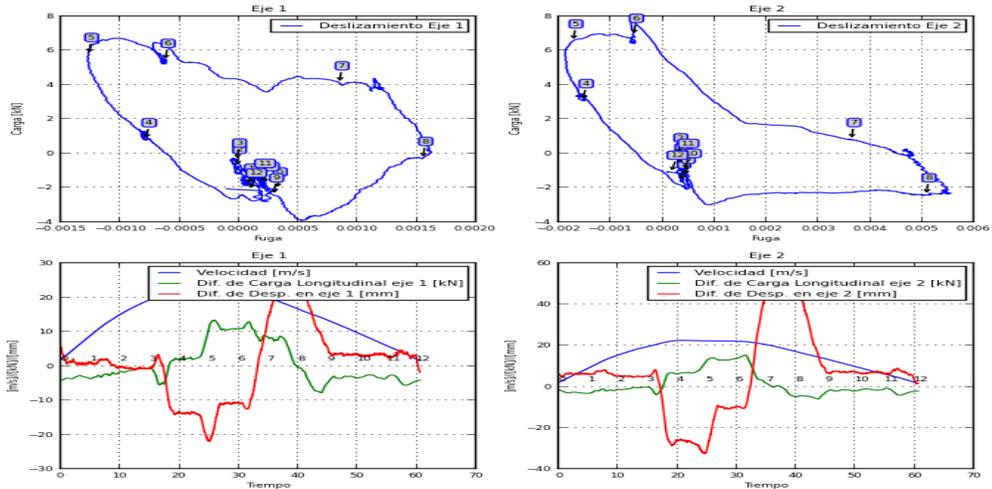
G.13) Tramo “Chacaito” a “Chacao”



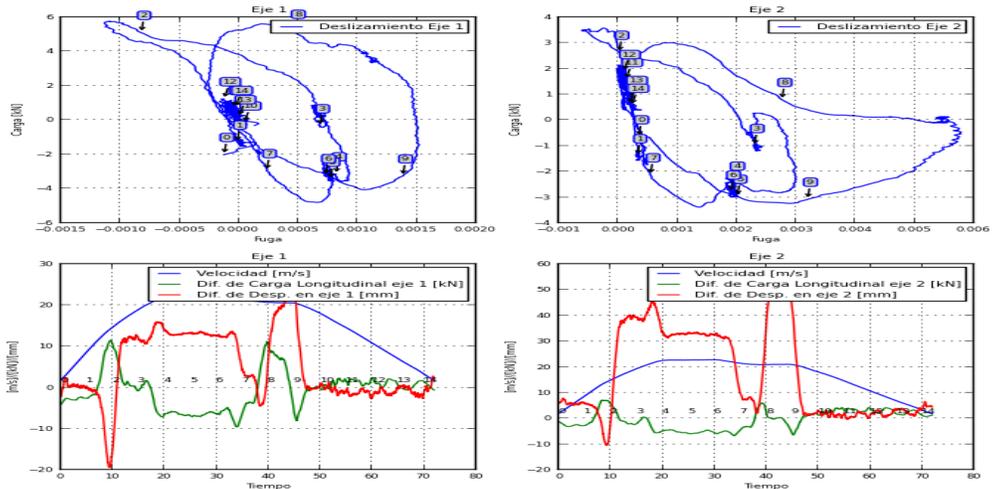
G.14) Tramo “Chacao” a “Altamira”



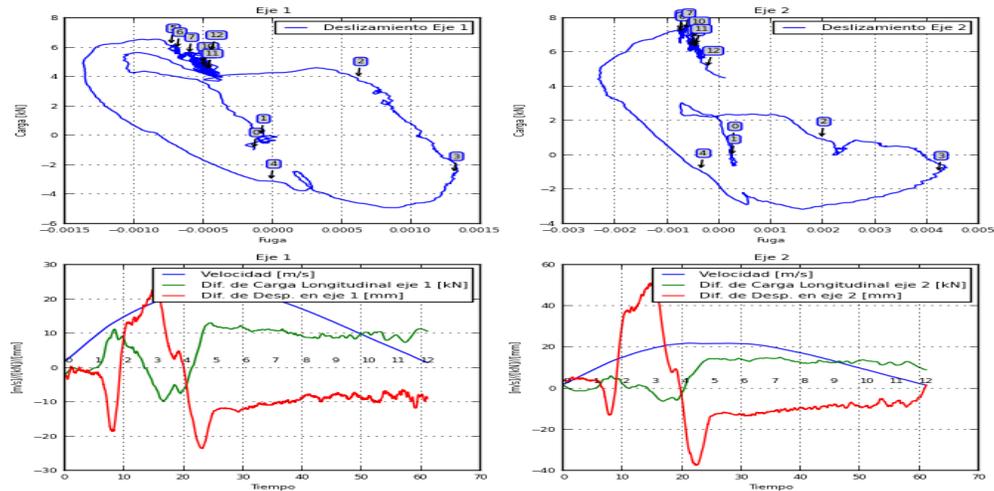
G.15) Tramo “Altamira” a “Parque del este” (“Miranda”)



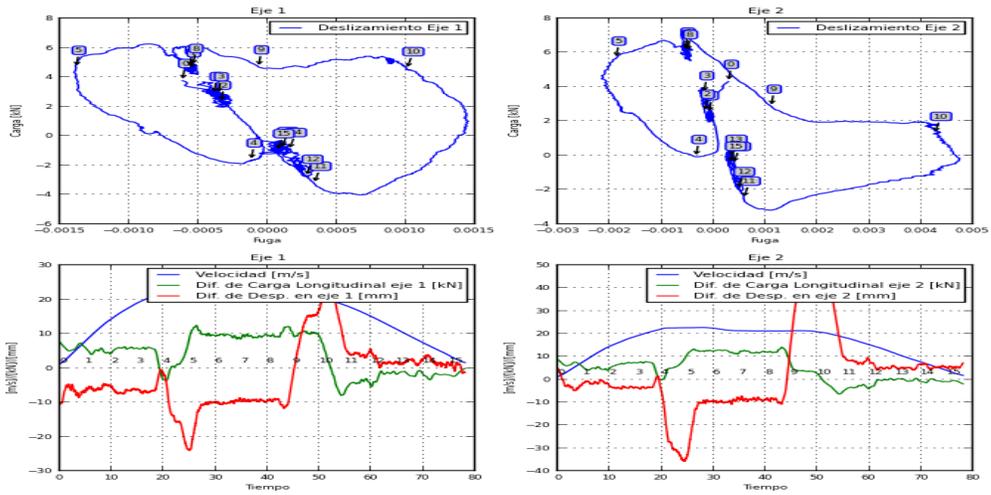
G.16) Tramo “Parque del este” a “Los dos caminos”



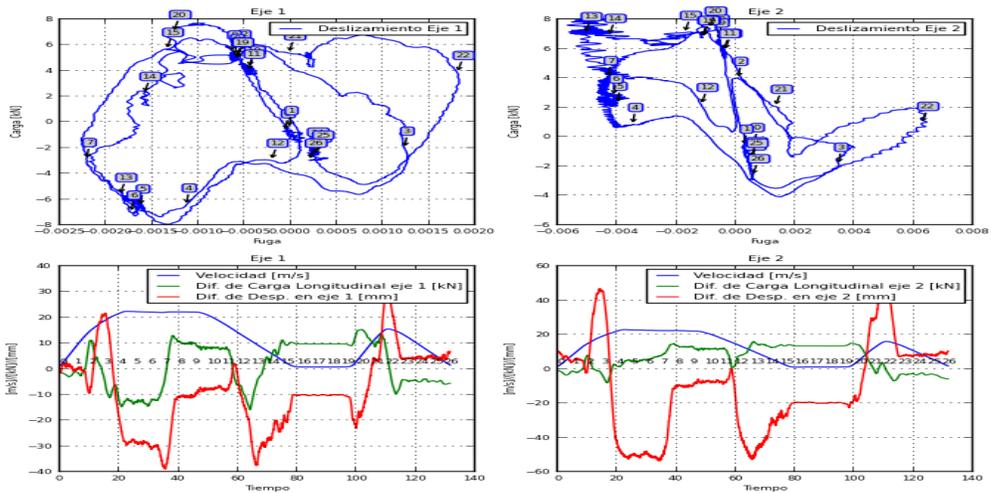
G.17) Tramo “Los dos caminos” a “Los Cortijos”



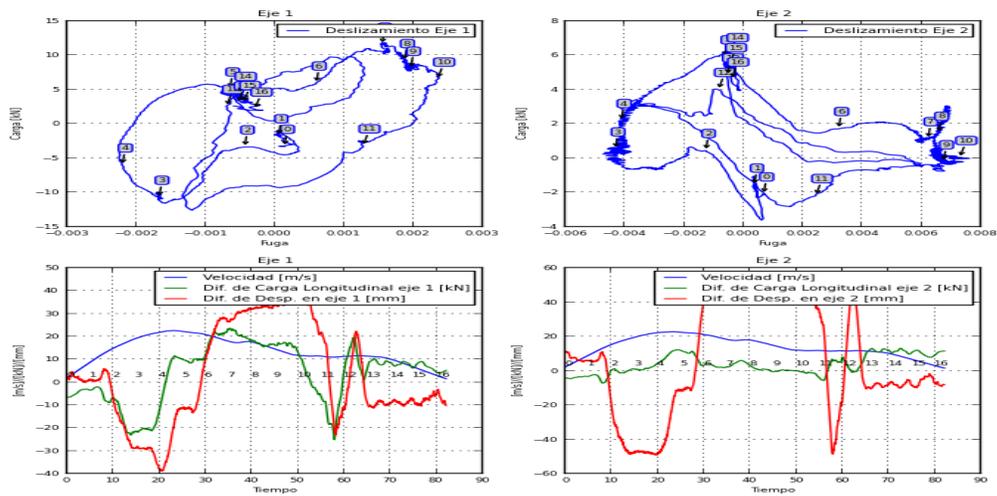
G.18) Tramo “Los Cortijos” a “La California”



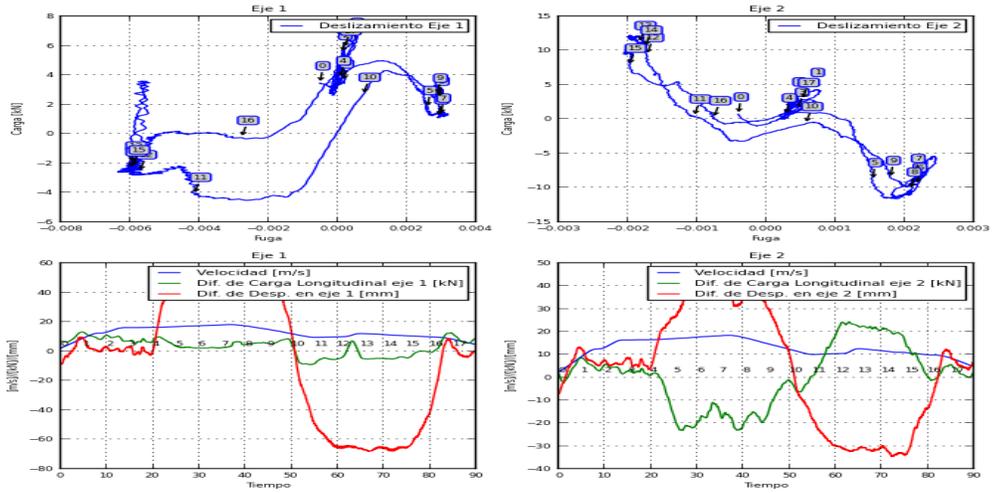
G.19) Tramo “La California” a “Petare”



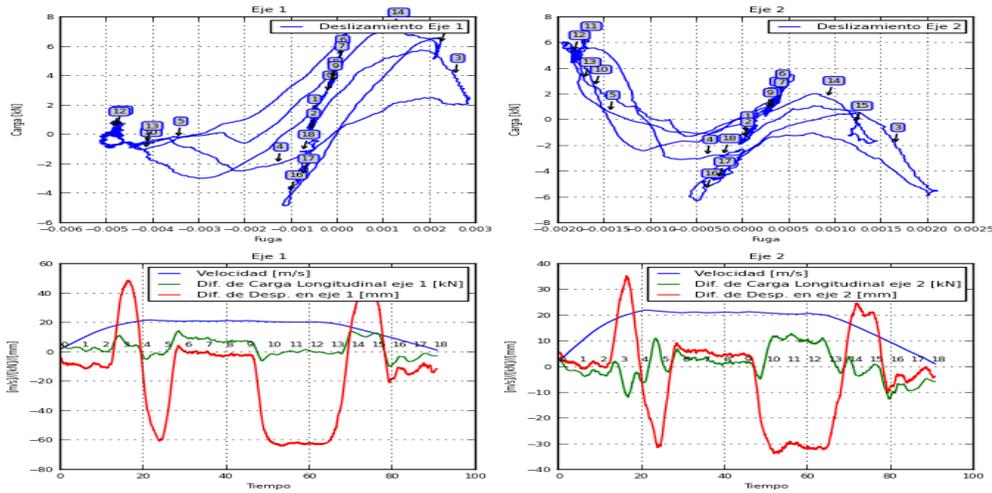
G.20) Tramo “Petare” a “Palo Verde”



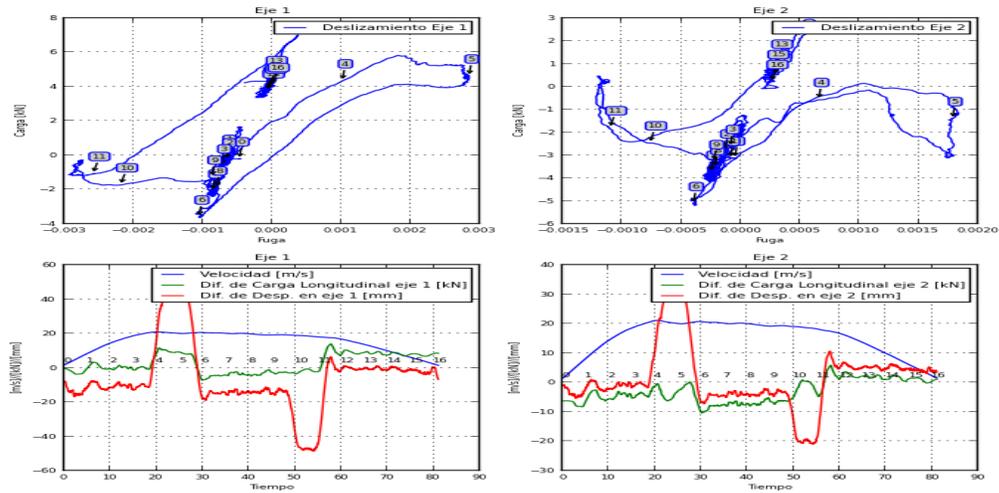
G.21) Tramo “Palo Verde” a “Petare”



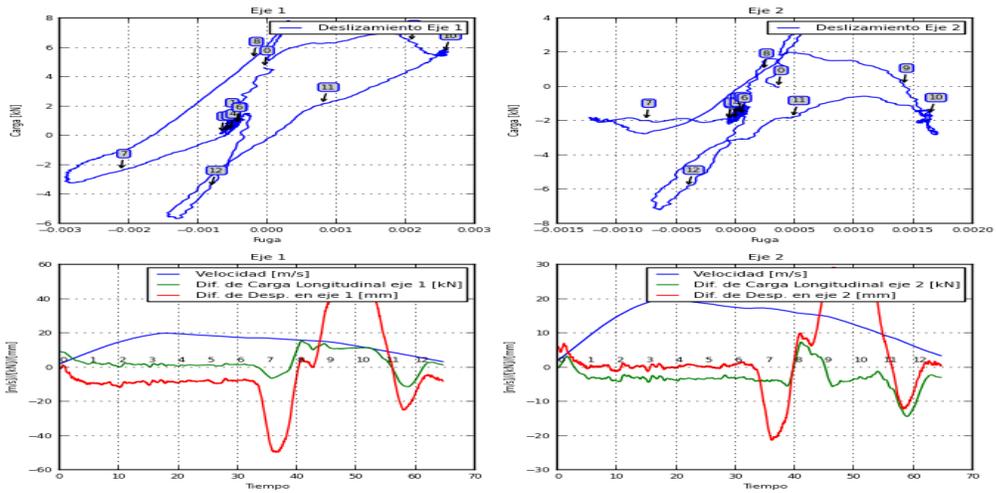
G.22) Tramo “Petare” a “La California”



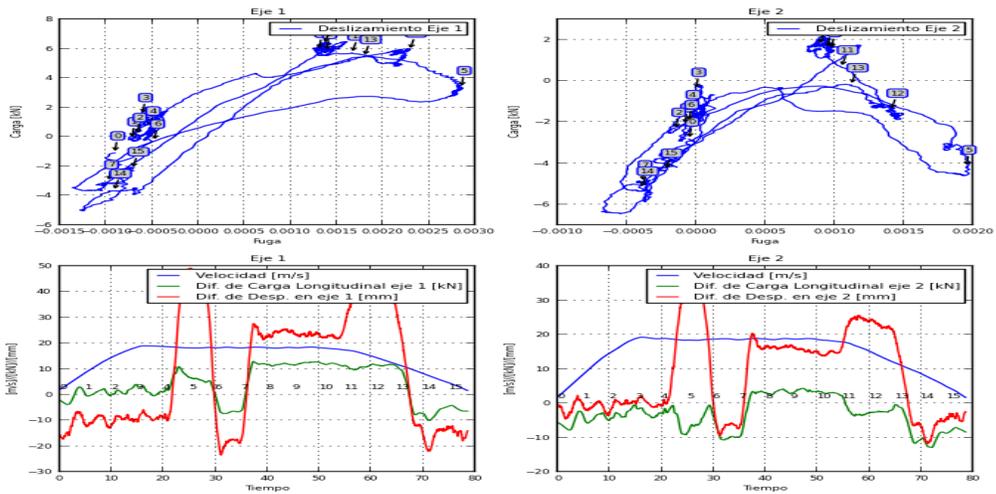
G.23) Tramo “La California” a “Los Cortijos”



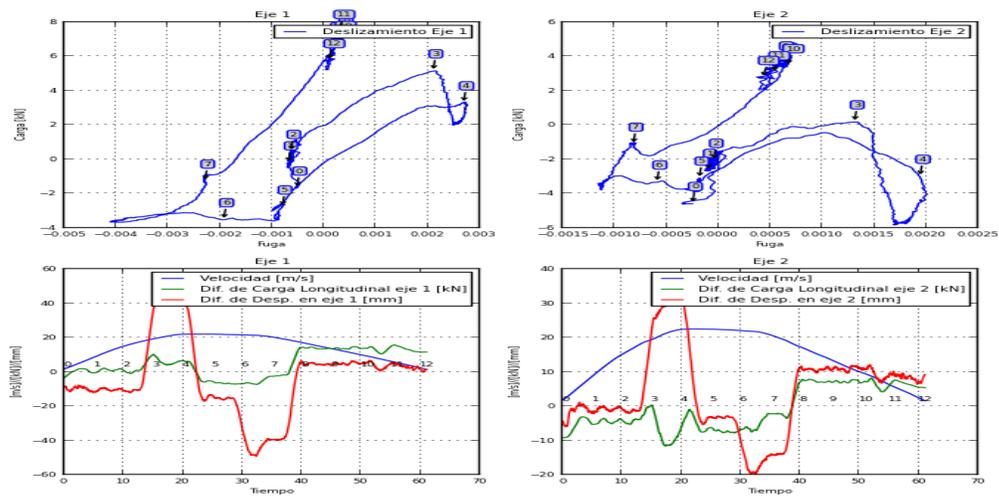
G.24) Tramo “Los Cortijos” a “Los dos caminos”



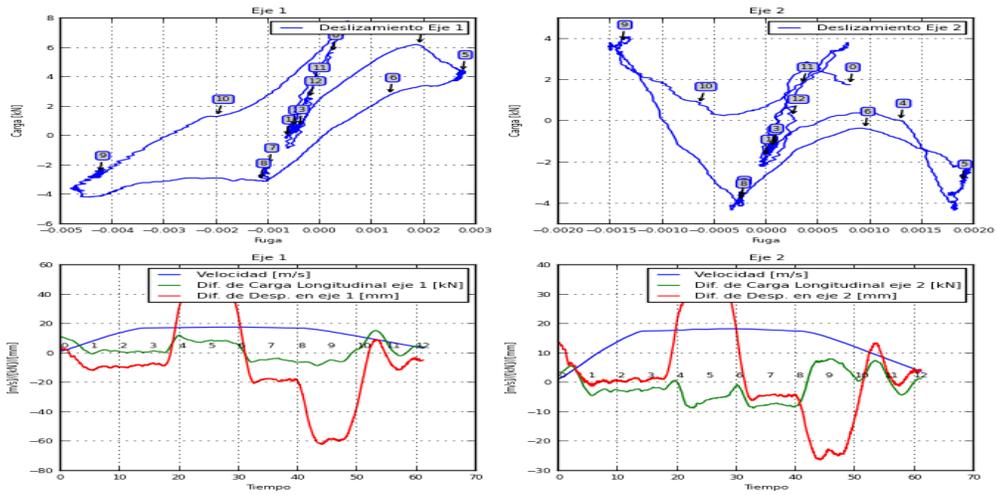
G.25) Tramo “Los Dos caminos” a “Parque del este”



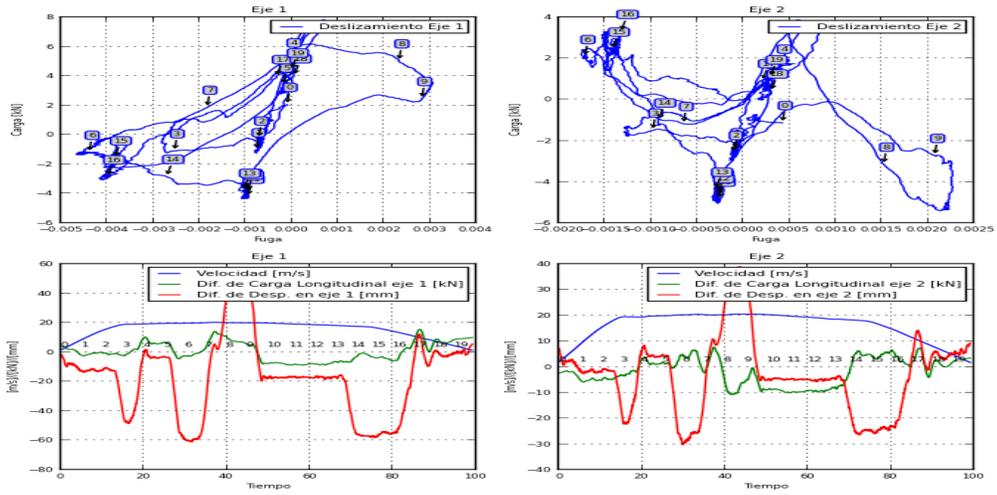
G.26) Tramo “Parque del este” a “Altamira”



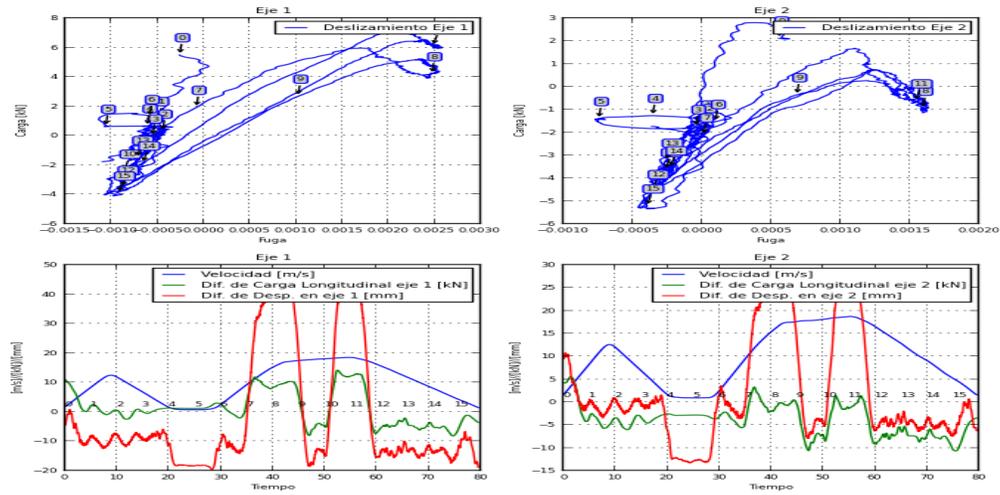
G.27) Tramo "Altamira" a "Chacao"



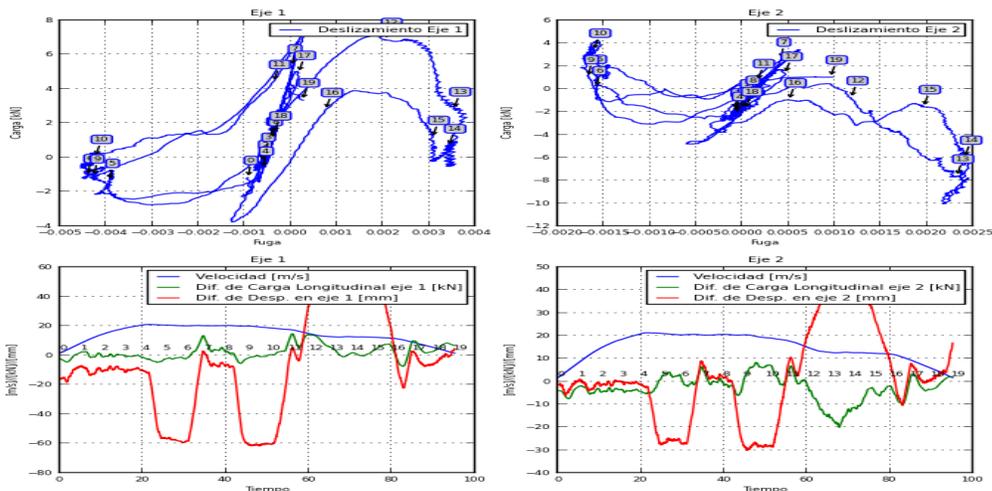
G.28) Tramo "Chacao" a Chacaito"



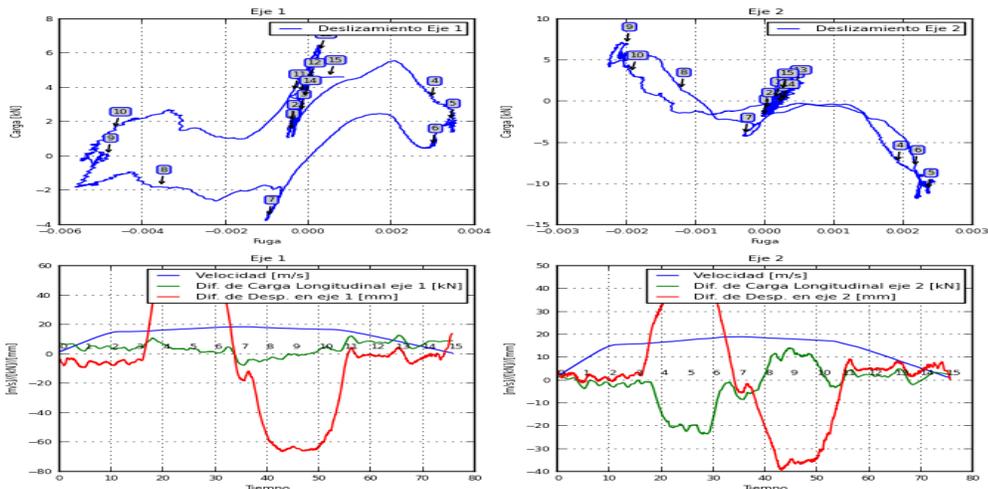
G.29) Tramo "Chacaito" a "Sabana Grande"



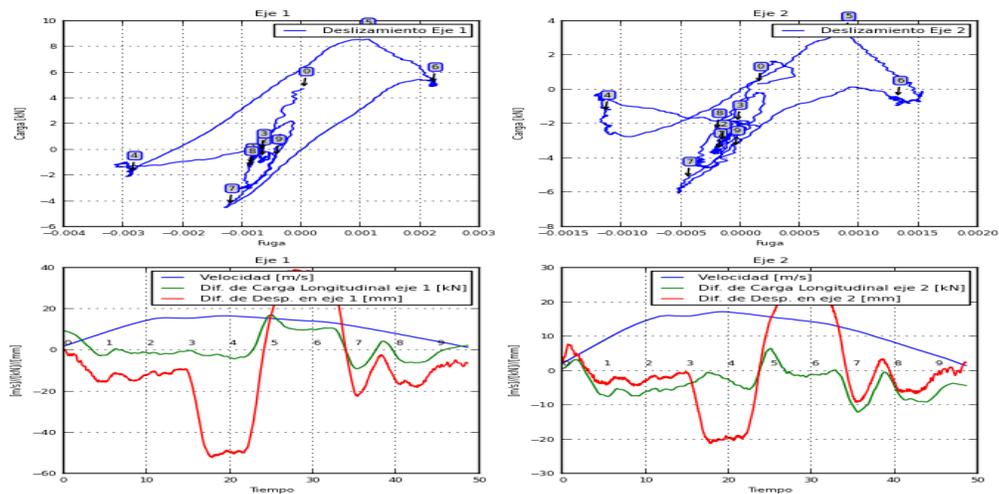
G.30) Tramo “Sabana Grande” a “Plaza Venezuela”



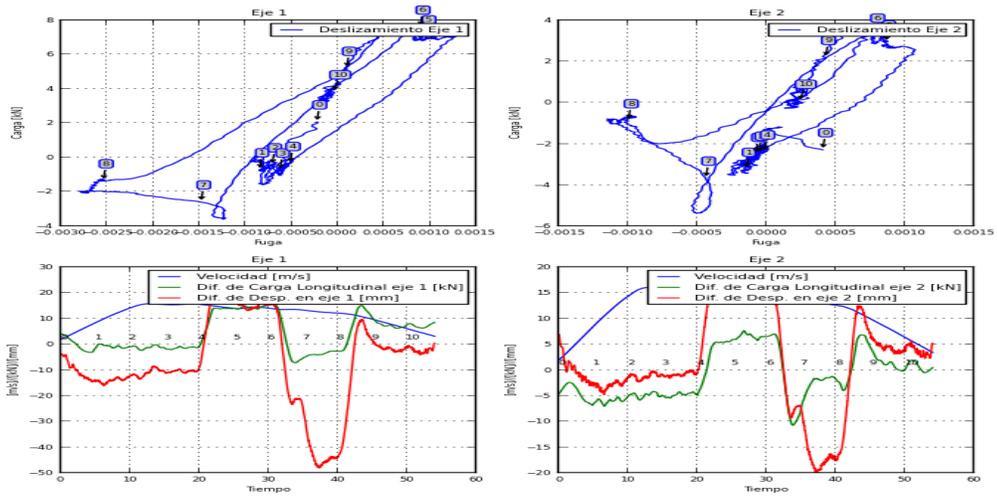
G.31) Tramo “Plaza Venezuela” a “Colegio de Ingenieros”



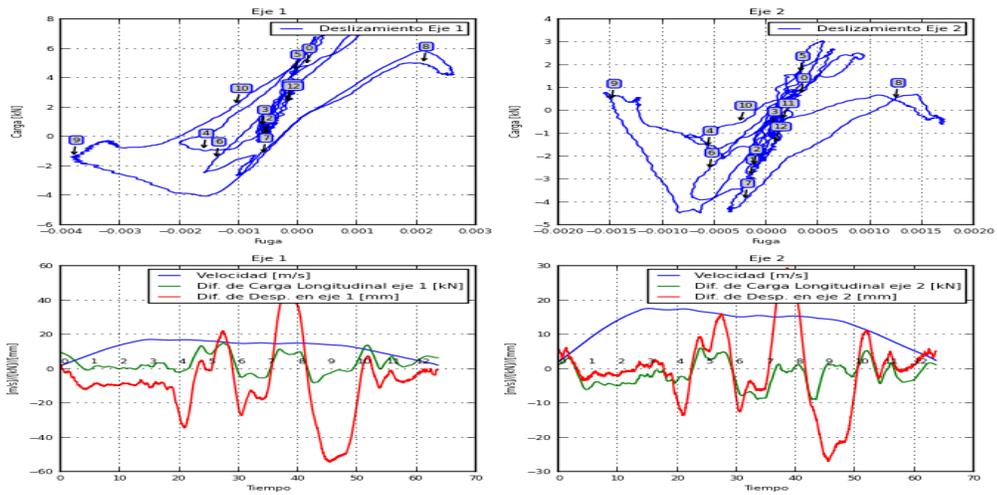
G.32) Tramo “Colegio de Ingenieros” a “Bellas Artes”



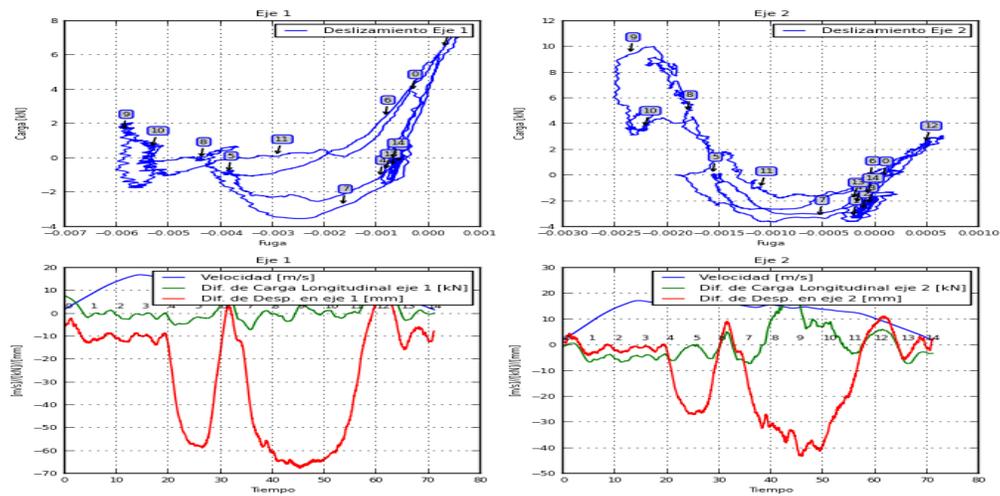
G.33) Tramo “Bellas Artes” a “Parque Carabobo”



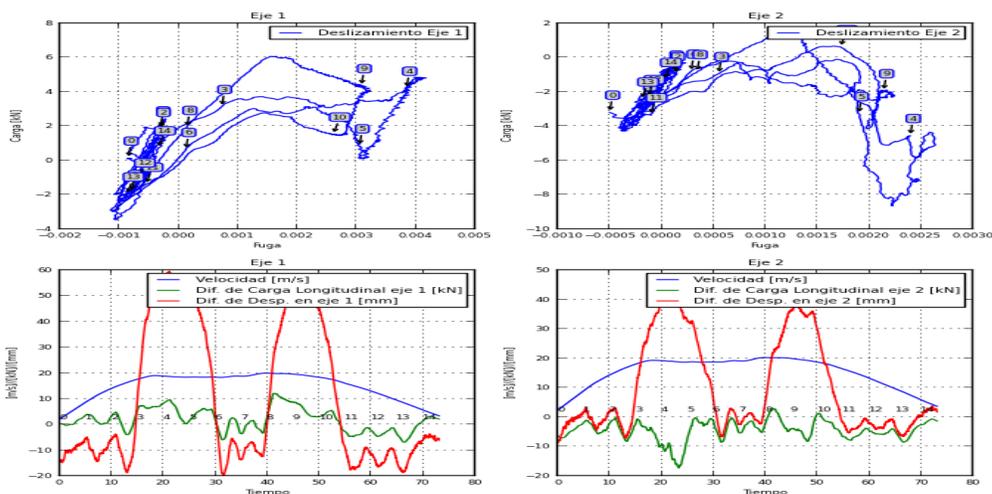
G.34) Tramo “Parque Carabobo” a “Hoyada”



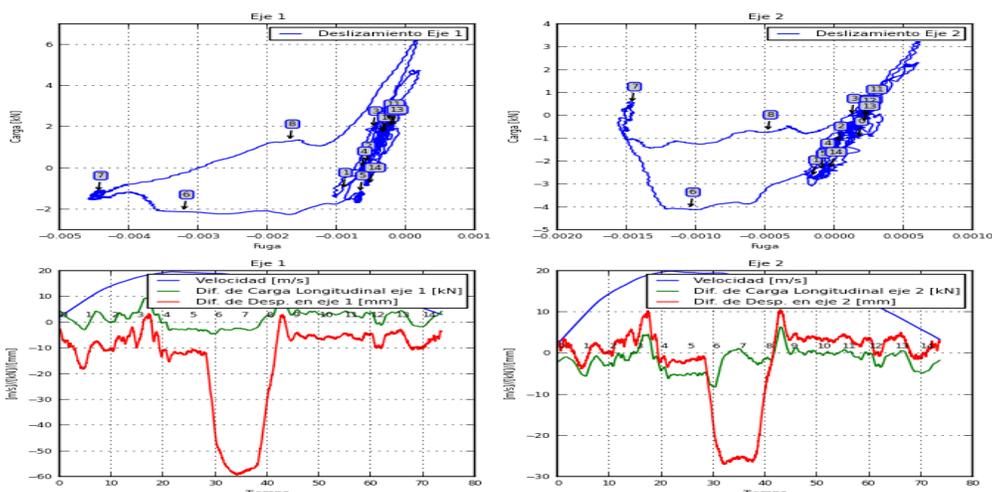
G.35) Tramo “Hoyada” a “Capitolio”



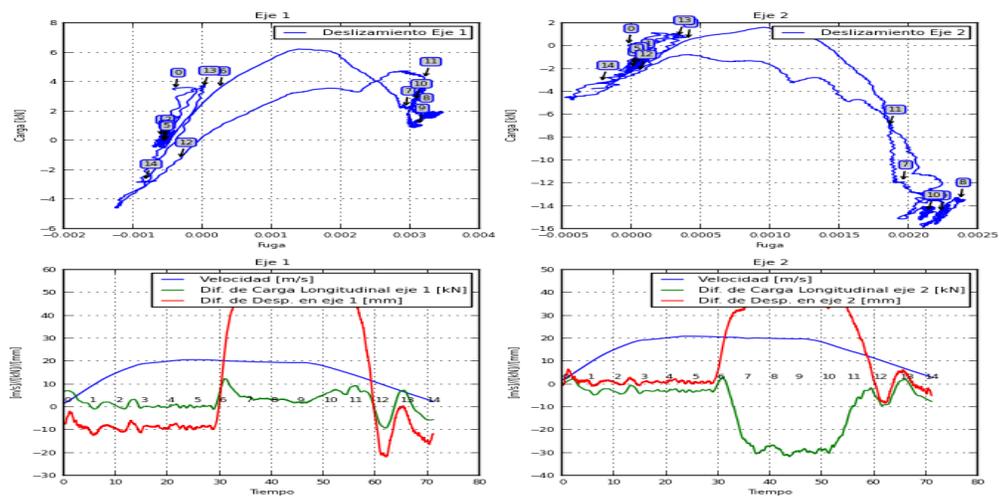
G.36) Tramo “Capitolio” a “Caño Amarillo”



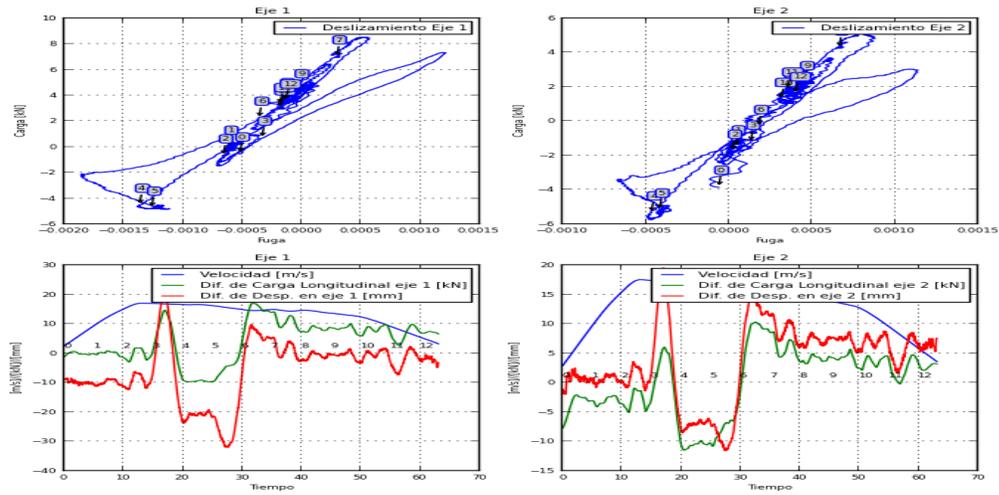
G.37) Tramo “Caño Amarillo” a “Agua Salud”



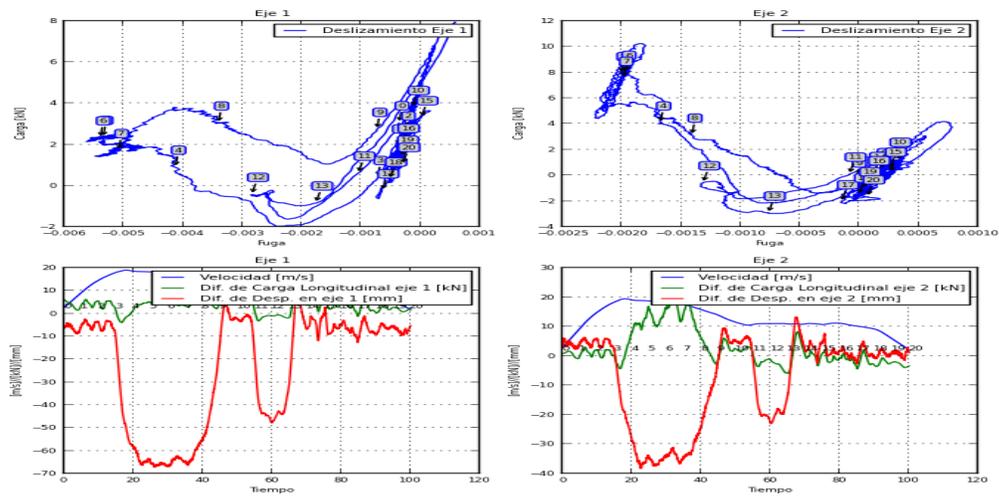
G.38) Tramo “Agua Salud” a “Gato Negro”



G.39) Tramo “Gato Negro” a “Plaza Sucre”

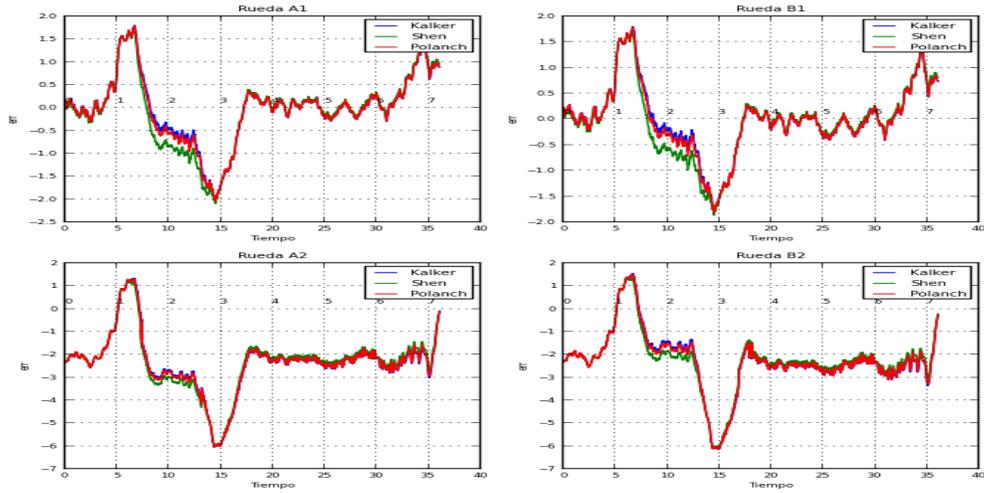


G.40) Tramo “Plaza Sucre” a “Perez Bonalde”

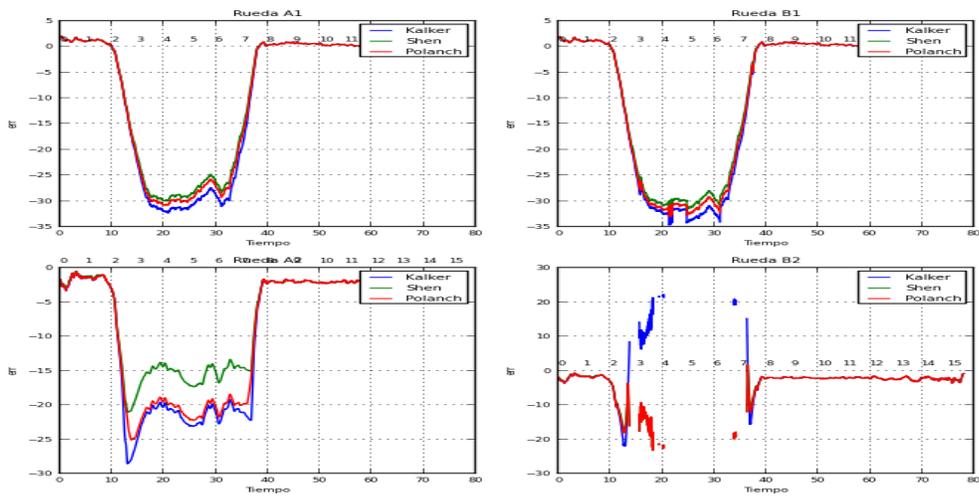


Apéndice H:
**Gráficos de error las cargas estimadas por los modelos
de contacto rueda riel y resultados obtenidos por la
empresa Transportation Technology Center, Inc. en cada
tramo de la Línea 1.**

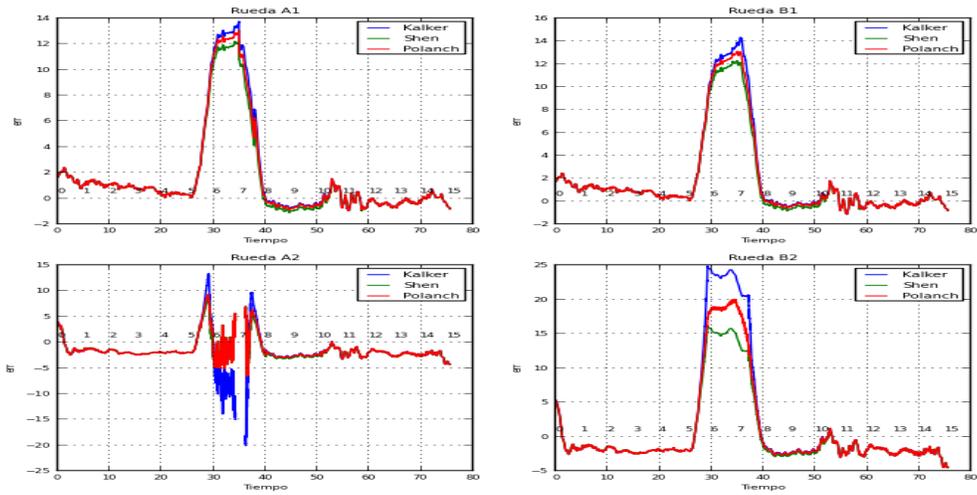
H.1) Tramo “Perez Bonalde” a “Plaza Sucre”



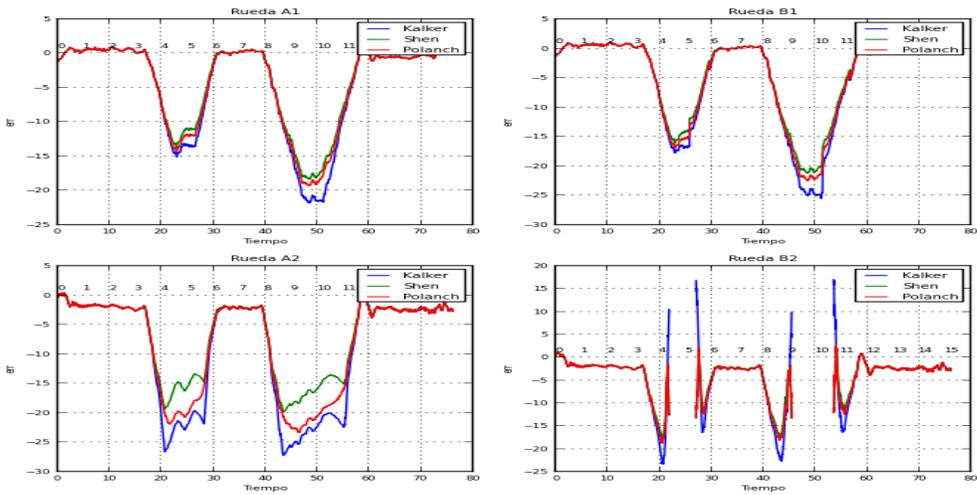
H.2) Tramo “Plaza Sucre” a “Gato Negro”



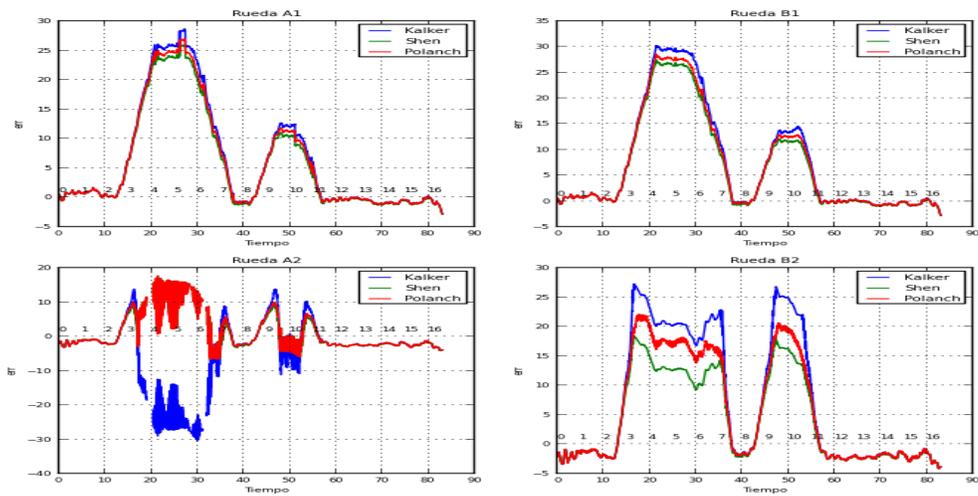
H.3) Tramo “Gato Negro” a “Agua Salud”



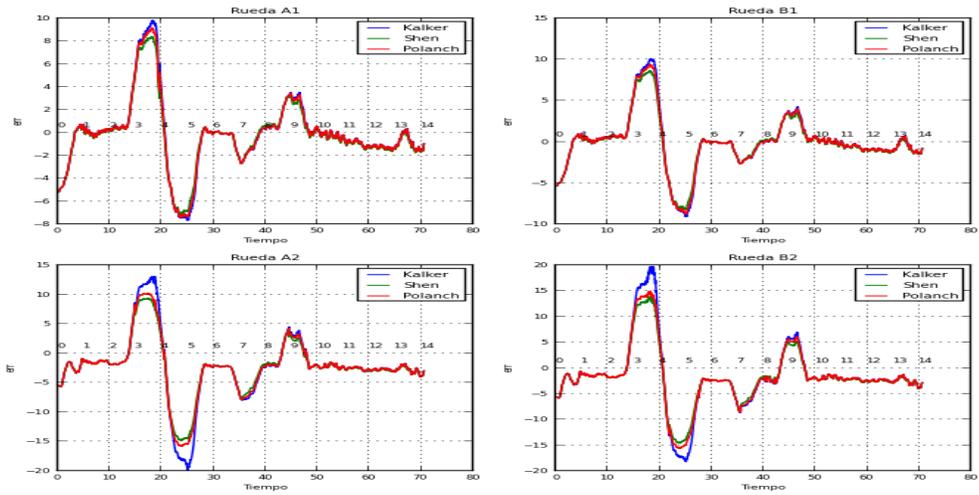
H.4) Tramo “Agua Salud” a “Caño Amarillo”



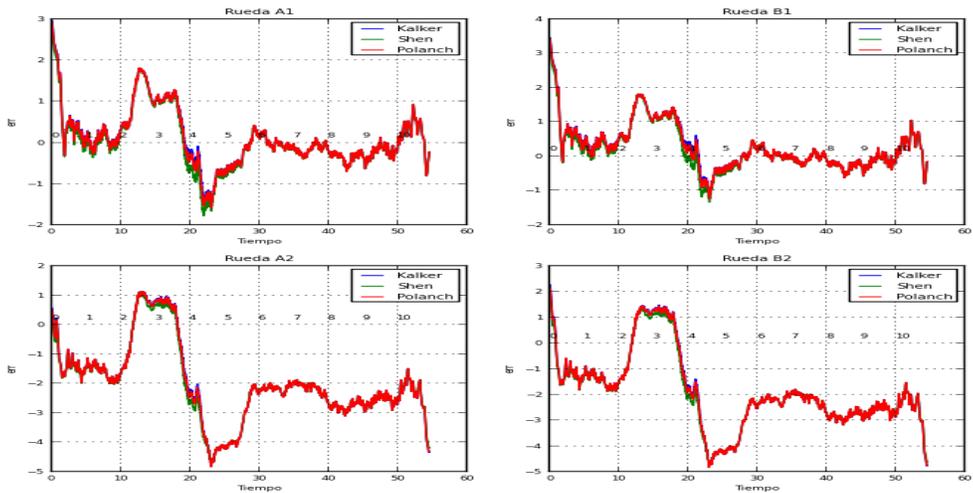
H.5) Tramo “Caño Amarillo” a “Capitolio”



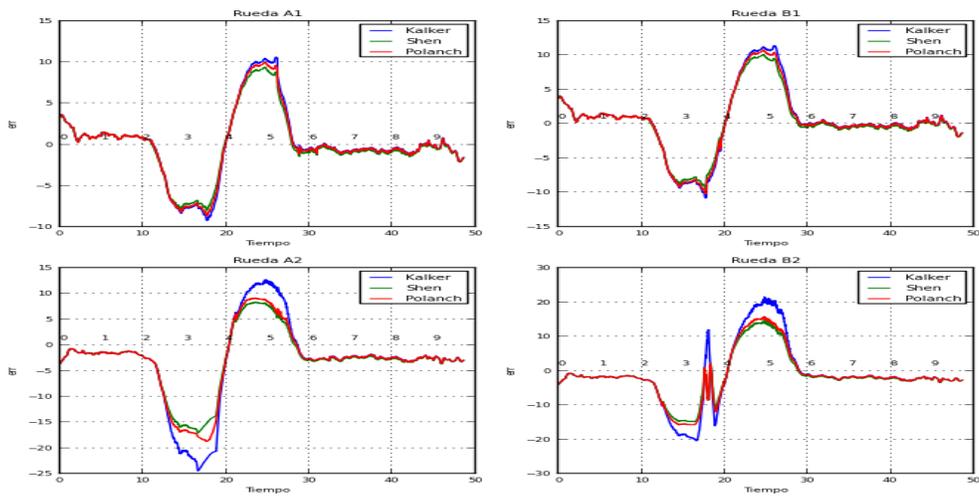
H.6) Tramo “Capitolio” a “Hoyada”



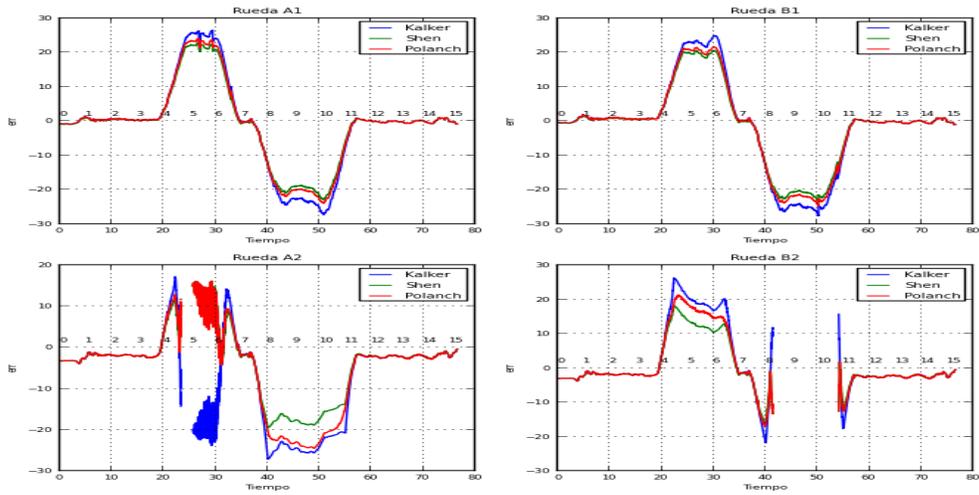
H.7) Tramo “Hoyada” a “Parque Carabobo”



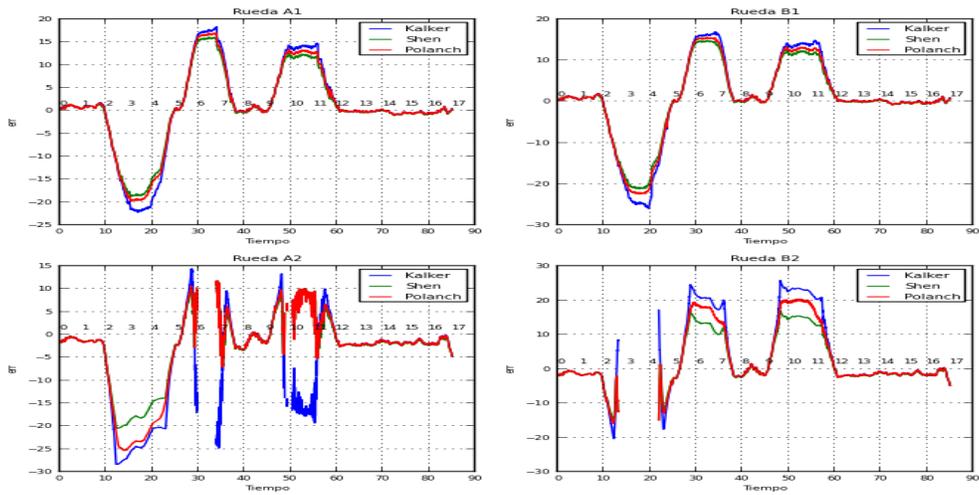
H.8) Tramo “Parque Carabobo” a “Bellas Artes”



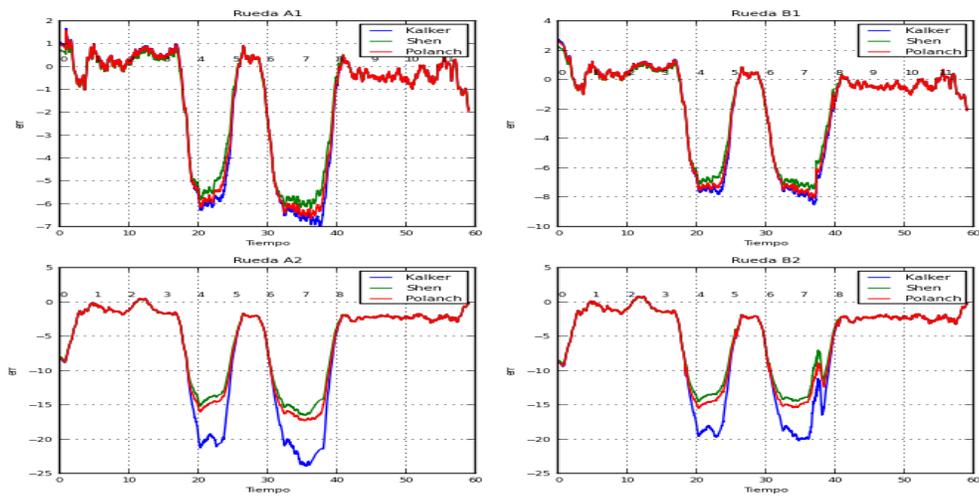
H.9) Tramo “Bellas Artes” a “Colegio de Ingenieros”



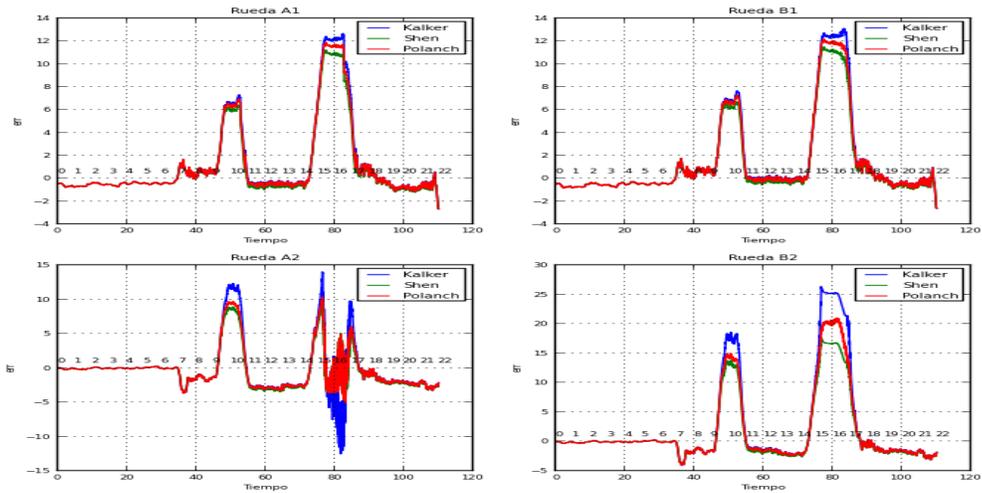
H.10) Tramo “Colegio de Ingenieros” a “Plaza Venezuela”



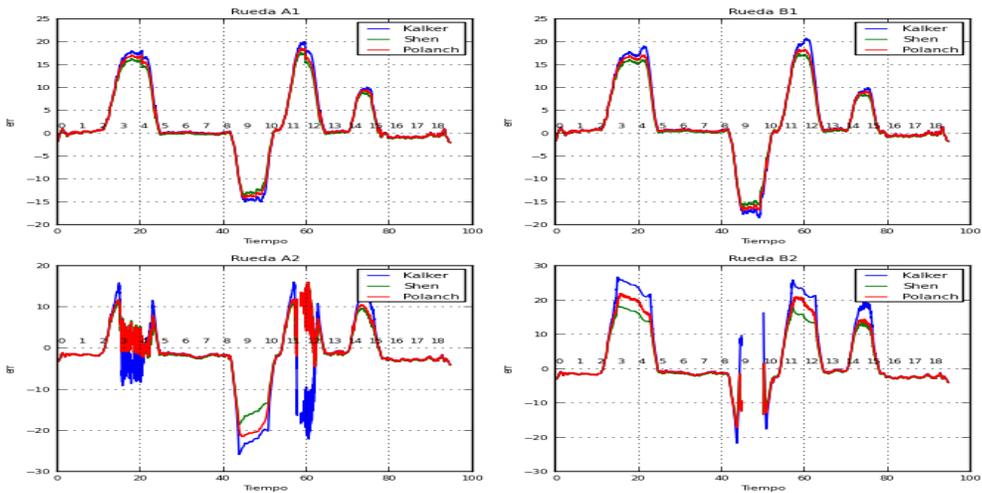
H.11) Tramo “Plaza Venezuela” a “Sabana Grande”



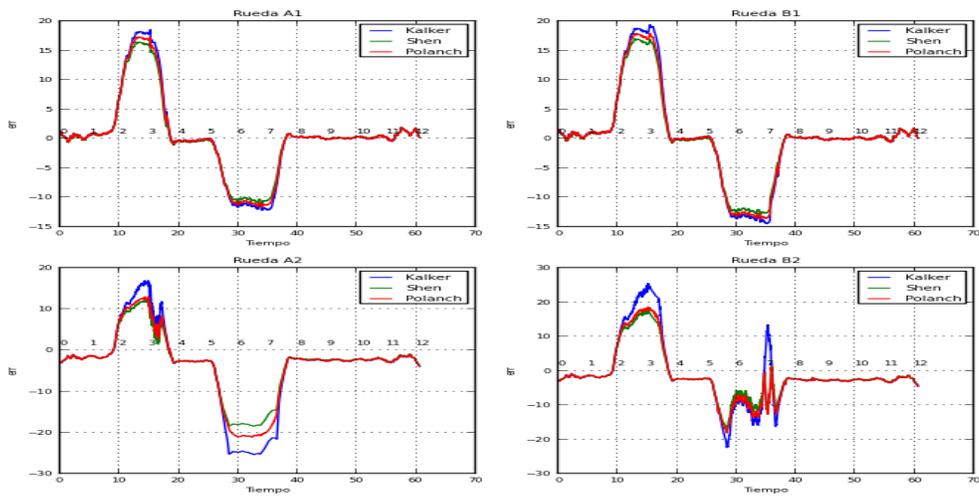
H.12) Tramo “Sabana Grande” a “Chacaito”



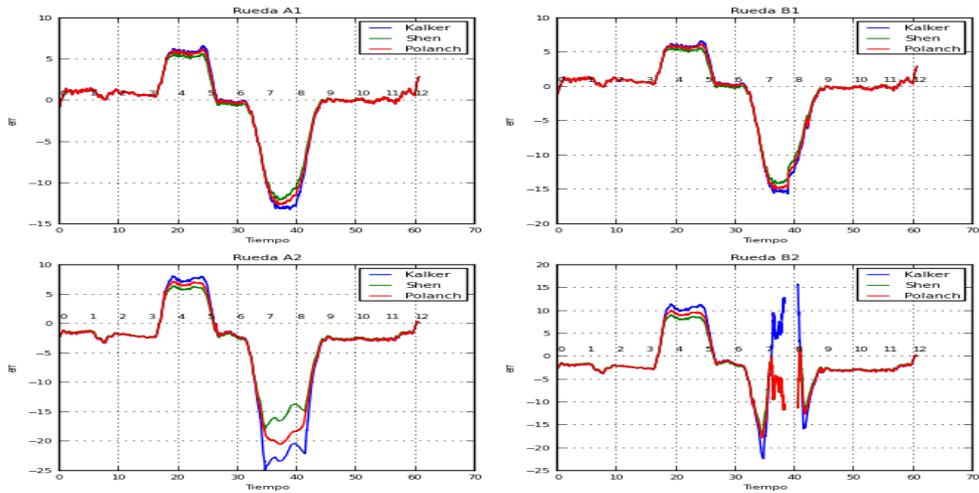
H.13) Tramo “Chacaito” a “Chacao”



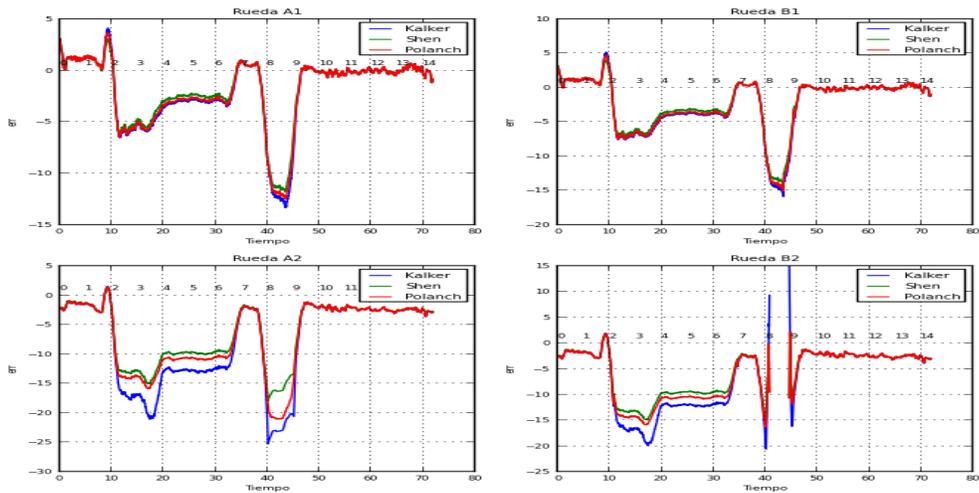
H.14) Tramo “Chacao” a “Altamira”



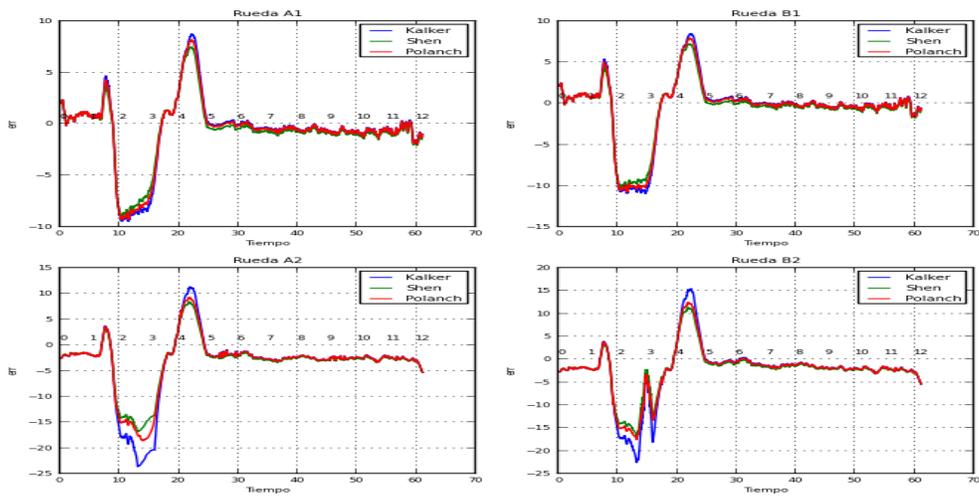
H.15) Tramo “Altamira” a “Parque del este” (“Miranda”)



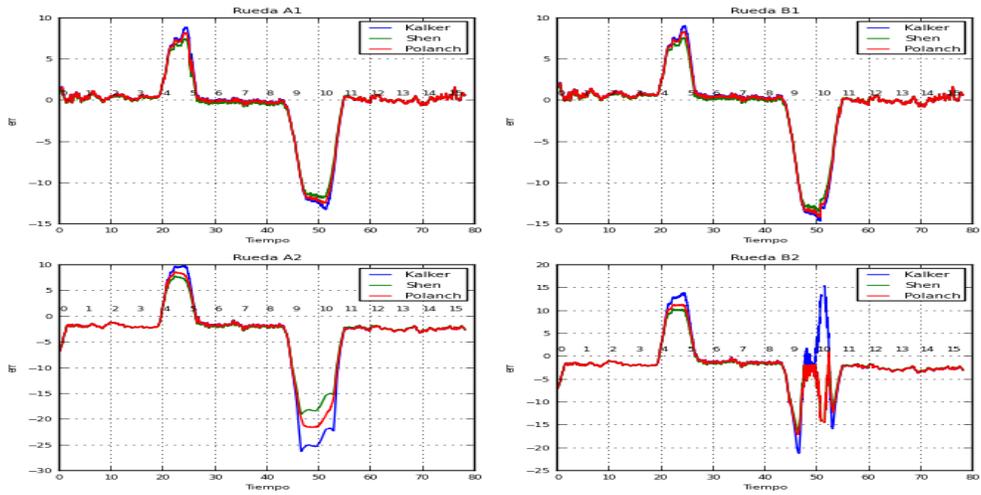
H.16) Tramo “Parque del este” a “Los dos caminos”



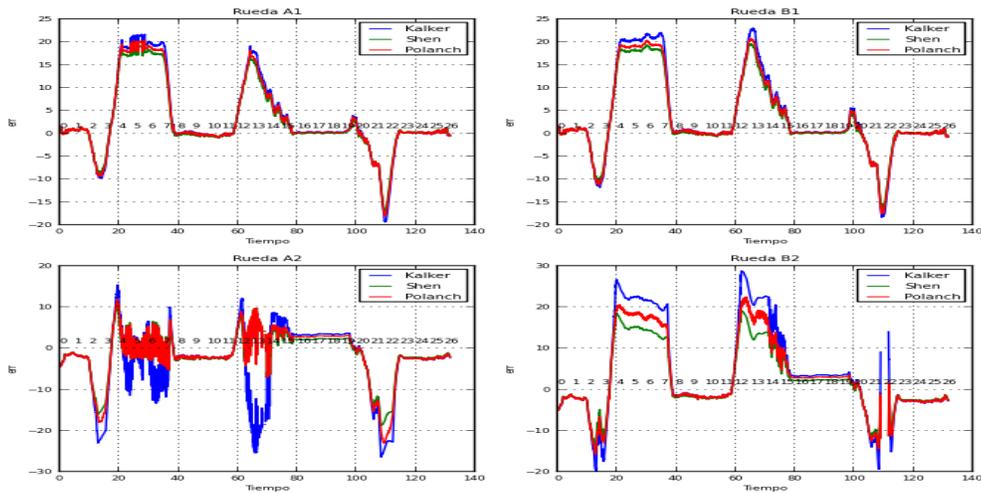
H.17) Tramo “Los dos caminos” a “Los Cortijos”



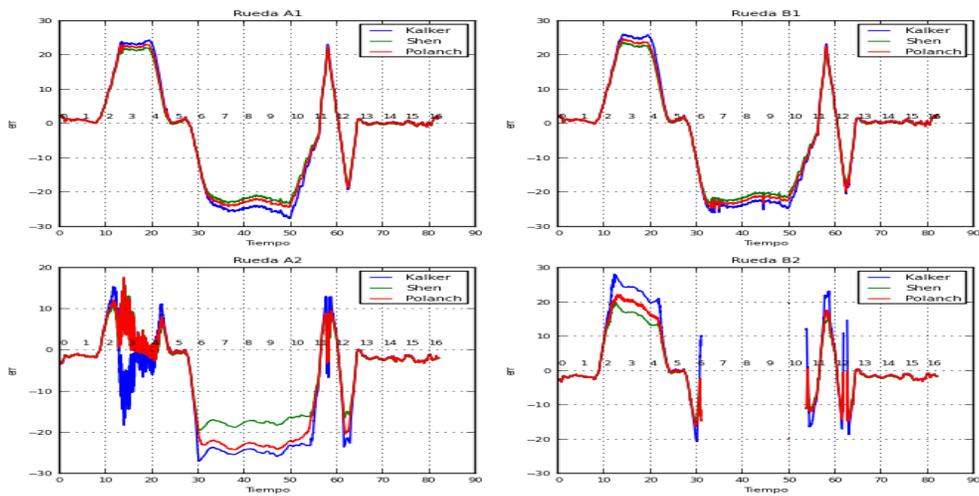
H.18) Tramo “Los Cortijos” a “La California”



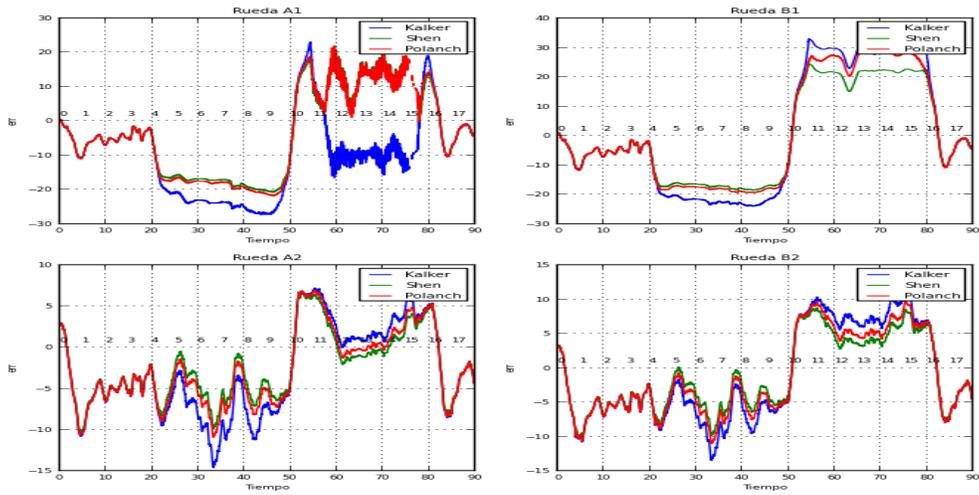
H.19) Tramo “La California” a “Petare”



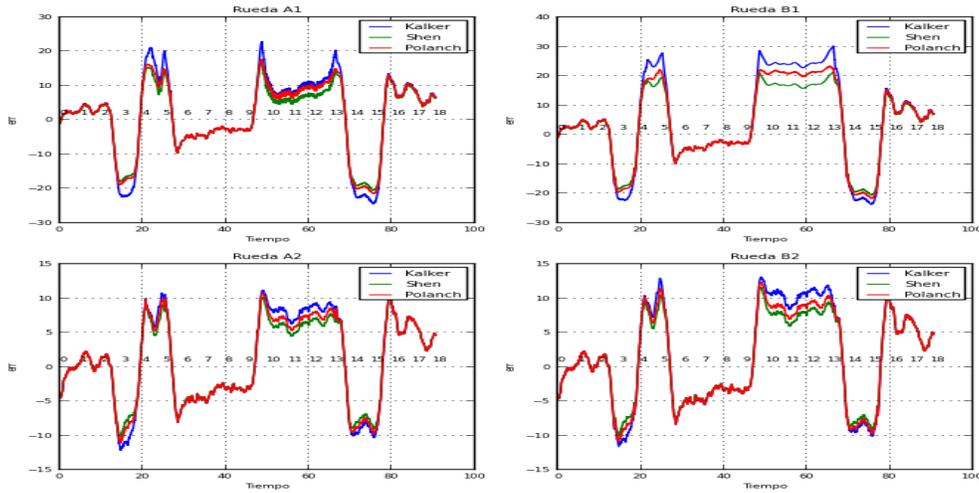
H.20) Tramo “Petare” a “Palo Verde”



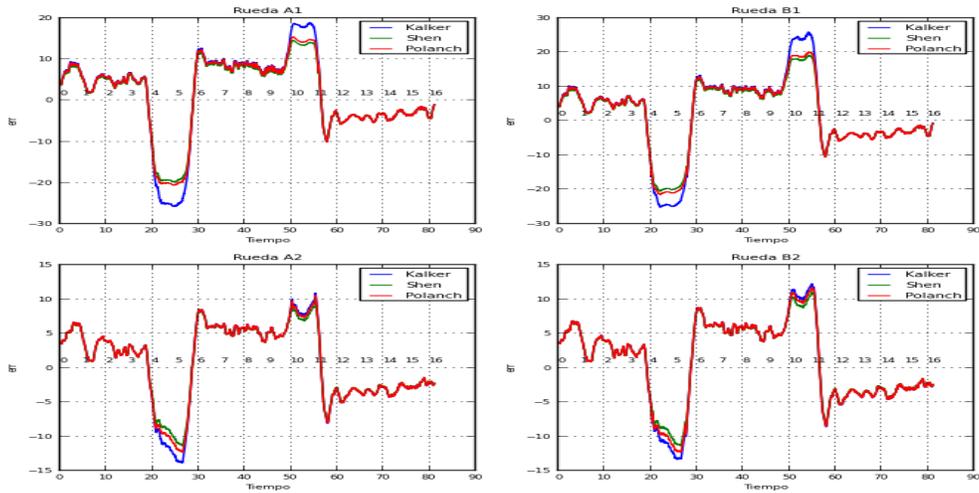
H.21) Tramo “Palo Verde” a “Petare”



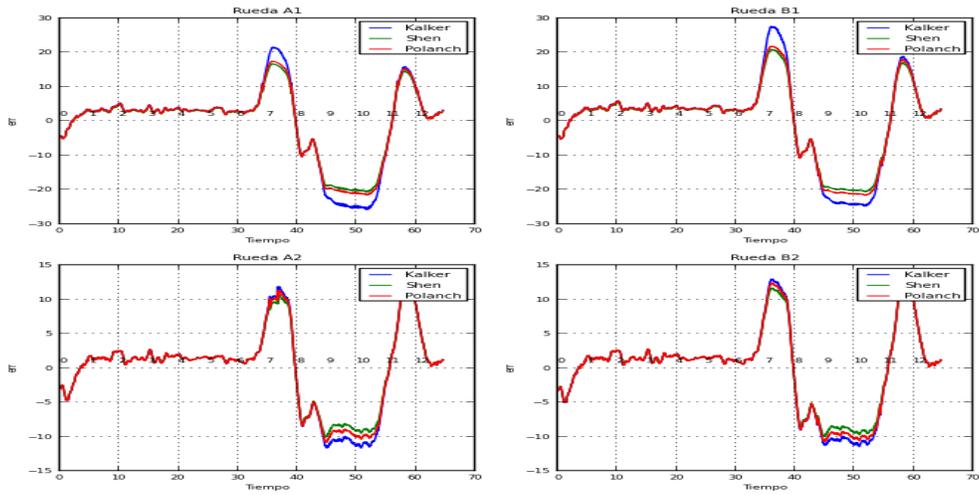
H.22) Tramo “Petare” a “La California”



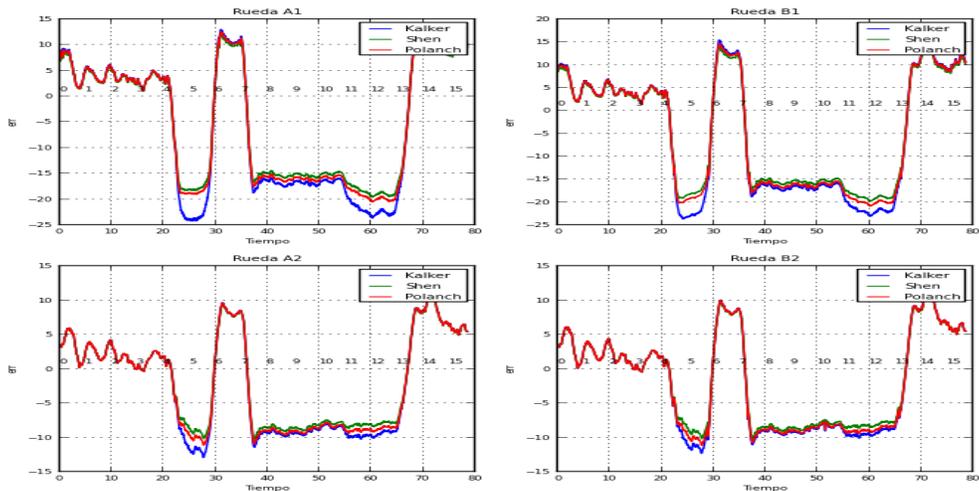
H.23) Tramo “La California” a “Los Cortijos”



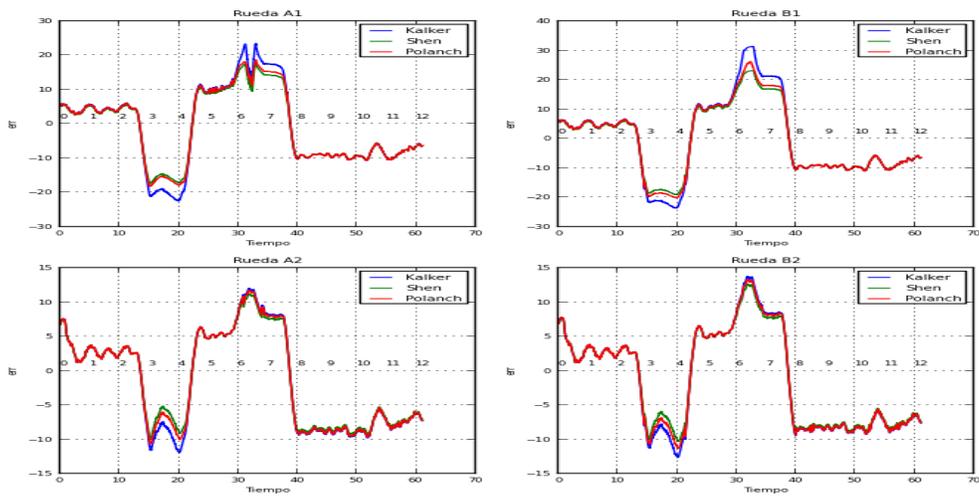
H.24) Tramo “Los Cortijos” a “Los dos caminos”



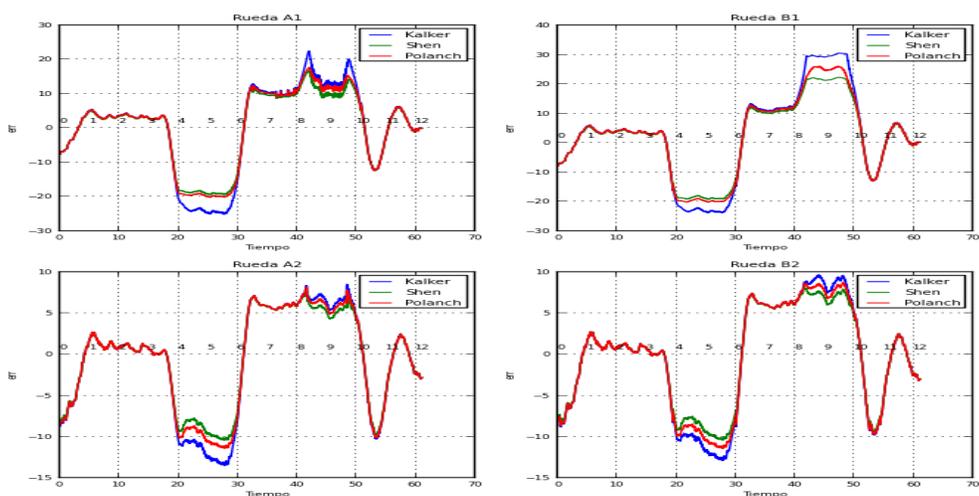
H.25) Tramo “Los Dos caminos” a “Parque del este”



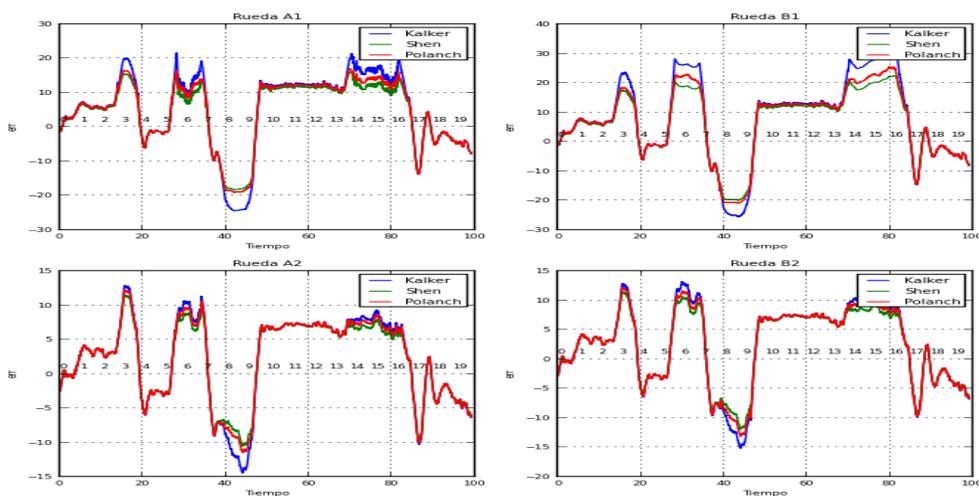
H.26) Tramo “Parque del este” a “Altamira”



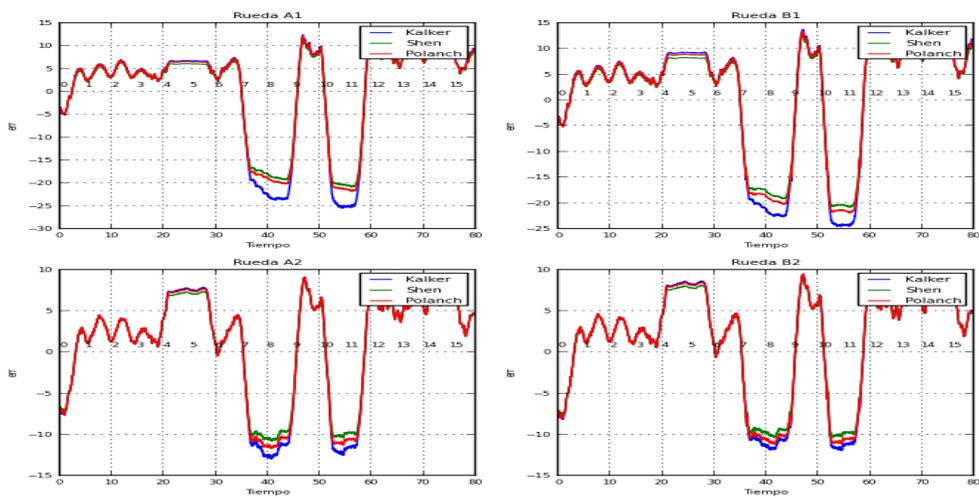
H.27) Tramo “Altamira” a “Chacao”



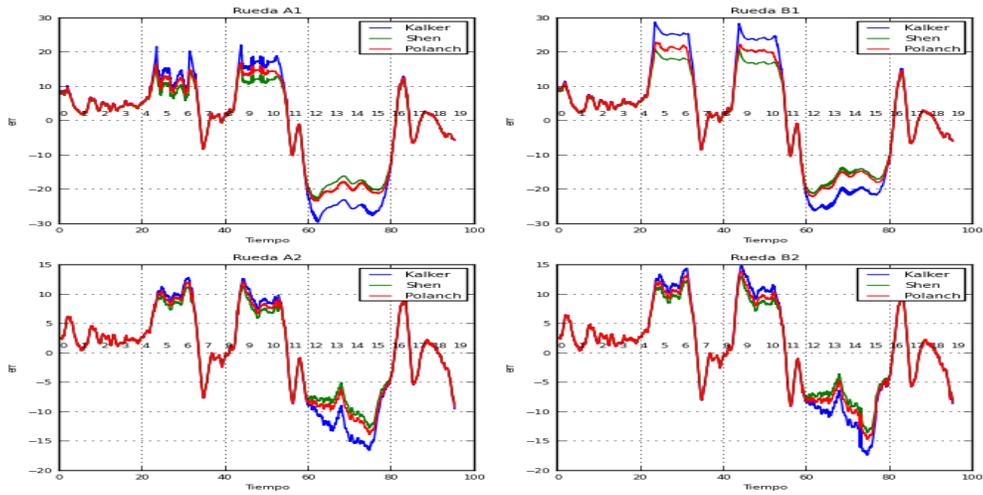
H.28) Tramo “Chacao” a Chacaito”



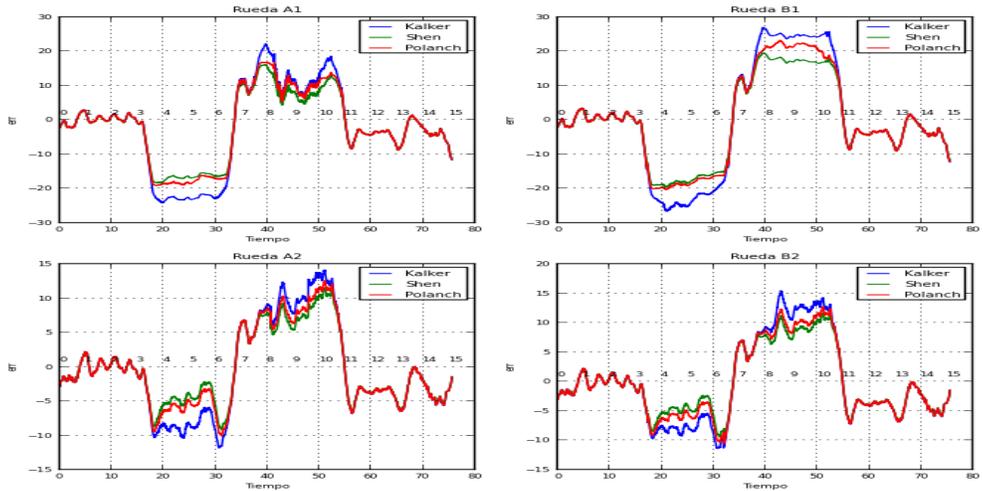
H.29) Tramo “Chacaito” a “Sabana Grande”



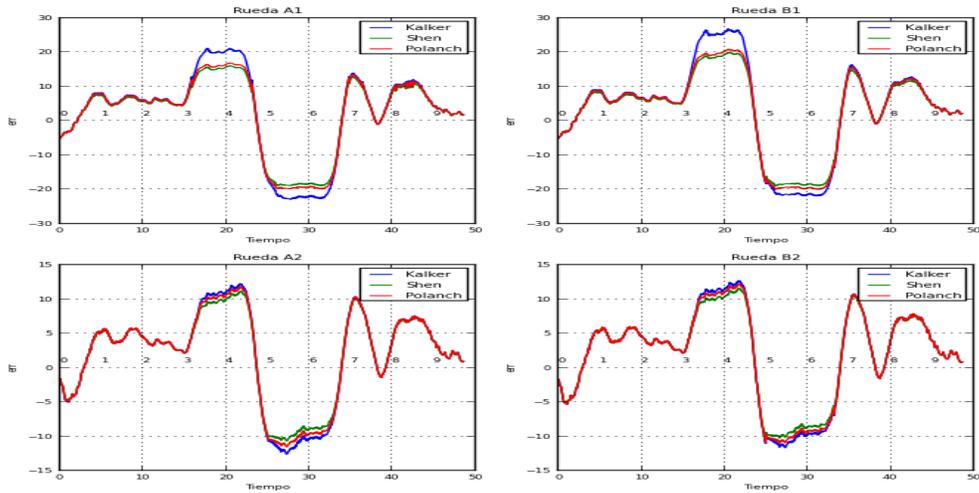
H.30) Tramo “Sabana Grande” a “Plaza Venezuela”



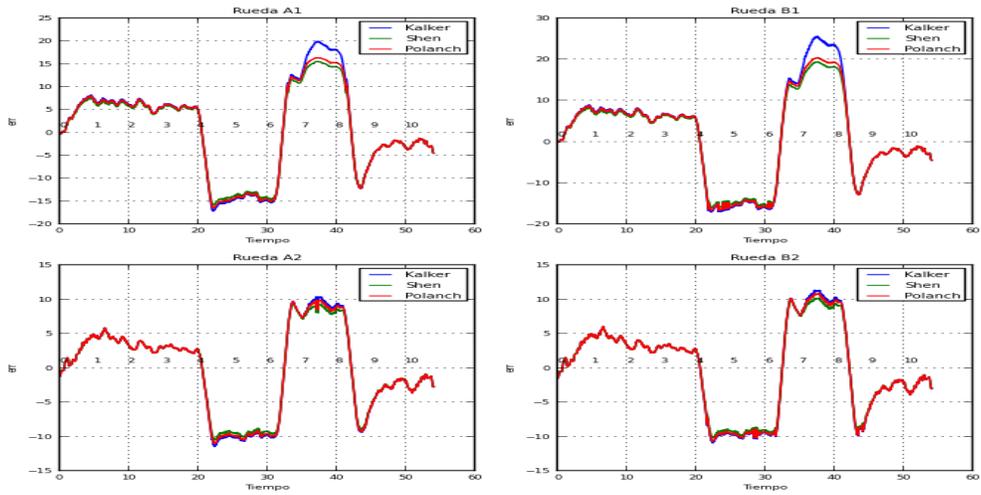
H.31) Tramo “Plaza Venezuela” a “Colegio de Ingenieros”



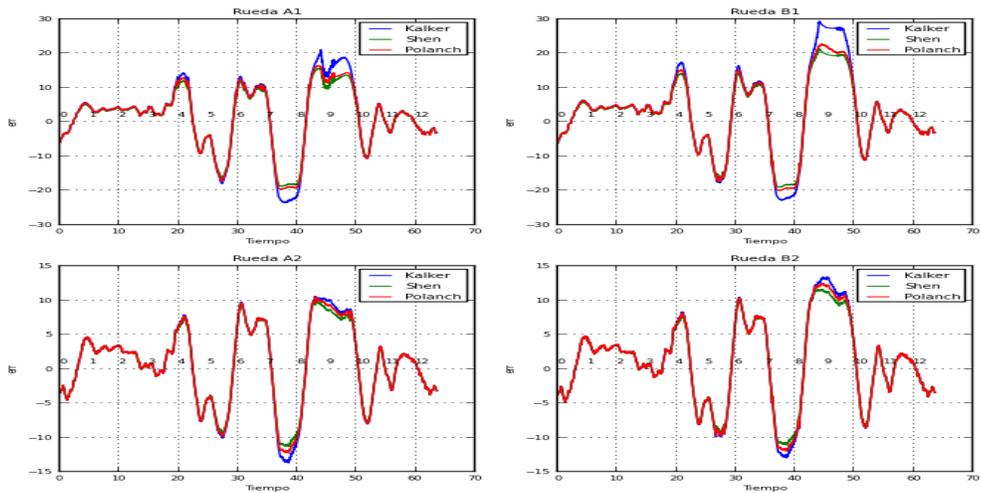
H.32) Tramo “Colegio de Ingenieros” a “Bellas Artes”



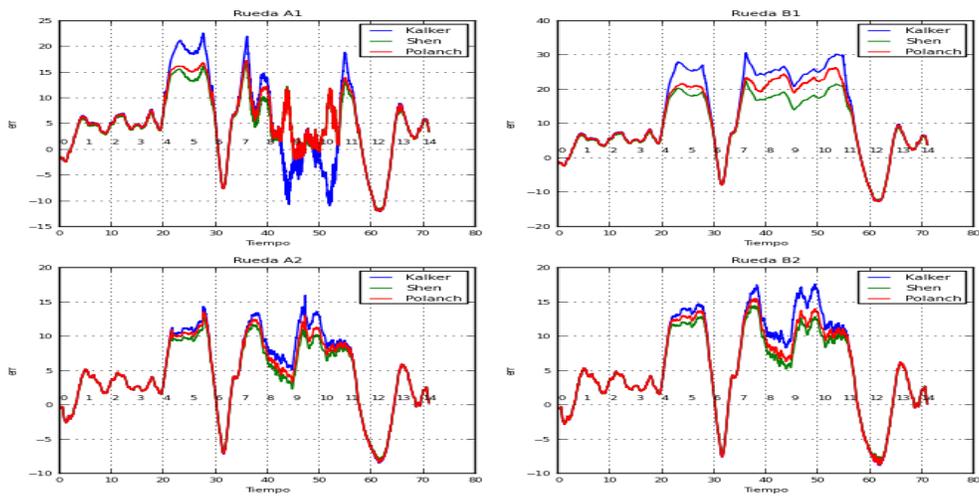
H.33) Tramo “Bellas Artes” a “Parque Carabobo”



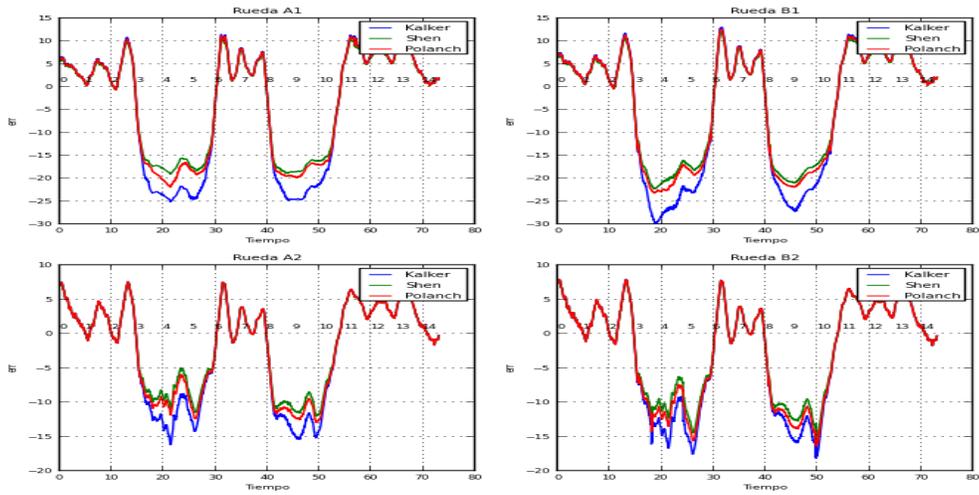
H.34) Tramo “Parque Carabobo” a “Hoyada”



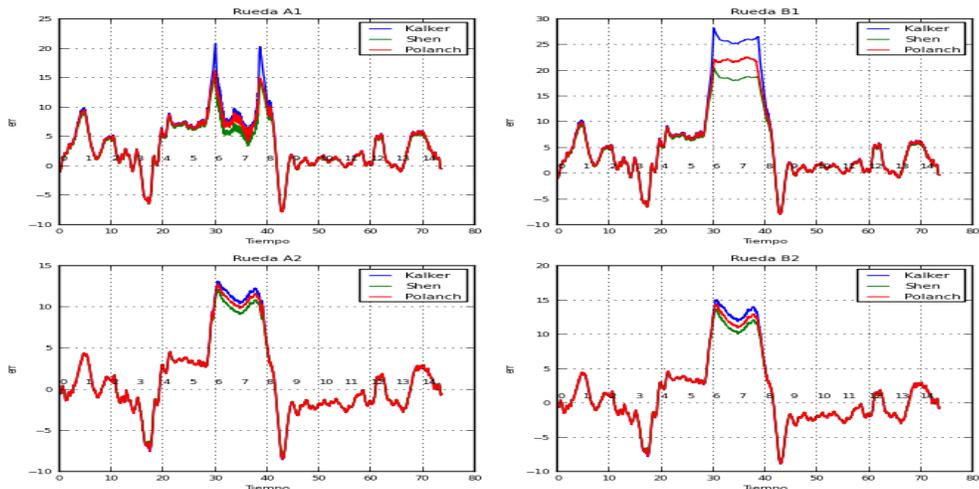
H.35) Tramo “Hoyada” a “Capitolio”



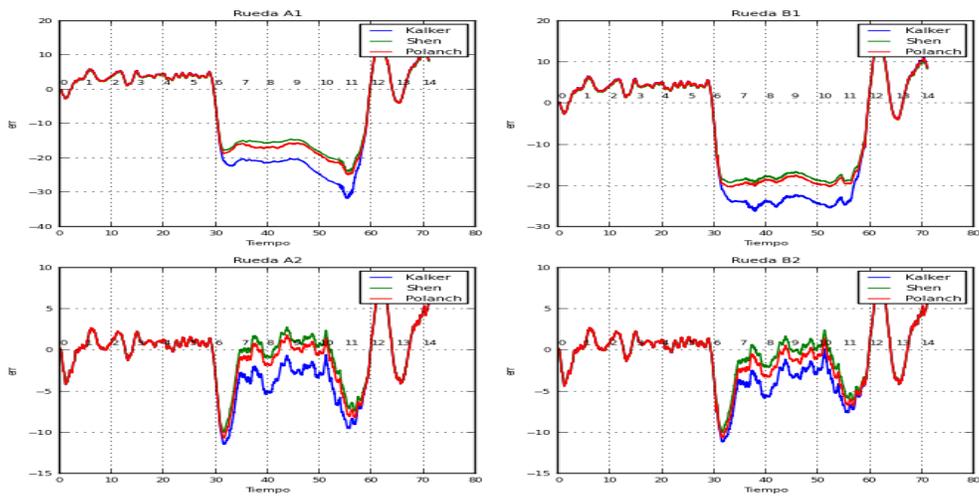
H.36) Tramo “Capitolio” a “Caño Amarillo”



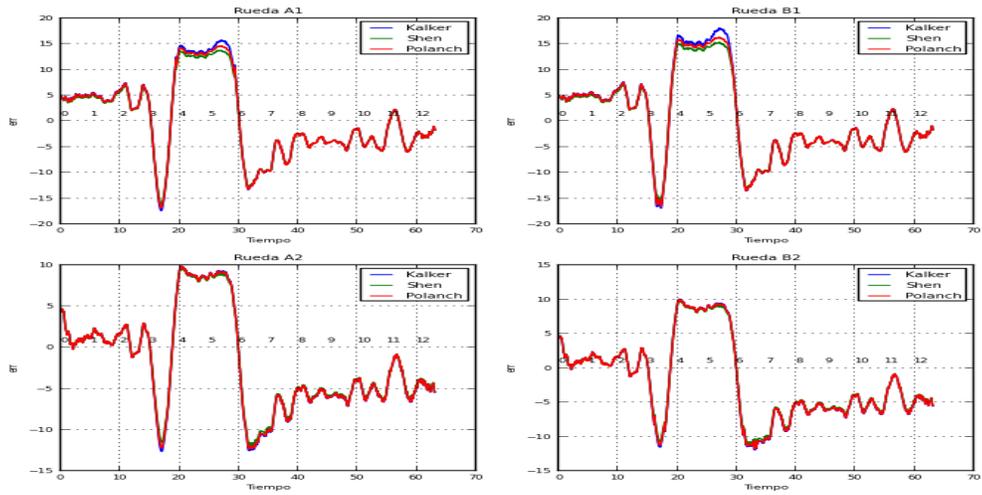
H.37) Tramo “Caño Amarillo” a “Agua Salud”



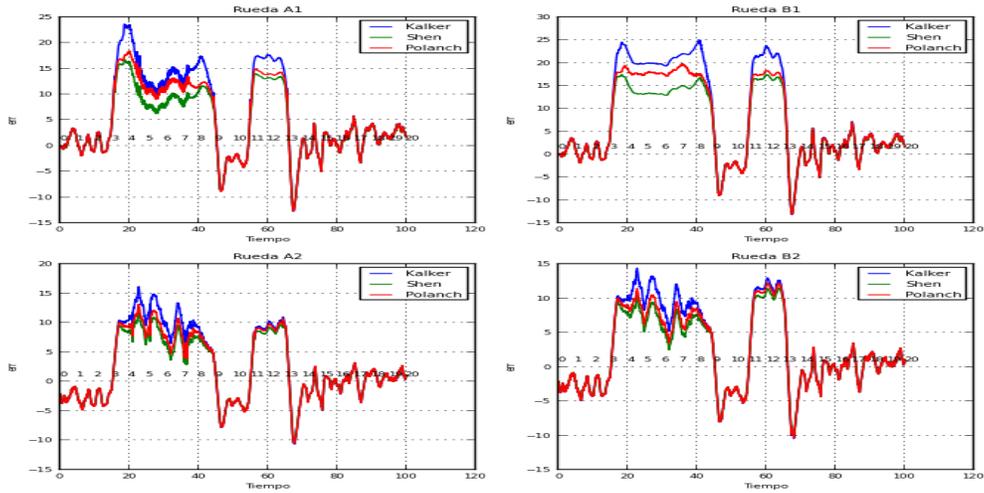
H.38) Tramo “Agua Salud” a “Gato Negro”



H.39) Tramo “Gato Negro” a “Plaza Sucre”



H.40) Tramo “Plaza Sucre” a “Perez Bonalde”



Apéndice I:
**Plano de los juegos de galgas extensiométricas adheridas
en la superficie de la rueda para la determinación de las
cargas en la rueda.**

