

# Efecto de la suspensión en el direccionamiento de un robot skid steer moviéndose sobre terrenos duros con diferente rugosidad

## Effect of Suspension on Steerability of a Skid Steer Robot Moving on Hard Terrains with Different Roughness

Jesús Marcey García<sup>1</sup>  
Aldemar Bohórquez<sup>2</sup>  
Alex Valero<sup>3</sup>

<sup>1,2,3</sup>Laboratorio de Prototipos, Universidad Nacional Experimental del Táchira, Avenida Universidad, sector Paramillo, San Cristóbal, Venezuela. Email: <sup>1</sup>jmgarcia@unet.edu.ve, <sup>2</sup>aldemar.bohorquez@unet.edu.ve, <sup>3</sup>alex.valero@unet.edu.ve

 OPEN ACCESS



**Copyright:**© 2020 Ingenierías USBMed. La revista *Ingenierías USBmed* proporciona acceso abierto a todos sus contenidos bajo los términos de la licencia creative commons Atribución- no comercial- SinDerivar 4.0 Internacional (CC BY-NC-ND 4.0)

**Tipo de Artículo:** Investigación científica y tecnológica.  
**Recibido:** 25-10-2019.  
**Revisado:** 17-01-2020.  
**Aprobado:** 05-03-2020.  
**Doi:** 10.21500/20275846.4380

**Referenciar así:** J. M. García, A. Bohórquez and A. Valero. “Efecto de la Suspensión en el Direccionamiento de un Robot Skid Steer Moviéndose sobre Terrenos Duros con Diferente Rugosidad,” *Ingenierías USBMed*, vol. 11, no. 1 pp. 18-30, 2020.

**Declaración de disponibilidad de datos:** Todos los datos relevantes están dentro del artículo, así como los archivos de soporte de información.

**Conflicto de intereses:** los autores han declarado que no existen conflicto de intereses.

**Editores:** Andrés Felipe Hernández. Universidad de San Buenaventura, Medellín, Colombia.

**Resumen.** Los robots móviles terrestres han sido desarrollados para realizar múltiples tareas donde es necesario tener un buen direccionamiento. Si estos robots están dotados con sistemas de suspensión, deben ser analizados exhaustivamente puesto que la suspensión puede incidir en la capacidad para seguir caminos cuando el robot se desplaza sobre terrenos altamente rugosos. En este trabajo se muestra un estudio correlacional donde se estima el efecto de cada parámetro del sistema de suspensión de un robot móvil Skid Steer (Lázaro) sobre el direccionamiento del robot cuando este se mueve sobre superficies horizontales duras con rugosidad variable. Utilizando herramientas de simulación y cuantificando algunos parámetros normalizados para estudiar el deslizamiento del robot, se consigue determinar las magnitudes apropiadas de cada parámetro de suspensión para disminuir el error en el direccionamiento de este robot móvil, y a su vez, estimar la magnitud de estos parámetros de suspensión en otros casos de manera general.

**Palabras Clave.** Suspensión pasiva, robot skid steer, estabilidad al vuelco, direccionamiento de vehículo, dimulación por computador.

**Abstract.** Land mobile robots have been developed to perform multiple tasks where it is necessary to have a good steerability. If these robots are equipped with suspension systems, they must be thoroughly analyzed since the suspension can affect the ability to follow paths when the robot travels over highly rough terrain. In this work, a correlational study is shown where the effect of each parameter of the suspension system of a Skid Steer mobile robot (Lázaro) on robot steerability when it moves on hard horizontal surfaces with variable roughness is estimated. Using simulation tools and quantifying some standardized parameters to study the robot's sliding, it is possible to determine the appropriate magnitudes of each suspension parameter to reduce the error in steerability of this mobile robot, and in turn, estimate the magnitude of these suspension parameters in other cases in general.

**Keywords.** Passive suspension, skid steer robot, Tip-over stability, vehicle steerability, computer simulation.

## I. Introducción

Los robots móviles terrestres han captado la atención de muchos investigadores y amantes de la tecnología desde hace un tiempo. Con la llegada de varios Rovers al planeta Marte [1] la sociedad ha tomado interés en estos robots, catalogándolos como una herramienta ideal para realizar tareas que pueden ser difíciles o imposibles para los humanos. Así, los robots móviles se utilizan en búsqueda y rescate en espacios tóxicos o inaccesibles para el hombre [2], remoción de minas [3], labores de agricultura [4], remoción de escombros [5], exploración de terrenos con difícil acceso y vigilancia [6], exploración planetaria [7], entre otras.

Al ejecutar estas tareas, los robots deben desplazarse sobre terrenos que por naturaleza pueden ser irregulares, como entornos naturales que poseen inclinaciones, partículas y elementos sueltos, obstáculos, irregularidades y rugosidad variada. De manera que el robot se expone a riesgos tales como: vuelco [8], deslizamiento hacia abajo cuando se desplace sobre superficies inclinadas [9] o la imposibilidad de seguir una trayectoria especificada [10]. Por tanto, es necesario desarrollar robots y técnicas de control apropiadas para que puedan cumplir sus tareas frente a entornos retadores, más aún cuando es imposible la presencia de los seres humanos para recuperarlos.

Por este motivo, muchos investigadores han trabajado en el desarrollo de nuevos robots, generando alternativas que incluyen: robots con orugas [11] y múltiples cuerpos [12], robots con patas [13], robots híbridos contruidos con varios sistemas de locomoción (por ejemplo: patas y ruedas) [14], robots con mecanismos (como el Rocker-bogie [15]) que le permite amoldarse al terreno sin la adición de actuadores y robots con diferentes sistemas de suspensión [16]. Al respecto, es posible encontrar robots con suspensión pasiva [17], donde los sistemas que la conforman (resorte-amortiguador) no reciben energía desde el exterior. También, robots con suspensión activa [18], donde se incorporan actuadores para adicionar energía al sistema. Finalmente, algunos poseen suspensión semiactiva [19], que se produce cuando el coeficiente de amortiguamiento en los amortiguadores es modificado por algún medio externo.

Otros investigadores han enfocado sus esfuerzos en el desarrollo de sistemas de control para el mejoramiento de la navegabilidad de los robots móviles terrestres: caracterización del terreno en tiempo real para estimar posteriormente el posible deslizamiento [20], control de la posición del centro de gravedad del robot para mejorar la distribución de cargas [21], lo cual produce una mejora en su capacidad de tracción y en la estabilidad al vuelco, control de la velocidad y aceleración para evitar vuelcos [22] y control de la suspensión activa para mejorar la distribución de cargas con el suelo, el confort en el robot y a su vez mejorar la capacidad de tracción [23].

En el caso de la suspensión pasiva, aunque no puede someterse a sistemas de control, debe estudiarse, ya que se ha demostrado que la rigidez de la suspensión tiene efectos sobre la estabilidad al vuelco y el deslizamiento longitudinal y transversal [24], lo cual afecta la capacidad del robot para seguir trayectorias. Por ello, este trabajo tiene como propósito observar qué efecto produce la modificación de los parámetros del sistema de suspensión pasiva de un robot de ruedas sobre la capacidad de dicho robot para direccionarse a través de una trayectoria dada [25] cuando se desplaza sobre terrenos duros (sin partículas sueltas) con diferentes rugosidades. Este tipo de terreno puede ser encontrado en ambientes desarrollados por el hombre, tales como suelos de concreto con diferentes acabados superficiales.

Para ello se utilizará como caso de estudio al robot Lázaro (Figura 1) [26], el cual es un robot de ruedas Skid Steer con un peso de 255.1 N. Los robots Skid Steer poseen un sistema de locomoción con dos grados de libertad al igual que los robots diferenciales, pero se diferencian de estos últimos puesto que en cada lado del robot existen múltiples puntos de contacto con el suelo (todos traccionados a una misma velocidad) que generan una superficie de contacto extendida, mejorando la robustez mecánica y la estabilidad del robot a expensas de un mayor deslizamiento y pérdidas de energía debido a la fricción [27]. En el caso específico del robot Lázaro, este posee un sistema de suspensión pasiva en cada rueda, compuesto por una dupla resorte-amortiguador y un eslabón de aluminio acoplado al chasis a través de una articulación rotacional (Figura 2). Esto permite a la rueda (acoplada en el otro extremo del eslabón) pivotar angularmente para amoldarse a pequeñas irregularidades del terreno. Además, posee un brazo articulado con una rueda como efector final, diseñado especialmente para propiciar un punto adicional de contacto con el suelo, pudiendo ser utilizado para mejorar su estabilidad al vuelco y para superar obstáculos.

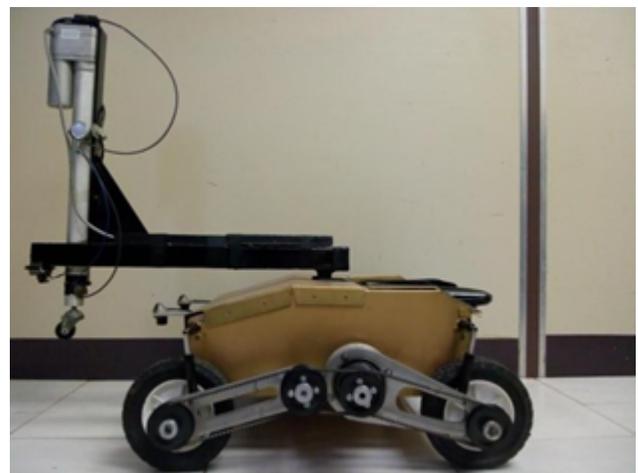
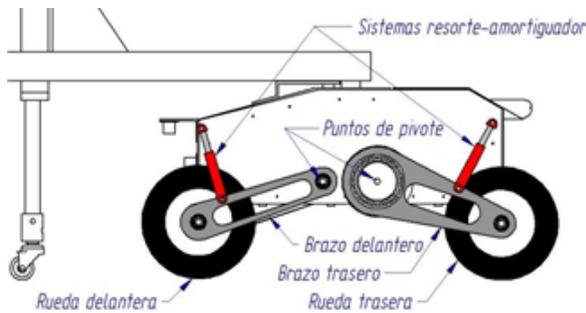


Figura 1. Robot Lázaro

Para el desarrollo del trabajo se utilizó un modelo CAD de Lázaro desarrollado en el software Solid Edge y luego exportado al software MSC. Adams donde se hicieron distintas simulaciones, modificando la rugosidad del terreno y los parámetros del sistema de suspensión pasiva del robot. A partir de estos resultados se hizo el análisis referente al efecto de la suspensión en el direccionamiento y la exactitud en la descripción de trayectorias por parte del robot.

Aunque abundan los estudios relacionados con la suspensión en robots móviles, este trabajo permite de manera novedosa cuantificar el efecto de cada parámetro del sistema de suspensión sobre la exactitud del direccionamiento para describir una trayectoria cuando la rugosidad del terreno cambie. Adicionalmente, permite al lector formarse un criterio adecuado respecto a la selección apropiada de los parámetros de suspensión de un robot móvil que le permita disminuir en lo posible los errores en la descripción de trayectorias ajenos al sistema de control y relacionados con la dinámica de la suspensión y la terramecánica del contacto rueda-suelo.



**Figura 2.** Sistema de suspensión del robot Lázaro

El artículo está organizado de la siguiente manera: en la sección II se aborda la fundamentación teórica necesaria para el desarrollo y entendimiento de la investigación. En la sección III se describe la metodología seguida para la ejecución de la investigación. Posteriormente, en las secciones IV y V se describen los resultados y se discuten los hallazgos encontrados. Finalmente, las últimas dos secciones sintetizan las conclusiones del trabajo y se mencionan las propuestas para continuar con el desarrollo de esta investigación.

## II. Fundamentación teórica

La capacidad de un robot para direccionarse describiendo una trayectoria se ve influenciada por múltiples factores ya estudiados, entre ellos: la distribución de las fuerzas de reacción o de contacto del móvil con el suelo, el deslizamiento que pueda existir entre las ruedas del robot y el suelo y las características del terreno (rugosidad). A continuación, se definirán los dos últimos factores, los cuales intervienen en el desarrollo de este trabajo.

### A. Deslizamiento longitudinal y transversal

El deslizamiento es un problema constante que enfrentan los robots durante su desplazamiento. Este comportamiento causa pérdida de tracción en las ruedas a lo largo de la superficie, además, un deslizamiento excesivo puede ocasionar el hundimiento de las ruedas del robot móvil en el terreno, lo cual tiene como consecuencia que las ruedas queden atrapadas sobre el suelo [28]. Al respecto, Dugoff planteó un modelo que relaciona el coeficiente de fricción longitudinal con la razón de deslizamiento puramente longitudinal ( $S$ ) [29]. Esta razón es definida por [30] de acuerdo a:

$$S = 1 - \frac{v_x}{r\omega} \quad (1)$$

Donde  $v_x$  es la velocidad de desplazamiento real a lo largo del eje longitudinal,  $r$  el radio de la rueda y  $\omega$  la velocidad angular de la rueda. Esta razón de deslizamiento permite estimar cuánto desliza una rueda sobre el suelo. Si  $S = 0$  no existe deslizamiento, pero si  $S = 1$  la rueda no posee avance (desliza totalmente aun cuando toca el suelo).

De igual forma, Bekker desarrolló modelos que relacionan el coeficiente de fricción lateral con el ángulo de deslizamiento lateral ( $\beta$ ) [29]. Este ángulo, fue definido en [30] a través de:

$$\beta = \tan^{-1} \left( \frac{v_y}{v_x} \right) \quad (2)$$

Donde  $v_y$  denota la velocidad lateral del vehículo a lo largo del eje y el ángulo de deslizamiento lateral ( $\beta$ ) permite estimar qué tanto se desplaza el robot lateralmente producto de un deslizamiento, aun cuando su velocidad de avance sea netamente longitudinal.

### B. Rugosidad superficial del terreno

Es una característica relacionada con la irregularidad o accidentalidad del terreno. Las discontinuidades en el suelo generan diversos comportamientos en los robots móviles, como diminutas vibraciones mecánicas transmitidas a las ruedas, las cuales pueden causar posteriormente el vuelco. También condicionan el rendimiento de la conducción, el direccionamiento y los sistemas de frenado que están directamente relacionados con las fuerzas máximas tangenciales generadas durante el desplazamiento [31].

Normalmente, las superficies están compuestas por diferentes tipos de imperfecciones e irregularidades, pero en muchos casos una superficie rugosa produce un perfil que se divide en dos formas de irregularidades (Figura 3): la primera forma es la ondulación, que es el conjunto de irregularidades repetidas en ondas de paso mucho mayor que su amplitud; la otra forma es el perfil de rugosidad, que constituye el relieve o textura primaria de la superficie formada por surcos o marcas

que comprenden picos y valles, además contiene imperfecciones micro geométricas. Este perfil de rugosidad se encuentra superpuesto al perfil de ondulación [32].



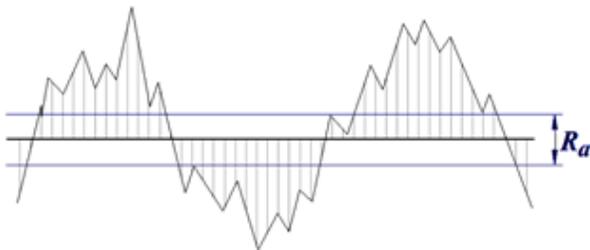
**Figura 3.** Perfil primario de rugosidad superficial

Para la medición cuantitativa de la rugosidad presente en una superficie real se deben medir los desvíos de este perfil en relación a uno que modele una superficie ideal, que es aquella que no presenta imperfecciones. Para ello, se utiliza el sistema denominado Mo de la Línea Media, donde dicha línea (que sería la de referencia) se localiza en la parte media del perfil de rugosidad de modo que la suma de las áreas por encima de ella sea exactamente igual a la suma de las áreas que están por debajo (excluyendo el perfil de ondulación) [33].

A partir de esta línea y considerando todas las desviaciones del perfil real de la superficie respecto al perfil ideal, se define la rugosidad aritmética ( $R$ ), la cual se toma como la media aritmética de los valores absolutos de las ordenadas de los puntos del perfil de rugosidad en relación a la línea media dentro de la longitud de medición, estando el eje de las abscisas sobre la línea media de referencia (Figura 4):

$$R_a = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_i| \quad (3)$$

Donde  $y_i$  representa las ordenadas del perfil estudiado y  $n$  es el número de ordenadas consideradas.



**Figura 4.** Definición del perfil de rugosidad superficial ( $R$ )

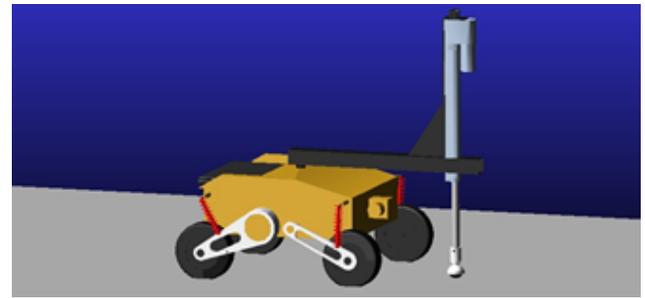
### III. Metodología

Este trabajo corresponde a una investigación correlacional donde se estudió el efecto producido por la variación de los parámetros de la suspensión del robot Lázaro sobre

el direccionamiento y la descripción exacta de trayectorias en suelos horizontales duros con diferentes rugosidades superficiales. Específicamente, los parámetros del sistema de suspensión considerados son: las constantes de rigidez ( $K_s$ ) y amortiguamiento ( $C_s$ ) del sistema de suspensión y las constantes de rigidez ( $K_c$ ) y amortiguamiento ( $C_c$ ) del contacto rueda-terreno.

Por otra parte, el efecto sobre la capacidad de direccionamiento para describir trayectorias se cuantificó en primer lugar a través de la razón de deslizamiento longitudinal ( $S$ ) y el ángulo de deslizamiento lateral ( $\beta$ ), luego en la variación de la posición final del robot después de desplazarse sobre una trayectoria predefinida cuando son modificados los parámetros de la suspensión.

Las pruebas se hicieron a través de simulación con un modelo computacional del robot Lázaro desarrollado en el software Solid Edge y luego exportado al entorno de simulación dinámica MSC Adams (Figura 5). Adicionalmente, fue necesario modelar las superficies de prueba con diferentes rugosidades. Este último aspecto se explica a continuación.



**Figura 5.** Modelo virtual de Lázaro en el software MSC Adams

#### A. Modelado de las superficies de prueba

Para modelar estas superficies se utilizó el software Solid Edge. El perfil de la rugosidad utilizado se creó mediante la función seno puesto que esta asemeja un perfil de picos y valles distribuidos de forma periódica a lo largo de una longitud de manera tal que la suma de las áreas por encima de la línea media es exactamente igual a la suma de las áreas que están por debajo de dicha línea. Entonces, comparando la función seno con un perfil de rugosidad, siendo este último estudiado a través el método de la Línea Media, se observa que la línea base de la función es la misma línea media del perfil, además la amplitud de la función representa el parámetro  $R_a$  del perfil a estudiar. Por lo tanto, para la creación del perfil de rugosidad solo interesan las características de amplitud y período de la función seno, razón por la cual se utilizó una función sinusoidal adaptada a este estudio:

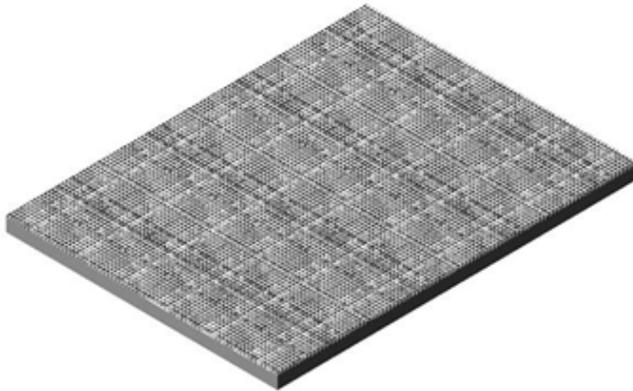
$$y = R_a \sin\left(\frac{\pi}{P}x\right) \quad (4)$$

donde  $R_a$  representa la rugosidad del perfil (amplitud),  $P$  el ancho de un pico o valle,  $x$  corresponde a las abscisas y  $y$  corresponde a las ordenadas del perfil generado, el cual será uniforme a lo largo de toda la superficie puesto que todos los picos (Figura 6), al igual que los valles, estarán a la misma amplitud respecto a la línea media.



**Figura 6.** Perfil de rugosidad superficial generado al usar la función sinusoidal

Si un perfil de misma rugosidad se extruye de igual manera en las direcciones longitudinal y transversal de la superficie sobre la cual se desplazará el robot, se obtiene la superficie de prueba para este trabajo (Figura 7). Bajo esta última premisa se modelaron superficies de 3000 mm de ancho por 4000 mm de largo con una rugosidad ( $R_a$ ) de 20 mm, 25 mm y 30 mm, las cuales poseen un ancho de pico y valle ( $P$ ) de igual magnitud, respectivamente.



**Figura 7.** Superficie de prueba modelada en Solid Edge

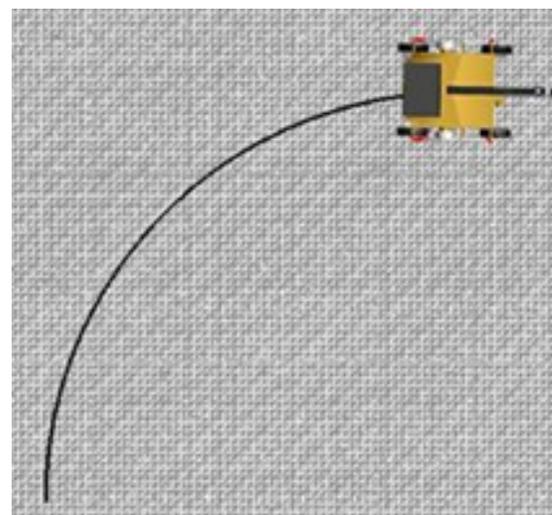
### B. Estructuración de las pruebas simuladas

Para conocer el efecto de los parámetros de la suspensión sobre el direccionamiento, la razón de deslizamiento longitudinal y el ángulo de deslizamiento lateral, se llevaron a cabo 68 simulaciones en el entorno del software Adams, en donde se variaron los cuatro parámetros del sistema de suspensión: las constantes de rigidez ( $K_s$ ) y amortiguamiento ( $C_s$ ) del sistema de suspensión y las constantes de rigidez ( $K_c$ ) y amortiguamiento ( $C_c$ ) del contacto rueda-terreno de acuerdo a las magnitudes especificadas en la Tabla 1. Cada variación de estos parámetros se realizó para las tres superficies de distinta rugosidad creadas (20 mm, 25 mm o 30 mm), así como también para una superficie lisa o sin rugosidad, con lo que se obtiene el total de 68 simulaciones.

**Tabla 1.** Magnitudes utilizadas en los parámetros de suspensión

Nº	$K_s$ (N/mm)	$C_s$ (N/mm·s)	$K_c$ (N/mm)	$C_c$ (N/mm·s)
1	5			
2	10			
3	19	0.53419	3017.15	30.17
4	39.07			
5	55			
6		0.1		
7		0.3	3017.15	30.17
8	39.07	2		
9		20		
10			500	
11			1000	
12	39.07	0.53419	6000	30.17
13			10000	
14				5
15				10
16	39.07	0.53419	3017.15	60
17				100

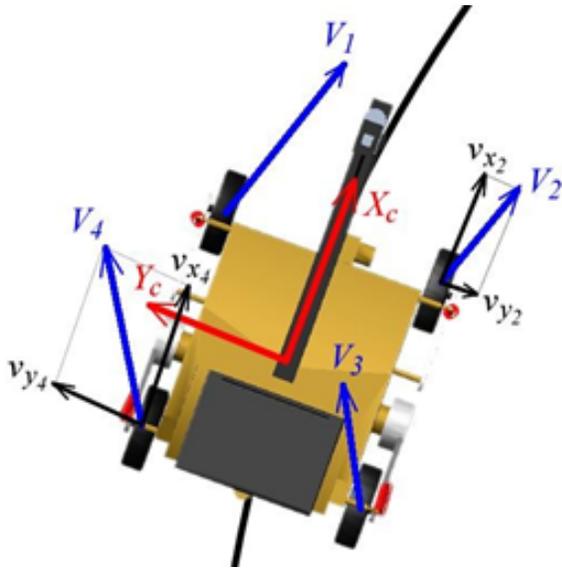
La trayectoria seleccionada para la ejecución de las simulaciones fue un arco con radio de 2200 mm (Figura 8). Para llevar a cabo dicha trayectoria las ruedas externas (respecto a la curva descrita) deben girar más rápido que las internas, razón por la cual se asignó para las primeras (ruedas del lado izquierdo) una velocidad angular de 2.335 rad/s mientras que para las internas fue de 1.6 rad/s. Es importante mencionar que a estas velocidades el robot aún se puede estudiar a través de un modelo cuasi estático puesto que la velocidad tangencial resultante es baja (menor a 1 m/s) [20].



**Figura 8.** Trayectoria elegida para las simulaciones

En el caso del cálculo de los parámetros deslizamientos ( $\beta$  y  $S$ ) se tabuló en cada simulación el valor medio para cada rueda. Es necesario destacar que los

ángulos de deslizamiento laterales ( $\beta$ ) en las ruedas delanteras (1 y 2) tienen signo opuesto al de las traseras (3 y 4) para la trayectoria curva que se escogió, debido a la dirección que adquiere la componente lateral  $v_y$  en la velocidad tangencial de cada rueda de acuerdo a un sistema de referencia adjunto al vehículo  $X_c Y_c Z_c$ . Específicamente,  $v_y$  tiene dirección opuesta entre las ruedas delanteras (1 y 2) y traseras (3 y 4), por tanto,  $\beta$  tendrá diferente signo entre dichas ruedas (Figura 9).



**Figura 9.** Dirección de las velocidades en las ruedas para la trayectoria elegida

#### IV. Resultados

Para la realización de las pruebas experimentales se fijó la rugosidad y se varió uno de los parámetros del sistema de suspensión, mientras que los otros parámetros permanecían con una magnitud fija (Tabla 1). Este procedimiento se repitió para los demás parámetros de la suspensión en cada una de las rugosidades seleccionadas. Para estudiar el efecto de cada parámetro se diseñó una tabla de resultados que muestra: a) el parámetro del sistema de suspensión evaluado ( $K_s, C_s, K_c, C_c$ ), b) la rugosidad ( $R_a$ ) de la superficie sobre la cual se desplazó el robot, c) la variación de la posición final en dirección  $X$  ( $\Delta P_x$ ) y dirección  $Y$  ( $\Delta P_y$ ) de cada curva respecto a una de referencia (trayectoria idealizada considerando un suelo sin rugosidad y un robot sin suspensión, con lo que se propicia la menor cantidad de vibraciones y sobresaltos durante la conducción) y d) la razón de deslizamiento longitudinal ( $S$ ) y el ángulo de deslizamiento lateral ( $\beta$ ) que ocurrió en cada una de las cuatro ruedas ( $R_n$ ). Cabe destacar que si el resultado de  $\Delta P_x$  y  $\Delta P_y$  es negativo, indica que la posición final del robot se encuentra a la izquierda y por debajo de la curva de referencia, respectivamente.

#### A. Efecto sobre la trayectoria al variar la constante de rigidez en los resortes del sistema ( $K_s$ )

Al variar la constante de rigidez del sistema de suspensión ( $K_s$ ) se consigue que a medida que esta aumenta (los resortes se hacen más rígidos) las variaciones de posición  $\Delta P_x$  y  $\Delta P_y$  disminuyen (Tabla 2), lo cual implica una desviación menor en la trayectoria (Figura 10). Específicamente, cuando la rugosidad es 0 mm o 25 mm, el resorte con  $K_s$  igual a 55 N/mm produce la menor desviación de trayectorias. Para las otras rugosidades estudiadas, la menor desviación se produce para  $K_s = 39.07$  N/mm. Caso contrario ocurre cuando se observa que la trayectoria descrita por el robot para un  $K_s$  de 5 N/mm es la que más se desvía de la curva de referencia (para todos los casos de rugosidad). A partir de estos resultados se puede inferir que el uso de  $K_s$  muy baja va a incidir en la descripción exacta de las trayectorias. En el caso del robot Lázaro se encontró que es apropiado un  $K_s$  de magnitud mediana o alta (superior a 39.07 N/mm).

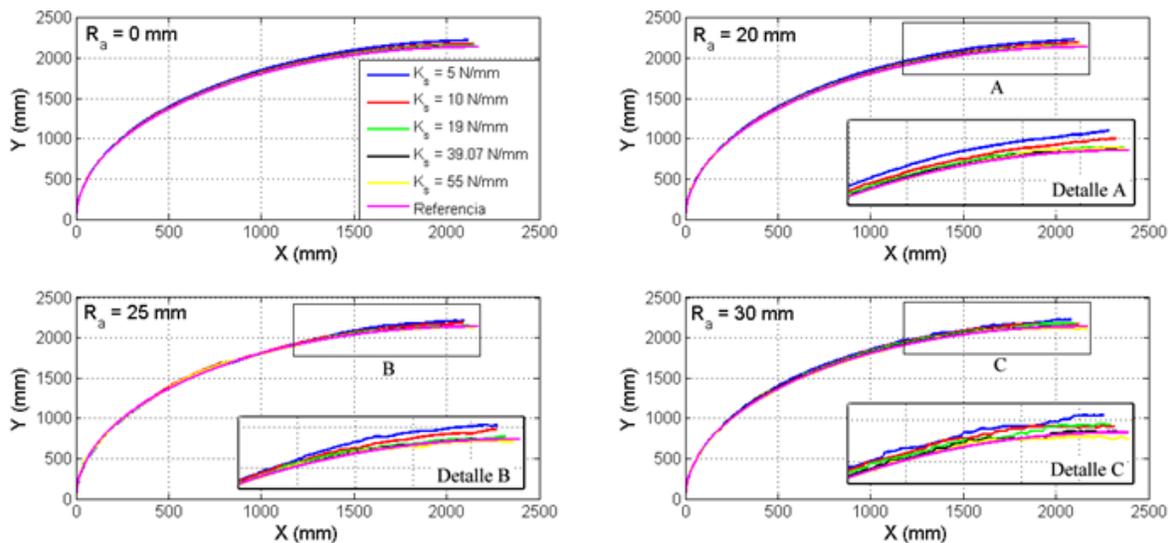
Adicionalmente se debe destacar que, cuando la superficie posee una rugosidad baja ( $R_a \leq 20$  mm), el robot dibuja una curva sin irregularidades (ver Detalle A de la Figura 10). Caso contrario sucede cuando la rugosidad es mayor ( $R_a$  de 25 mm y 30 mm), aquí la trayectoria comienza a sufrir irregularidades en su recorrido (ver Detalles B y C de la Figura 5), los cuales se hacen más perceptibles mientras  $K_s$  sea más pequeña, lo cual es indicativo de las vibraciones y “saltos” dados por el robot como consecuencia de una excesiva elasticidad en los resortes de la suspensión.

En el caso de los deslizamientos ( $S$  y  $\beta$ ) sus magnitudes son muy pequeñas, cercanas a cero (ver Tabla 2). A pesar de ello, se puede notar que siempre que se fija la rugosidad y se aumenta  $K_s$ , el deslizamiento longitudinal ( $S$ ) en las ruedas 1 y 4 disminuye; esta disminución hace que la variación de posición ( $\Delta P_x$  y  $\Delta P_y$ ) sea cada vez menor. Cabe destacar que esta relación es inversa para las ruedas 2 y 3 ( $S$  aumenta cuando  $K_s$  aumenta), pero en este caso el incremento de  $S$  es menor, lo cual garantiza que, a nivel general, el deslizamiento longitudinal sea más pequeño en la medida en que los resortes sean más rígidos ( $K_s$  mayor), lo cual redundaría en una menor desviación de la trayectoria. Por otra parte, se observa que el deslizamiento lateral ( $\beta$ ) se ve poco influenciado por  $K_s$  ( $\beta$  es casi constante sin importar el valor de  $K_s$ ). Cabe resaltar que  $\beta$  siempre es mayor en las ruedas 2 y 3, lo cual es lógico, puesto que por la trayectoria que debe describir el robot, estas ruedas tienen que deslizar más en dirección lateral por ser las ruedas interiores en el giro implementado (ver Figura 9).

**Tabla 2.** Resultados obtenidos al variar la constante de rigidez del resorte ( $K_s$ )

$K_s$ (N/mm)	$R_a$ (mm)	$\Delta P_x$ (mm)	$\Delta P_y$ (mm)	$S$				$\beta$			
				$R_1$	$R_2$	$R_3$	$R_4$	$R_1$	$R_2$	$R_3$	$R_4$
5	0	-51.663	83.319	0.080	0.089	0.086	0.081	-0.086	-0.106	0.104	0.084
10		-20.920	40.349	0.071	0.094	0.094	0.071	-0.085	-0.105	0.104	0.084
19		-22.831	18.574	0.068	0.094	0.094	0.069	-0.084	-0.104	0.104	0.084
39.07		-1.333	5.195	0.068	0.094	0.094	0.067	-0.084	-0.104	0.104	0.084
55		-0.967	1.550	0.068	0.094	0.093	0.067	-0.084	-0.104	0.104	0.084
5	20	-72.591	94.347	0.082	0.090	0.087	0.086	-0.084	-0.103	0.103	0.084
10		-46.482	56.423	0.073	0.094	0.094	0.075	-0.083	-0.102	0.103	0.084
19		-18.275	12.271	0.071	0.091	0.090	0.072	-0.085	-0.106	0.104	0.083
39.07		-14.185	6.038	0.071	0.092	0.091	0.071	-0.085	-0.106	0.102	0.082
55		-15.418	9.029	0.070	0.092	0.092	0.071	-0.084	-0.105	0.103	0.083
5	25	-77.069	69.406	0.085	0.080	0.076	0.090	-0.074	-0.103	0.091	0.083
10		-80.076	48.289	0.067	0.087	0.072	0.082	-0.076	-0.106	0.087	0.080
19		-49.650	17.236	0.064	0.087	0.071	0.079	-0.074	-0.103	0.091	0.082
39.07		-37.811	3.771	0.063	0.088	0.072	0.078	-0.073	-0.102	0.091	0.083
55		-23.30	-13.607	0.063	0.087	0.071	0.077	-0.074	-0.103	0.091	0.083
5	30	-85.652	82.110	0.086	0.081	0.077	0.091	-0.085	-0.105	0.106	0.085
10		-48.389	32.368	0.077	0.085	0.084	0.080	-0.086	-0.107	0.103	0.083
19		-61.944	41.067	0.076	0.086	0.088	0.079	-0.084	-0.105	0.103	0.082
39.07		-25.865	-1.689	0.074	0.086	0.088	0.077	-0.085	-0.106	0.104	0.083
55		0.744	-32.101	0.072	0.085	0.087	0.075	-0.083	-0.104	0.108	0.086

Para todas las simulaciones:  $C_s = 0.53416$  N/mm,  $K_c = 3017.15$  N/mm y  $C_c = 30.17$  N/mm·s



**Figura 10.** Trayectorias obtenidas cuando se varía  $K_s$  considerando varias rugosidades

**B. Efecto sobre la trayectoria al variar la constante de amortiguamiento en los amortiguadores ( $C_s$ )**

Cuando se varió la constante de amortiguamiento del sistema de suspensión ( $C_s$ ) se observó que al no existir rugosidad ( $R_a = 0$  mm) las magnitudes de  $\Delta P_x$  y  $\Delta P_y$  son mínimas y se mantienen casi constantes (Tabla 3), indicando que el efecto de  $C_s$  es menor en este caso. Para las demás rugosidades (20, 25 y 30 mm) cuando la suspensión tiene un  $C_s$  alto (más amortiguado), las

trayectorias se alejan más de la referencia, acentuándose para las rugosidades más altas (Figura 11). Además, la trayectoria descrita por el robot cuando  $C_s = 20$  N/mm es la que más se desvía de la curva de referencia para todas las rugosidades estudiadas. Estos resultados permiten considerar que es preferible utilizar  $C_s$  con magnitudes bajas (amortiguamiento bajo) cuando el robot transite sobre superficies de cualquier rugosidad, y más aún cuando esta sea alta.

De igual manera, al analizar los índices de deslizamiento ( $S$  y  $\beta$ ) se encontró que la variación de  $C_s$  casi no produce efecto en estos cuando la rugosidad es baja ( $R_a \geq 20$ ), ya que  $S$  y  $\beta$  permanecen casi constantes (Tabla 3). Para rugosidades mayores se percibe en el caso del deslizamiento longitudinal ( $S$ ) un incremento en las ruedas 1 y 4 en la medida que aumenta  $C_s$ , haciendo que el robot se desvíe más de la trayectoria de referencia. Aunque este efecto es contrario para las ruedas 2 y 3 ( $S$  disminuye cuando  $C_s$  aumenta), la variación de  $S$  es menor para estas ruedas comparados con el caso de las ruedas 1 y 4. De manera que, a nivel general se puede afirmar que una magnitud grande de  $C_s$  favorece un mayor deslizamiento longitudinal.

En el caso del deslizamiento lateral ( $\beta$ ) se evidencia que este sigue siendo mayor en las ruedas 2 y 3 debido a que, por ser las ruedas interiores para la curva a seguir, estas deben deslizar más en esa dirección. Por otra parte, se vislumbra que este índice no se ve afectado mayormente por la variación de  $C_s$  para cualquier rugosidad. Por tanto, se puede afirmar que el efecto de la variación de  $C_s$  sobre la trayectoria depende principalmente del deslizamiento longitudinal para altas rugosidades.

### C. Efecto sobre la trayectoria al variar la constante de rigidez en las ruedas ( $K_c$ )

Al variar la constante de rigidez del contacto rueda-suelo ( $K_c$ ) se observa que cuando no existe rugosidad ( $R_a=0$  mm) los cambios en  $K_c$  no producen efectos sobre la descripción de las trayectorias. Esto se evidencia al visualizar que  $\Delta P_x$  y  $\Delta P_y$  son mínimos y casi constantes, asimismo sucede con  $S$  y  $\beta$  en este caso (Tabla 4). Para las demás rugosidades se puede observar que las desviaciones en las trayectorias son mayores en la medida en que se incrementa  $K_c$ , acentuándose más para las rugosidades altas (Figura 12). Así es el caso de la trayectoria descrita por el robot cuando  $K_c=10000$  N/mm, la cual se desvía bastante de la trayectoria de referencia y se aleja aun más en la medida en que la rugosidad aumenta. Por otra parte, se observó que cuando  $R_a \geq 25$  mm la trayectoria descrita por el robot presenta irregularidades (al igual que la descritas en los Detalles B y C de la Figura 10) debido a vibraciones y saltos dados por el robot sobre un suelo muy rugoso (aunque en este caso, las irregularidades son menores a las observadas en la Figura 10). En conclusión, se recomienda utilizar  $K_c$  con baja magnitud (rigidez baja) para cualquier caso, aunque es altamente recomendable en el caso de elevada rugosidad.

Adicionalmente, al estudiar el efecto de  $K_c$  en el índice de deslizamiento longitudinal ( $S$ ) se observa un efecto contrario al descrito previamente: a mayor  $K_c$  se genera un menor  $S$  principalmente cuando  $R_a=20$  mm y 30 mm; lo cual pareciera contradecir los resultados previos, ya que debería existir mayor deslizamiento en la medida en que  $K_c$  se incrementa. Pero se vislum-

bra que, en estos casos, el deslizamiento lateral ( $\beta$ ) es mayor en la medida en que aumenta  $K_s$ ; por tanto, este fenómeno parece ser predominante, lo que permite finalmente una mayor desviación en la trayectoria cuando  $K_s$  se incrementa.

### D. Efecto sobre la trayectoria al variar la constante de amortiguamiento en las ruedas ( $C_c$ )

Finalmente, cuando se varió la constante de amortiguamiento del contacto rueda-suelo ( $C_c$ ), también se encontró que al no existir rugosidad ( $R_a=0$  mm) el efecto asociado al cambio de  $C_c$  es insignificante, ya que la desviación en la trayectoria (respecto a la referencia) medida a partir de  $\Delta P_x$  y  $\Delta P_y$  es mínima y constante (Tabla 5). Este efecto se ve respaldado por los índices de deslizamiento  $S$  y  $\beta$ , los cuales no cambian sin importar la magnitud de  $C_c$  cuando  $R_a=0$  mm.

Ahora, para el resto de rugosidades no se presenta una tendencia clara respecto a cuál  $C_c$  produce la menor desviación de la trayectoria. Así, cuando  $R_a=20$  mm y 30 mm parece apropiada una  $C_c$  de magnitud media ( $C_c=60$  N/mm. s), pero cuando  $R_a=25$  mm, parece apropiada una  $C_c$  de magnitud baja ( $C_c=5$  N/mm. s).

Estos resultados fueron corroborados a través de los índices de deslizamiento  $S$  y  $\beta$  que tampoco presentan una tendencia clara que permita apuntar a un  $C_c$  apropiado para todos los casos. Por ejemplo: cuando  $R_a=20$  mm los menores índices de deslizamiento longitudinal  $S$  se producen para  $C_c=100$  N/mm s considerado alto (en las ruedas 2 y 3), mientras que para las otras ruedas (ruedas 1 y 4) los menores  $S$  se producen cuando  $C_c=10$  N/mm s considerado bajo. Esta misma situación se presenta en todos los casos de rugosidad estudiados, lo cual impide definir cabalmente una magnitud apropiada de  $C_c$ . En cualquiera de las situaciones reportadas se sugiere no sobrepasar una constante de amortiguamiento de media magnitud ( $C_c \leq 60$  N/mm. s para Lázaro), la cual genera las menores desviaciones en la trayectoria.

## V. Discusión de resultados

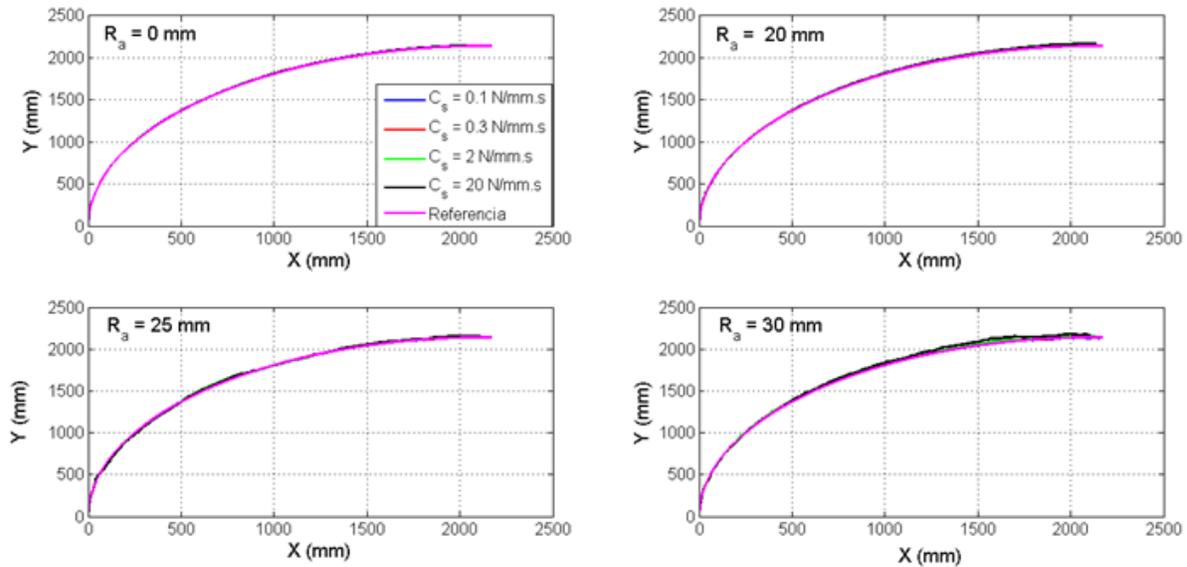
De manera general, se establece que la variación de los parámetros de suspensión y de la rugosidad generan un efecto menor en la exactitud de las trayectorias descritas del robot, puesto que las variaciones de la posición final de todas las trayectorias trazadas por el robot son menores al 4.3% en una curva de 2200 mm de radio (desviación máxima de la trayectoria: 94,347 mm). Sin embargo, de manera específica se recomienda utilizar los siguientes parámetros de suspensión, con el fin de reducir el error en la descripción de trayectorias:

- a) Una suspensión rígida, o lo que es lo mismo, una  $K_s$  de magnitud mediana a alta. En el caso del robot Lázaro es apropiada  $K_s=55$  N/mm para rugosidades bajas (entre 0 mm y 25 mm) puesto que con esa magnitud se producen desviaciones

**Tabla 3.** Resultados obtenidos al variar la constante de amortiguamiento en el sistema de suspensión ( $C_s$ )

$C_s$ (N/mm)	$R_a$ (mm)	$\Delta P_x$ (mm)	$\Delta P_y$ (mm)	$S$				$\beta$			
				$R_1$	$R_2$	$R_3$	$R_4$	$R_1$	$R_2$	$R_3$	$R_4$
0.1	0	-1.533	5.333	0.068	0.094	0.094	0.067	-0.084	-0.104	0.104	0.084
0.3		-1.443	5.244	0.068	0.094	0.094	0.067	-0.084	-0.104	0.104	0.084
2		-1.185	5.109	0.068	0.094	0.094	0.067	-0.084	-0.105	0.104	0.084
20		-1.714	8.010	0.068	0.094	0.094	0.067	-0.084	-0.104	0.104	0.084
0.1	20	-11.554	3.277	0.070	0.092	0.091	0.071	-0.085	-0.106	0.103	0.083
0.3		-13.826	5.437	0.070	0.091	0.091	0.071	-0.085	-0.106	0.103	0.083
2		-13.946	5.080	0.070	0.091	0.091	0.071	-0.085	-0.106	0.104	0.083
20		-34.312	28.099	0.071	0.091	0.091	0.072	-0.084	-0.104	0.103	0.083
0.1	25	-36.695	1.234	0.061	0.089	0.071	0.078	-0.072	-0.102	0.0906	0.083
0.3		-38.558	4.251	0.063	0.089	0.072	0.078	-0.074	-0.102	0.091	0.083
2		-44.831	10.310	0.064	0.088	0.072	0.078	-0.074	-0.102	0.091	0.082
20		-59.021	14.343	0.070	0.084	0.071	0.081	-0.074	-0.101	0.093	0.082
0.1	30	-13.225	-15.412	0.073	0.086	0.089	0.076	-0.085	-0.106	0.105	0.084
0.3		-21.319	-6.614	0.074	0.085	0.088	0.077	-0.085	-0.106	0.104	0.084
2		-39.745	12.280	0.076	0.086	0.088	0.077	-0.085	-0.106	0.103	0.082
20		-67.093	29.420	0.081	0.082	0.083	0.081	-0.086	-0.108	0.100	0.079

Para todas las simulaciones:  $K_s = 39.97 \text{ N/mm} \cdot \text{s}$ ,  $K_c = 3017.15 \text{ N/mm}$  y  $C_c = 30.17 \text{ N/mm} \cdot \text{s}$



**Figura 11.** Trayectorias obtenidas cuando se varía  $C_s$  considerando varias rugosidades

menores a 0.1% en la posición final de la trayectoria descrita por el robot. Por su parte, para rugosidades mayores al rango mencionado anteriormente se recomienda una  $K_s = 39.07 \text{ N/mm}$  (magnitud media), pues así se asegura que la trayectoria tenga desviaciones menores a 1.7%.

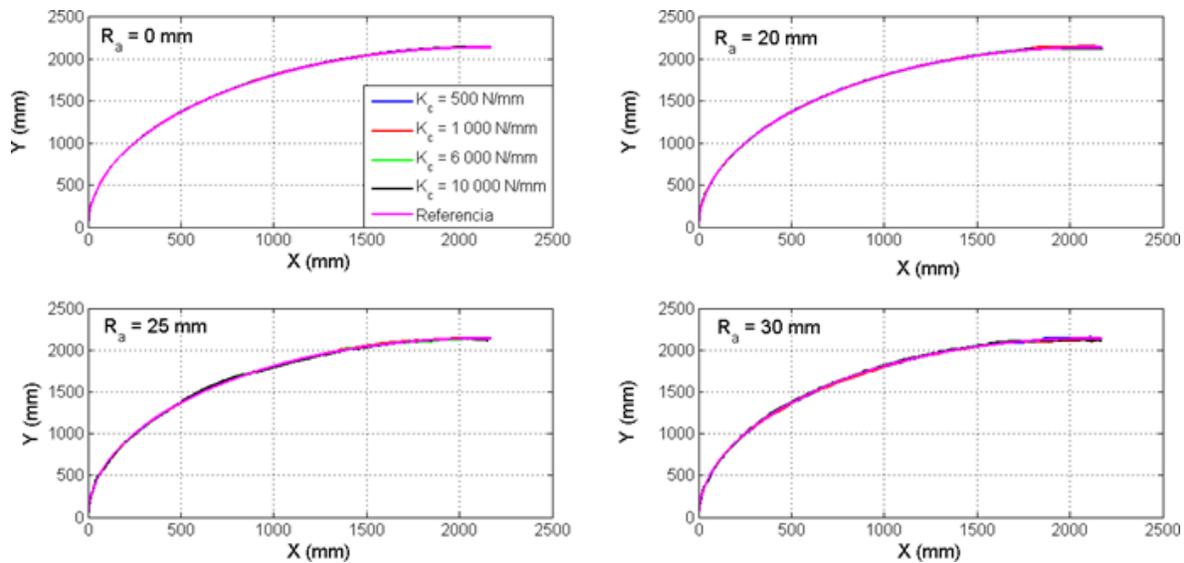
b) Una suspensión de bajo amortiguamiento, es decir, utilizar una  $C_s$  con una magnitud baja. En el caso de Lázaro, esta debe ser preferiblemente menor a  $0.3 \text{ N/mm} \cdot \text{s}$  para cualquier rugosidad. Esto asegura que el robot tenga desviaciones menores a 1.8% en la posición final de la trayectoria exigida.

- c) Un contacto rueda-suelo con baja rigidez utilizando  $K_c$  de magnitud baja. En el caso de Lázaro, se prefiere que sea  $K_c \leq 1000 \text{ N/mm}$ , esto permitirá que el robot se desvíe menos de un 2% en la posición final de la trayectoria exigida.
- d) Un contacto rueda-suelo con un amortiguamiento intermedio. Para el caso de Lázaro se recomienda que  $C_c \leq 60 \text{ N/mm} \cdot \text{s}$  con lo que se asegura que el robot tenga desviaciones menores a 1.9% en la posición final de la trayectoria estudiada.

**Tabla 4.** Resultados obtenidos al variar la constante de rigidez de las ruedas ( $K_c$ )

$K_c$ (N/mm)	$R_a$ (mm)	$\Delta P_x$ (mm)	$\Delta P_y$ (mm)	$S$				$\beta$			
				$R_1$	$R_2$	$R_3$	$R_4$	$R_1$	$R_2$	$R_3$	$R_4$
500	0	-1.533	6.115	0.068	0.093	0.093	0.068	-0.084	-0.104	0.104	0.084
1000		-1.443	5.682	0.067	0.094	0.093	0.068	-0.084	-0.104	0.104	0.084
6000		-1.185	4.735	0.067	0.094	0.094	0.067	-0.084	-0.104	0.104	0.084
10000		-1.714	4.329	0.067	0.094	0.093	0.067	-0.084	-0.104	0.104	0.084
500	20	-11.554	6.710	0.084	0.106	0.103	0.083	0.071	-0.088	0.087	0.072
1000		-13.826	8.135	0.071	0.090	0.090	0.072	-0.085	-0.106	0.104	0.083
6000		-13.946	-2.206	0.070	0.092	0.091	0.071	-0.085	-0.106	0.104	0.083
10000		-34.312	-13.421	0.068	0.091	0.091	0.070	-0.085	-0.106	0.105	0.084
500	25	-36.695	-18.342	0.066	0.085	0.070	0.079	-0.075	-0.103	0.093	0.083
1000		-38.558	8.315	0.066	0.087	0.073	0.078	-0.075	-0.102	0.093	0.082
6000		-44.831	-20.956	0.063	0.087	0.073	0.077	-0.076	-0.104	0.092	0.083
10000		-59.021	-25.077	0.073	0.086	0.084	0.076	-0.085	-0.107	0.104	0.083
500	30	-13.225	6.339	0.077	0.083	0.086	0.080	-0.082	-0.102	0.108	0.086
1000		-21.319	-32.012	0.074	0.083	0.086	0.076	-0.083	-0.104	0.110	0.088
6000		-39.745	-29.637	0.073	0.085	0.087	0.075	-0.085	-0.106	0.106	0.085
10000		-67.093	-31.836	0.072	0.086	0.087	0.075	-0.084	-0.106	0.106	0.085

Para todas las simulaciones:  $K_s=39.07$  N/mm,  $C_s=0.53416$  N/mm·s y  $C_c=30.17$  N/mm·s


**Figura 12.** Trayectorias obtenidas cuando se varía  $K_c$  considerando varias rugosidades

## VI. Conclusiones

En este trabajo se realizaron variaciones en los parámetros del sistema de suspensión cuando el robot se desplaza sobre terrenos irregulares duros con diferente rugosidad, con el fin de determinar el efecto de la suspensión en el direccionamiento del robot y su capacidad para describir trayectorias. Se encontró de manera general que la variación de los parámetros del sistema de suspensión y de la rugosidad genera un efecto menor en el direccionamiento del robot cuando este se mueve a bajas velocidades, puesto que las desviaciones de las curvas respecto a las de referencia fueron aproximadamente menores al 4%. Sin embargo, para reducir dicho error se recomendó usar una suspensión con una rigidez

intermedia y con bajo amortiguamiento. Con respecto al contacto de la rueda con el suelo, se recomienda utilizar ruedas con baja rigidez y amortiguamiento mediano, lo cual permitirá mejorar la exactitud de las trayectorias al disminuir el deslizamiento que se puede incrementar producto de la rugosidad del terreno.

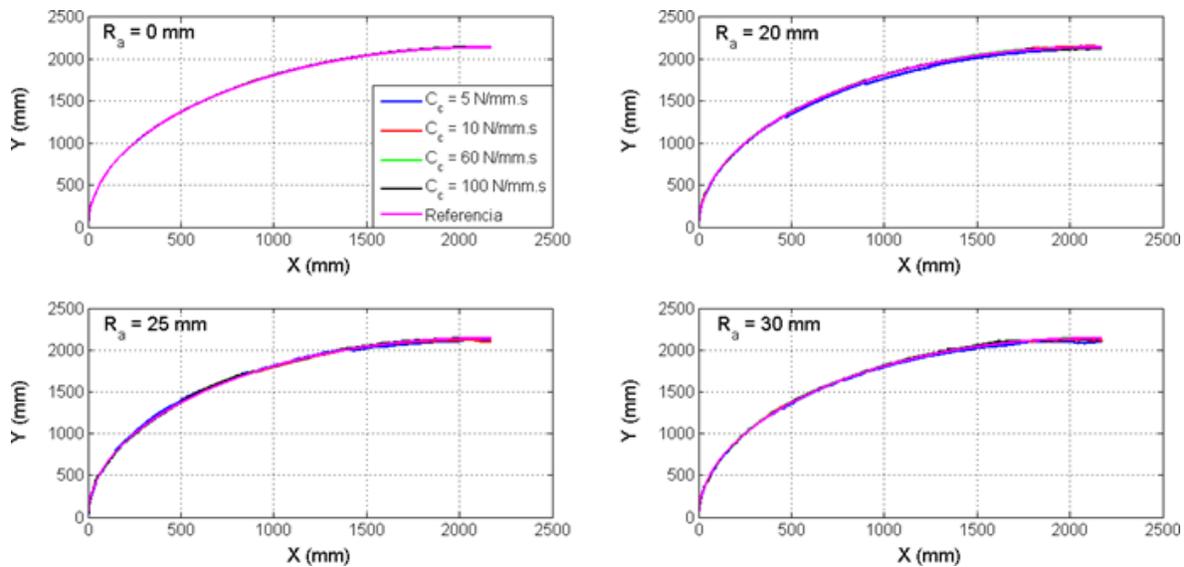
## VII. Trabajos futuros

Existen dos grandes áreas que deben tomarse en consideración para extender el alcance de este trabajo y lograr un mejor entendimiento del efecto de la suspensión en el direccionamiento: en primer lugar es necesario abordar el problema mientras el robot se desplaza con velocidades mayores que propicien la incidencia de fac-

**Tabla 5.** Resultados obtenidos al variar la constante de amortiguamiento en el sistema de suspensión ( $C_c$ )

$C_c$ (N/mm)	$R_a$ (mm)	$\Delta P_x$ (mm)	$\Delta P_y$ (mm)	$S$				$\beta$			
				$R_1$	$R_2$	$R_3$	$R_4$	$R_1$	$R_2$	$R_3$	$R_4$
5	0	-0.098	3.816	0.067	0.094	0.094	0.067	-0.084	-0.104	0.104	0.084
10		-0.687	4.441	0.067	0.094	0.094	0.067	-0.084	-0.104	0.104	0.084
60		-1.442	5.291	0.068	0.094	0.093	0.068	-0.084	-0.104	0.104	0.084
100		-1.174	5.149	0.068	0.094	0.094	0.068	-0.084	-0.104	0.104	0.084
5	20	-28.052	-10.098	0.070	0.091	0.090	0.070	-0.084	-0.098	0.110	0.086
10		-13.859	8.443	0.069	0.093	0.095	0.070	-0.084	-0.103	0.104	0.083
60		-8.794	-0.656	0.070	0.091	0.091	0.071	-0.085	-0.106	0.104	0.083
100		2.177	-15.572	0.070	0.089	0.089	0.071	-0.086	-0.107	0.104	0.083
5	25	-8.709	-13.954	0.070	0.089	0.090	0.071	-0.087	-0.109	0.101	0.080
10		1.919	-40.959	0.071	0.084	0.083	0.073	-0.086	-0.108	0.106	0.084
60		-41.765	7.729	0.074	0.084	0.084	0.077	-0.084	-0.105	0.105	0.084
100		-42.533	8.585	0.075	0.086	0.085	0.078	-0.083	-0.103	0.105	0.084
5	30	2.033	-41.992	0.069	0.089	0.089	0.068	-0.084	-0.104	0.109	0.086
10		5.263	-34.018	0.072	0.085	0.088	0.076	-0.084	-0.105	0.106	0.085
60		-19.299	-10.394	0.074	0.084	0.087	0.076	-0.086	-0.107	0.105	0.084
100		-13.021	-18.272	0.074	0.084	0.087	0.076	-0.085	-0.107	0.106	0.085

Para todas las simulaciones:  $K_s=39.07$  N/mm,  $C_s=0.53416$  N/mm-s y  $K_c=3017.15$  N/mm


**Figura 13.** Trayectorias obtenidas cuando se varía  $C_c$  considerando varias rugosidades

tores dinámicos e inerciales que puedan influir en la suspensión y el deslizamiento del robot sobre el terreno.

Adicionalmente, trabajos futuros deben enfocarse en estudiar la suspensión cuando el robot se desplaza sobre terrenos naturales con partículas sueltas, las cuales son más comunes en las aplicaciones cotidianas de los robots móviles que trabajan en exteriores.

## VIII. Agradecimientos

Este trabajo ha sido realizado, parcialmente, gracias al apoyo del Decanato de Investigación de la Universidad Nacional Experimental del Táchira bajo los proyectos 01-025-2016 y 01-008-2018.

## Referencias

- [1] R. Lindemann, D. Bickler, B. Harrington, G. Ortiz, and C. Voorhees, "Mars exploration rover mobility development," *IEEE Robot. & Auto. Magaz.*, vol. 13, no. 2, pp. 19–26, 2006.
- [2] J. Casper and R. Murphy, "Human – robot interactions during the robot- assisted urban search and rescue response at the world trade center," *IEEE Trans. Sys., Man Cybe.*, vol. 33, no. 3, pp. 367–385, 2003.
- [3] M. Guarnieri, R. Kurazume, H. Masuda, T. Inoh, K. Takita, P. Debenest, R. Hodoshima, E. Fukushima, and S. Hirose, "Helios system: A

- team of tracked robots for special urban search and rescue operations,” in *2009 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, St. Louis, pp. 2795–2800, IEEE, 2009.
- [4] Q. Feng, X. Wang, W. Zheng, Q. Qiu, and K. Jiang, “New strawberry harvesting robot for elevated-trough culture,” *Inter. Jour. Agric. Bio. Engine.*, vol. 5, no. 2, pp. 1–8, 2012.
- [5] F. Matsuno and S. Tadokoro, “Rescue robots and systems in japan,” in *2004 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics*, Shenyang, pp. 12–20, IEEE, 2004.
- [6] S. A. A. Moosavian, H. Semsarilar, and A. Kalantari, “Design and manufacturing of a mobile rescue robot,” in *2006 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, Beijing, pp. 3982–3987, IEEE, 2006.
- [7] F. Cordes, A. Babu, and F. Kirchner, “Static force distribution and orientation control for a rover with an actively articulated suspension system,” in *2017 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, Vancouver, pp. 5219–5224, IEEE, 2017.
- [8] J. M. García, I. Medina, A. G. Cerezo, and A. Linares, “Improving the static stability of a mobile manipulator using its end effector in contact with the ground,” *IEEE Lat. Ame. Transact.*, vol. 13, no. 10, pp. 3228–3234, 2015.
- [9] J. M. García, J. L. Martínez, A. Mandow, and A. García-Cerezo, “Slide-down prevention for wheeled mobile robots on slopes,” in *Proceedings of the 3rd International Conference on Mechatronics and Robotics Engineering*, París, pp. 63–68, 2017.
- [10] J. M. García, J. L. Martínez, A. Mandow, and A. García-Cerezo, “Steerability analysis on slopes of a mobile robot with a ground contact arm,” in *2015 23rd Mediterranean Conference on Control and Automation (MED)*, Spain, pp. 267–272, IEEE, 2015.
- [11] S.-I. Nishida and S. Wakabayashi, “A mobility system for lunar rough terrain,” in *2009 ICCAS-SICE*, Fukuoka, pp. 4716–4721, IEEE, 2009.
- [12] J. Suthakorn, S. S. H. Shah, S. Jantarajit, W. Onprasert, W. Saensupo, S. Saeung, S. Nakdham-abhorn, V. Sa-Ing, and S. Reaungamornrat, “On the design and development of a rough terrain robot for rescue missions,” in *2008 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics*, Bangkok, pp. 1830–1835, IEEE, 2009.
- [13] D. Pongas, M. Mistry, and S. Schaal, “A robust quadruped walking gait for traversing rough terrain,” in *Proceedings 2007 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Roma, pp. 1474–1479, IEEE, 2007.
- [14] F. Cordes, F. Kirchner, and A. Babu, “Design and field testing of a rover with an actively articulated suspension system in a mars analogue terrain,” *Jour. Field Robo.*, vol. 35, no. 7, pp. 1149–1181, 2018.
- [15] Z. Luo, J. Shang, G. Wei, and L. Ren, “Module-based structure design of wheeled mobile robot,” *Mech. Sci.*, vol. 9, no. 1, pp. 103–121, 2018.
- [16] L. Yang, B. Cai, R. Zhang, K. Li, and R. Wang, “A new type design of lunar rover suspension structure and its neural network control system,” *Jour. Inte. Fuzzy Syst.*, vol. 35, no. 1, pp. 269–281, 2018.
- [17] J. Hurel, A. Mandow, and A. García-Cerezo, “Los sistemas de suspensión activa y semiactiva: una revisión,” *Rev. ibero. auto. inform.*, vol. 10, no. 2, pp. 121–132, 2013.
- [18] W. Reid, F. J. Pérez-Grau, A. H. Göktoğan, and S. Sukkarieh, “Actively articulated suspension for a wheel-on-leg rover operating on a martian analog surface,” in *2016 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, Stockholm, pp. 5596–5602, IEEE, 2016.
- [19] J. Funde, K. Wani, N. Dhote, and S. Patil, “Performance analysis of semi-active suspension system based on suspension working space and dynamic tire deflection,” in *Innovative Design, Analysis and Development Practices in Aerospace and Automotive Engineering (I-DAD 2018)*, Singapore, pp. 1–15, Springer, 2019.
- [20] G. Reina and R. Galati, “Slip-based terrain estimation with a skid-steer vehicle,” *Vehi. Syst. Dyn.*, vol. 54, no. 10, pp. 1384–1404, 2016.
- [21] S. Nakamura, M. Faragalli, N. Mizukami, I. Nakatani, Y. Kunii, and T. Kubota, “Wheeled robot with movable center of mass for traversing over rough terrain,” in *2007 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, San Diego, pp. 1228–1233, IEEE, 2007.
- [22] S. Chen, X. Li, J. Zhou, W. Wu, S. Yuan, and S. Liu, “Modelling the vertical dynamics of unmanned ground vehicle with rocker suspension,” in *2017 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation (ICMA)*, Akamatsu, pp. 370–375, IEEE, 2017.
- [23] A. Bouton, C. Grand, and F. Benamar, “Motion control of a compliant wheel-leg robot for rough terrain crossing,” in *2016 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, Stockholm, pp. 2846–2851, IEEE, 2016.
- [24] S. A. A. Moosavian, K. Alipour, and Y. Bahramzadeh, “Dynamics modeling and tip-over stability of suspended wheeled mobile robots with multiple arms,” in *2007 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, San Diego, pp. 1210–1215, IEEE, 2007.

- [25] L. Solaque, M. Molina, and E. Rodríguez, “Seguimiento de trayectorias con un robot móvil de configuración diferencial,” *Ing. USBMed*, vol. 5, no. 1, pp. 26–34, 2014.
- [26] J. M. García, I. J. Medina, J. L. Martínez, and A. G. Cerezo, “Lázaro: robot móvil dotado de brazo para contacto con el suelo,” *Revista Iberoamericana de Automática e Informática industrial*, vol. 14, no. 2, pp. 174–183, 2017.
- [27] S. G. Zuccaro, S. L. Canfield, and T. W. Hill, “Slip prediction of skid-steer mobile robots in manufacturing environments,” in *ASME 2017 International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference*, Cleveland, pp. 1–8, American Society of Mechanical Engineers Digital Collection, 2017.
- [28] R. Fernández, R. Aracil, and M. Armada, “Traction control for wheeled mobile robots,” *Rev. Ibero. Auto. Infor. Indus.*, vol. 9, no. 4, pp. 393–435, 2012.
- [29] L. I. Gracia, “Modelado cinemático y control de robots móviles con ruedas.” PhD thesis, Universidad Politécnica de Valencia, 2006.
- [30] G. Ishigami, K. Nagatani, and K. Yoshida, “Slope traversal controls for planetary exploration rover on sandy terrain,” *Journal of Field Robotics*, vol. 26, no. 3, pp. 264–286, 2009.
- [31] M. Prado, A. Mata, A. Perez-Blanca, and F. Ezquerro, “Effects of terrain irregularities on wheeled mobile robot,” *Robotica*, vol. 21, no. 2, pp. 143–152, 2003.
- [32] S. Oliveira, “Analysis of surface roughness and models of mechanical contacts.” Tesis de pregrado, Università di Pisa, Pisa, 2005.
- [33] Mitotuyo, “Quick guide to surface roughness measurement.” Mitutoyo America Corporation, USA, Bulletin 2229, 2016.