

## Efecto de la suspensión en la estabilidad al vuelco y direccionamiento de robots moviéndose sobre discontinuidades de terreno

García, J. M.\*, Valero, A., Bohórquez, A.

*Universidad Nacional Experimental del Táchira, Laboratorio de Prototipos, Av. Universidad, sector Paramillo, San Cristóbal, Venezuela.*

**To cite this article:** García, J. M., Valero, A., Bohórquez, A. 2020. Suspension effect in tip-over stability and steerability of robots moving on terrain discontinuities. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial* 17, 202-214. <https://doi.org/10.4995/riai.2020.12308>

### Resumen

En este artículo se estudia el efecto que produce el sistema de suspensión sobre la estabilidad al vuelco y la capacidad de direccionamiento en un robot móvil *Skid Steer*, cuando este se enfrenta a distintas discontinuidades del terreno: descenso (frontal y lateral) y ascenso sobre escalones, además del desplazamiento sobre zanjas. Específicamente, se estudió el instante cuando se generan cargas de impacto producto del movimiento del robot sobre la irregularidad del terreno. En cada caso se hizo un análisis correlacional del efecto sobre la estabilidad al vuelco y el direccionamiento (cuantificadas con métricas fundamentadas en las fuerzas de reacción de las ruedas con el suelo), al variar cuatro parámetros que definen el sistema de suspensión: constante de rigidez en los resortes, constante de amortiguamiento en los amortiguadores y las constantes de rigidez y amortiguamiento en las ruedas. Por último se estimó para cada caso, qué magnitudes deberían adquirir estos parámetros para garantizar una mejor estabilidad y direccionamiento del robot.

**Palabras clave:** Suspensión pasiva, robot skid steer, estabilidad al vuelco, direccionamiento de vehículo, simulación por computador.

### Suspension effect in tip-over stability and steerability of robots moving on terrain discontinuities

#### Abstract

This article studies the effect produced by the suspension system in tip-over stability and steerability of a *Skid Steer* mobile robot, when it faces different terrain discontinuities: descent (front and side) and ascent on steps, plus displacement over ditches. Specifically, the moment was studied when impact loads produced by the robot's movement on the irregularity of the terrain are generated. In each case, a correlational analysis was made about the effect in tip-over stability and steerability (quantified with metrics based on the reaction forces of the wheels with the ground), by varying four parameters that define the suspension system: stiffness constant in the springs, damping constant in the dampers and the stiffness and damping constants in the wheels. Finally, it was estimated for each case, what magnitudes these parameters should acquire to ensure better stability and steerability of robot.

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

### 1. Introducción

Las aplicaciones de los robots móviles terrestres para exteriores se han ampliado grandemente en nuestros días. Actualmente, estos robots se desempeñan en tareas tan diversas como exploración de terrenos de difícil acceso, búsqueda y rescate, aplicaciones militares de vigilancia,

reconocimiento, búsqueda y desactivación de minas, labores de agricultura, extinción de incendios, manipulación y traslado de cargas, remoción de escombros y la aplicación actual más icónica: exploración planetaria (Suresh *et al.*, 2017).

Para lograr estos objetivos, los robots móviles terrestres emplean distintos mecanismos de locomoción, tales como: ruedas las cuales le permiten ser eficientes sobre terrenos

\*Autor para correspondencia: [jmgarcia@unet.edu.ve](mailto:jmgarcia@unet.edu.ve)

Attribution-NonCommercial-NoDerivatives 4.0 International (CC BY-NC-ND 4.0)

duros, pero la capacidad de tracción se pierde en terrenos irregulares y con obstáculos. Por otra parte, existen robots móviles con patas, las cuales les permiten sortear de mejor manera ciertos obstáculos, pero el diseño, implementación y control del robot es más difícil en este caso. Además, existen los robots con orugas, los cuales mejoran la capacidad de tracción en terrenos irregulares o con partículas sueltas, pero el consumo energético es mayor debido a la fricción presente (Kang *et al.*, 2005).

Estos tres mecanismos de locomoción básicos han permitido a los robots realizar muchos trabajos, pero ante las tareas cada vez más demandantes, las cuales incluyen navegación en terrenos más irregulares, han propiciado el desarrollo de nuevos mecanismos de locomoción y estrategias que le permitan al robot desplazarse de manera eficiente en estos entornos. Así, los robots híbridos hacen uso de dos o más mecanismos de locomoción a la vez, por ejemplo: uso de patas con ruedas (Bruzzone *et al.*, 2017); otros robots cambian su forma para amoldarse al terreno y poder avanzar (Li *et al.*, 2009). En otros casos, algunos manipuladores móviles han sido diseñados para usar su brazo en distintas estrategias, las cuales incluyen: movimientos compensatorios y contacto del brazo con el suelo (García *et al.*, 2015a); y finalmente, una de las soluciones más ampliamente aceptadas en la mayoría de robots consiste en el uso de un sistema de suspensión que ayuda al robot a mantener la estabilidad al vuelco, mejora el agarre del robot al equilibrar las fuerzas de reacción con el suelo, lo cual implica una mejora en el direccionamiento (Bluethmann *et al.*, 2010), y por último, mejora el confort en el robot al disminuir las vibraciones y aceleraciones que se producen al desplazarse sobre terrenos irregulares (Chen *et al.*, 2017).

La suspensión puede ser clasificada de acuerdo a tres grandes tipos: suspensión pasiva, que se produce si solo consiste en un sistema de resortes – amortiguadores que no reciben energía desde un medio externo (Hurel *et al.*, 2013). Suspensión activa si se adicionan actuadores que permitan introducir o disipar energía del sistema (Reid *et al.*, 2016); y por último, semiactiva si el coeficiente de amortiguamiento en los amortiguadores es modificado por algún medio externo (Funde *et al.*, 2019). Mención aparte merecen los *Rovers* (Ellery, 2016), que son vehículos destinados a la exploración planetaria que utilizan mecanismos poliarticulados como el llamado *Rocker-bogie* que pudieran estar combinados con sistemas de suspensión activa (Cordes *et al.*, 2018) o pasiva (Yang *et al.*, 2018).

El diseño de un sistema de suspensión incluye la elección adecuada de las dimensiones de cada componente del sistema (Zhang *et al.*, 2015) y las propiedades de los elementos de la suspensión (constante de rigidez del resorte y de amortiguamiento en el amortiguador), ya que, una elección adecuada garantiza la eficiencia del sistema (Goga & Kl'úcik, 2012). Así, algunos investigadores han planteado sistemas de control para la suspensión activa que optimizan la magnitud de estas constantes para mejorar el confort y la estabilidad (Deremetz *et al.*, 2017). Otros han estudiado el efecto de las constantes del sistema de suspensión en la estabilidad al vuelco en situaciones específicas tales como: máquinas pesadas ante manipulación de grandes cargas y movimientos da vaivén durante períodos de inestabilidad (Abo-Shanab &

Sepehri, 2005), desplazamiento sobre caminos con aceleraciones laterales debido a curvas (Cordos & Todorut, 2019), paso de vehículos sobre reductores de velocidad (Sert & Boyraz, 2017).

Ahora, un caso que no ha tenido mayor profusión está asociado en la selección de estas constantes cuando el robot debe sortear obstáculos que generen cargas de impacto: por ejemplo: descenso brusco de un escalón (Zhang *et al.*, 2019) y el paso sobre una zanja (Lei *et al.*, 2017). En estos casos, una magnitud inadecuada de estas constantes puede generar períodos de inestabilidad, vuelco o en el mejor de los casos, pérdida de la capacidad de direccionamiento durante el instante que dure el descenso. Por tanto, este trabajo tiene como objetivo estudiar el efecto de los parámetros del sistema de suspensión del robot frente a la estabilidad al vuelco y direccionamiento cuando el robot sobrepasa obstáculos que generan cargas de impacto las cuales deben ser absorbidas por el sistema de suspensión. Para ello, se utilizó como caso de estudio a Lázaro (Figura 1), un robot móvil *Skid Steer* (García *et al.*, 2017a; García *et al.*, 2018) que pesa 255.1 N y 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 pasiva. Esto permite a la rueda (acoplada en el otro extremo del eslabón) pivotar angularmente para amoldarse a pequeñas irregularidades del terreno (Figura 2). 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.

Dicho robot fue modelado y simulado en el software *MSC Adams*, mientras sobrepasa diversos obstáculos que incluyen:

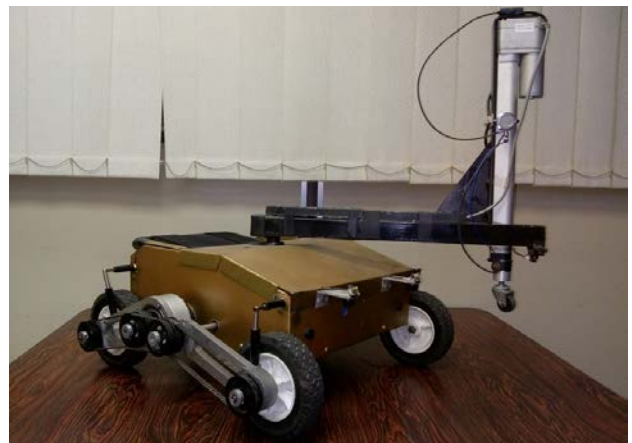


Figura 1. Robot Lázaro.

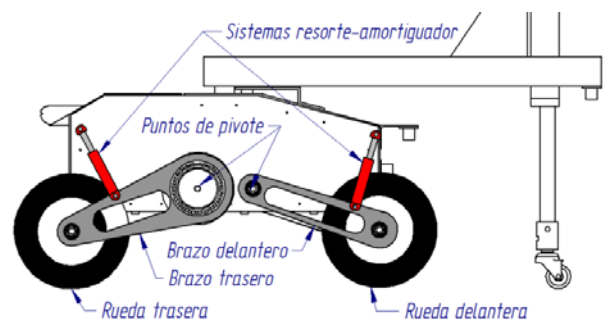


Figura 2. Sistema de suspensión pasiva del robot Lázaro.

ascenso y descenso de escalones y paso sobre zanjas. Para estos casos, se hizo un análisis correlacional al variar los parámetros de la suspensión del robot con el propósito de observar el efecto sobre la estabilidad al vuelco y la capacidad de direccionarse durante ese período crítico donde el sistema de suspensión actúa para absorber las cargas de impacto generadas cuando se producen choques ya sea con el suelo o paredes mientras sobrepasa el obstáculo.

## 2. Estabilidad al vuelco y direccionamiento

Existen variadas métricas diseñadas para estimar la estabilidad al vuelco y direccionamiento en robots móviles (Liu *et al.*, 2008). En este trabajo se utilizarán métricas fundamentadas en las fuerzas de reacción entre las ruedas del robot y el suelo. Para ello, se hace necesario obtener en primer lugar, dichas fuerzas normales de reacción en las cuatro ruedas ( $F_{1z}$ ,  $F_{2z}$ ,  $F_{3z}$  y  $F_{4z}$ ). Una vez obtenidas, se definen las sumas de reacciones en los ejes de vuelco ( $F_{ij} = F_{mz} + F_{nz}$ ), siendo estos ejes, las líneas imaginarias que unen los puntos de contacto con el suelo de dos ruedas consecutivas (ej.: Eje 1-4, ver Figura 3). Estas sumas de reacciones son utilizadas para el análisis de la estabilidad al vuelco y el direccionamiento. En (García *et al.*, 2015b) se describen dos índices normalizados con base en las fuerzas de reacción y adecuados para el caso del robot Lázaro, que permiten evaluar la propensión al vuelco y pérdida de direccionamiento. En el caso de estabilidad se define un índice normalizado  $I_t$  que toma los valores desde 1 para la máxima estabilidad hasta cero para considerar la condición de vuelco inminente (inestabilidad):

$$I_t = \frac{F_{min}}{|\vec{W}'|/2} \quad (1)$$

Donde  $F_{min} = \min(F_{ij})$  es la mínima suma de reacciones en los ejes de vuelco del robot y  $|\vec{W}'|$  corresponde al módulo del vector peso ubicado en el centro de gravedad del robot  $\vec{W}=(W_x, W_y, W_z)$  (Figura 3). También se debe acotar que, cuando el brazo toca el suelo generando cinco puntos de contacto y la fuerza de contacto del brazo con el suelo  $F_{5z}$  es muy grande, puede ocurrir que  $F_{5z} > F_{mn}$  siendo  $F_{mn}$  la fuerza en el eje de vuelco  $F_{ij}$  más cercano al punto de contacto del efector final con el suelo. En este caso se considera que hay una transición de cinco puntos de contacto a tres puntos de contacto (condición estable donde solo el brazo y dos ruedas tocan el suelo). De manera que para este caso, la fuerza  $F_{5z}$  sustituye a la fuerza  $F_{mn}$  en el cálculo de  $F_{min}$ .

Nótese que puede existir un caso de estabilidad adicional que ocurre cuando existen tres puntos de contacto con el suelo (dos ruedas del robot más el efector final del brazo) (García *et al.*, 2015b). Pero estos casos donde hay contacto del brazo con el suelo quedan fuera de este estudio puesto que el análisis hecho en este trabajo se hace cuando el robot toca el suelo solo con sus cuatro ruedas.

Por otra parte, para estimar el direccionamiento del robot *Skid Steer*, se tomó un índice normalizado que toma en consideración las características del sistema de locomoción de estos robots, ya que su direccionamiento depende del contacto de las ruedas con el suelo, de manera que si el

contacto de un lado lateral se pierde, no existe posibilidad de direccionamiento. A partir de esto se definió un índice de direccionamiento normalizado que toma valores de uno para una máxima capacidad de direccionamiento y cero para la pérdida total del mismo.

$$I_s = \frac{\min(F_{14}, F_{23})}{|\vec{W}'|/2} \quad (2)$$

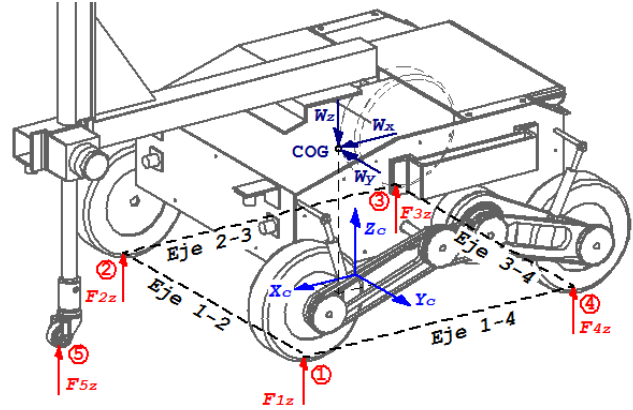


Figura 3. Esquema del robot Lázaro mostrando las fuerzas de reacción en las ruedas.

## 3. Resultados

En esta sección se estudiará el efecto de la suspensión del robot cuando este sobrepasa algunas irregularidades de terreno tales como: ascenso y descenso frontal sobre escalones, descenso parcial sobre escalones (descenso de las ruedas de un solo lado) y desplazamiento sobre zanjas. Para cada caso, se describirá el efecto sobre los índices de estabilidad y direccionamiento cuando se varían los siguientes parámetros de la suspensión: constante de rigidez en los resortes ( $K_s$ ), constante de amortiguamiento en los amortiguadores ( $C_s$ ) y las constantes de rigidez ( $K_c$ ) y amortiguamiento en las ruedas ( $C_c$ ), entendiendo que las ruedas también pueden considerarse parte del sistema de suspensión cuando no son rígidas (Mihon & Lontış, 2019). Para cada irregularidad de terreno, se variaron estos parámetros del sistema de suspensión de acuerdo a 17 combinaciones descritas en la Tabla 1. Cabe destacar que los parámetros de suspensión reales del robot Lázaro son:  $K_s = 39.07 \text{ N/mm}$ ,  $C_s = 0.53419 \text{ N/(mm.s)}$ ,  $K_c = 3017.15 \text{ N/mm}$  y  $C_c = 30.17 \text{ N/(mm.s)}$ . Por tanto se estimó el uso de otros parámetros alrededor de estos valores en un amplio margen para que se pudiese verificar de manera perceptible el efecto de la variación de cada parámetro.

En cada caso, se determinaron las fuerzas de reacción de cada rueda con el suelo para evaluar los índices de estabilidad y direccionamiento. Aunque en la literatura es posible encontrar modelos matemáticos que permiten estimar estas fuerzas en distintas fases o posiciones del robot cuando está sobrepasando algunos obstáculos comunes (García *et al.*, 2017b), no es factible determinar fácilmente las fuerzas de reacción durante los instantes cuando se producen cargas de impacto, por tanto, en este trabajo no se utilizaron modelos matemáticos para estos instantes; en su lugar, se simuló el robot en el software *MSC. Adams* mientras sobrepasaba el

obstáculo. Posteriormente se obtuvieron las fuerzas de reacción durante toda la simulación y finalmente, se estimaron los índices de estabilidad y direccionamiento haciendo énfasis principalmente en estos instantes donde se generan cargas de impacto que deben ser absorbidas por el sistema de suspensión. Posteriormente, al repetir estas simulaciones variando los parámetros de la suspensión fue posible hacer un estudio correlacional sobre el efecto de estos parámetros en la estabilidad al vuelco y direccionamiento. Estos resultados se describen a continuación.

Tabla 1. Combinaciones utilizadas en los parámetros de suspensión

$N^\circ$	$K_s$ [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		
8	39,07	2	3017,15	30,17
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

### 3.1. Descenso sobre escalones

En este estudio se consideró el descenso del robot desde escalones con diferentes alturas inferiores al radio de la rueda (75 mm), por lo tanto, las alturas de los peldaños usados corresponden a 70, 40 y 20 mm. En la Figura 4 se puede observar la secuencia seguida durante el descenso de un escalón, la cual fue dividida en cinco etapas identificables al observar en la Figura 5, las fuerzas de reacción de las ruedas con el suelo (fuerzas para un escalón de 70 mm y parámetros de suspensión de acuerdo a la combinación N° 4 de la Tabla 1): la primera etapa se sitúa desde el arranque del robot hasta aproximadamente 1 s de simulación cuando las ruedas delanteras llegan al borde del escalón para comenzar el descenso. En este rango se observan pequeñas oscilaciones en

las fuerzas de reacción alrededor de los 60 N, estas oscilaciones se deben al contacto entre la rueda y el suelo; cuando este contacto es rígido las oscilaciones suelen tener mayor amplitud, pero cuando las ruedas son más blandas, su amortiguamiento absorbe mejor el impacto en el contacto.

Posteriormente se inicia la segunda etapa en el recorrido entre los 1 y 1,4 segundos (Figura 5); ahora las fuerzas normales de las ruedas 1 y 2 (ruedas delanteras), disminuyen hasta cero porque en este instante están cayendo del escalón. En este proceso las ruedas delanteras acumulan energía cinética, de manera que cuando tocan la superficie inferior del terreno se produce una fuerte carga de impacto (lo cual eleva momentáneamente las reacciones de estas ruedas).

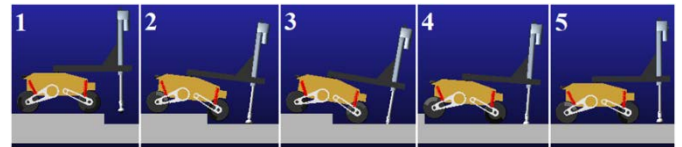


Figura 4. Etapas de desplazamiento del robot Lázaro durante un descenso de escalón.

Cabe destacar que luego del impacto existe un efecto de rebote hacia las ruedas traseras, por lo cual en un corto instante de tiempo, las magnitudes de sus fuerzas normales descienden hasta cero (se despegan momentáneamente del suelo) ocasionando del mismo modo cargas de impacto sobre estas ruedas, pero con magnitud inferior.

Consecutivamente, inicia una tercera etapa entre los 1,4 y 2,4 segundos, en la cual se nota una diferencia entre las magnitudes de las fuerzas en las ruedas traseras y delanteras que oscilan entre los 54 y 65 N respectivamente; esta diferencia se produce porque durante dicho periodo el vector peso se proyecta más cerca del eje que une las ruedas delanteras, esto debido a la inclinación presente en el robot (3era etapa, Figura 4) ya que las ruedas traseras están en la parte superior del escalón y las delanteras en la parte inferior.

Posteriormente, a partir de 2.4 s comienza una cuarta etapa (Figura 4) en donde las fuerzas normales de las ruedas traseras disminuyen hasta cero ya que estas caen del escalón. Al tocar el suelo, se vuelve a generar la carga de impacto y a su vez, las ruedas delanteras experimentan el mismo efecto de rebote (Figura 5) por lo cual descienden momentáneamente hasta cero (se despegan del suelo). Por último, se observa la 5ta etapa después de los 2,8 s donde todas las ruedas comienzan a estabilizarse hasta alcanzar el equilibrio en las fuerzas de reacción.

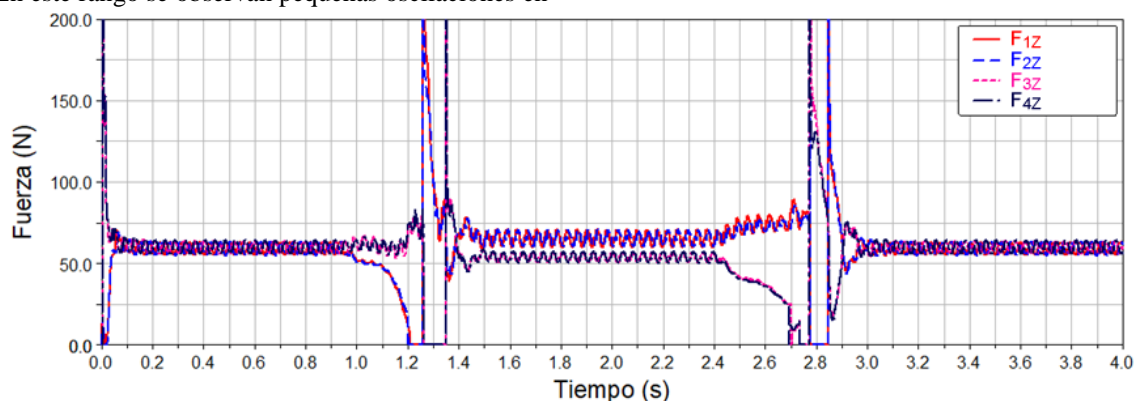


Figura 5. Fuerzas normales en las cuatro ruedas durante el descenso de un escalón de 70 mm de altura y resortes con  $K_s = 39.07$  N/mm .

En resumen, durante el descenso hay dos instantes donde se generan cargas de impacto. El análisis de estabilidad y direccionamiento se hizo sobre el segundo instante que constituye la quinta etapa especificada anteriormente debido a que en esta situación el robot ya ha superado el obstáculo y llega a una posición horizontal, lo cual permite observar con mayor detalle el desempeño del sistema de suspensión hasta la estabilización completa.

A continuación y con las fuerzas de reacción obtenidas a partir de las simulaciones, se calcularon los índices de estabilidad y direccionamiento de acuerdo con (1) y (2); estos índices se graficaron como función del tiempo para la 5ta etapa y en distintas situaciones donde se modificaron los parámetros  $K_s$ ,  $C_s$ ,  $K_c$  y  $C_c$ . La Figura 6 muestra el comportamiento del índice de estabilidad ( $I_t$ ) al modificar cada parámetro del sistema de suspensión durante la 5ta etapa del descenso de un escalón con altura de 70 mm.

Al respecto, se observa que durante un corto instante,  $I_t$  llega a 0, esto debido al despegue de todas las ruedas del suelo por efecto del impacto (período anterior a los 2.8 s), considerándose este un período de gran inestabilidad. A partir de ese punto, en  $I_t$  se inicia una respuesta oscilatoria con tiende a ser subamortiguada (Figura 6) que se estabiliza en un

valor cercano a la unidad (la estabilización no es completa debido a pequeñas oscilaciones asociadas al contacto rueda suelo, las cuales ya se explicaron anteriormente). Por tanto, para estudiar el comportamiento de  $I_t$  se consideraron algunos parámetros característicos de las respuestas oscilatorias subamortiguadas (Figura 7): tiempo pico  $t_p$ , tiempo de establecimiento ( $t_e$ ) que para esta investigación se definió como el tiempo requerido para lograr que  $I_t$  se estabilice dentro de una franja con amplitud correspondiente al 5% de la amplitud de entrada y medida alrededor de otra banda que define las oscilaciones permanentes después de la estabilización de  $I_t$  (Figura 7); finalmente se consideró la constante de amortiguamiento del sistema  $\varepsilon$ , para la cual se define que: si  $\varepsilon < 1$ , la respuesta será subamortiguada; si  $\varepsilon = 1$ , la respuesta será críticamente amortiguada y si  $\varepsilon > 1$  la respuesta será sobreamortiguada. Este parámetro entrega información adicional, ya que mientras más pequeño sea, mayores oscilaciones existirán en la señal (en este caso  $I_t$ ) lo cual implica incluso mayores sobreoscilaciones ( $M_p$ ) que son perjudiciales para  $I_t$  ya que en la medida que estas oscilaciones se acerquen a cero, hay mayor riesgo de inestabilidad al vuelco en el robot. Finalmente, estos

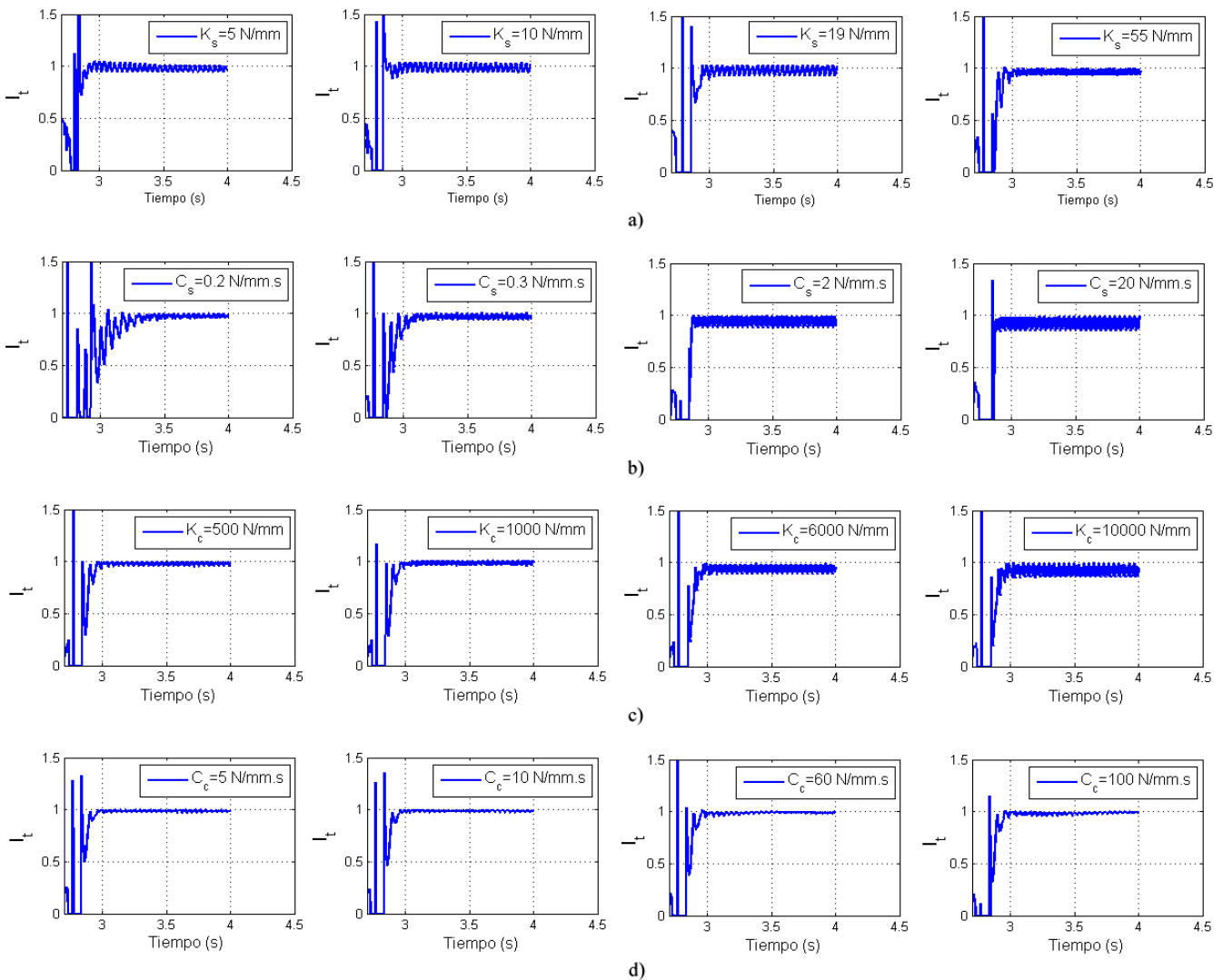


Figura 6. Índice de estabilidad ( $I_t$ ) durante la 5ta etapa de descenso de un escalón con altura de 70 mm al variar: a) Constante de rigidez de los resortes ( $K_s$ ); b) Constante de amortiguamiento de los amortiguadores ( $C_s$ ); c) Constante de rigidez de las ruedas ( $K_c$ ); d) Constante de amortiguamiento en las ruedas ( $C_c$ ).

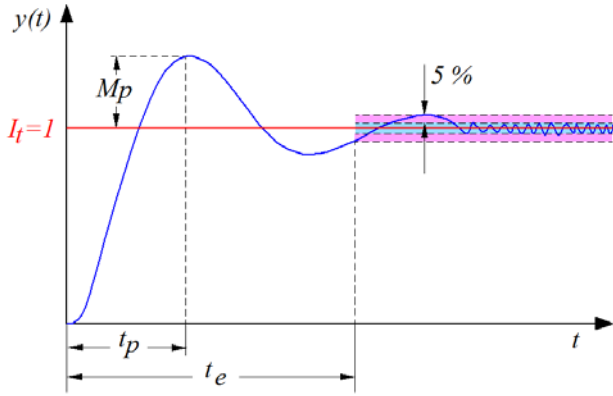


Figura 7. Respuesta oscilatoria subamortiguada.

parámetros de la respuesta subamortiguada de  $I_t$  se tabularon para tres alturas de escalones (20, 40 y 70 mm) en simulaciones donde se variaron los parámetros del sistema de suspensión  $K_s$ ,  $C_s$ ,  $K_c$  y  $C_c$  de acuerdo a la Tabla 1. La Figura 8 muestra de manera gráfica el resumen de resultados.

En la Figura 8a se aprecia el comportamiento de  $I_t$  cuando varía la constante de rigidez de los resortes  $K_s$ . Se puede observar que en la medida que el resorte se hace más rígido ( $K_s$  aumenta) el tiempo pico ( $t_p$ ) del sistema de igual forma aumenta y el tiempo de establecimiento ( $t_e$ ) tiende a disminuir, aún cuando la variación es pequeña (principalmente para escalones de baja altura). Finalmente, se aprecia con respecto a la constante de amortiguamiento ( $\varepsilon$ ) que esta crece en la medida que la constante de rigidez del resorte aumenta; cabe destacar que el sistema en este caso es subamortiguado ( $\varepsilon < 1$ ), pero el amortiguamiento se va haciendo mayor en la medida que  $K_s$  se incrementa. En las Figuras 8b y 8c, se observa que cuando la constante de

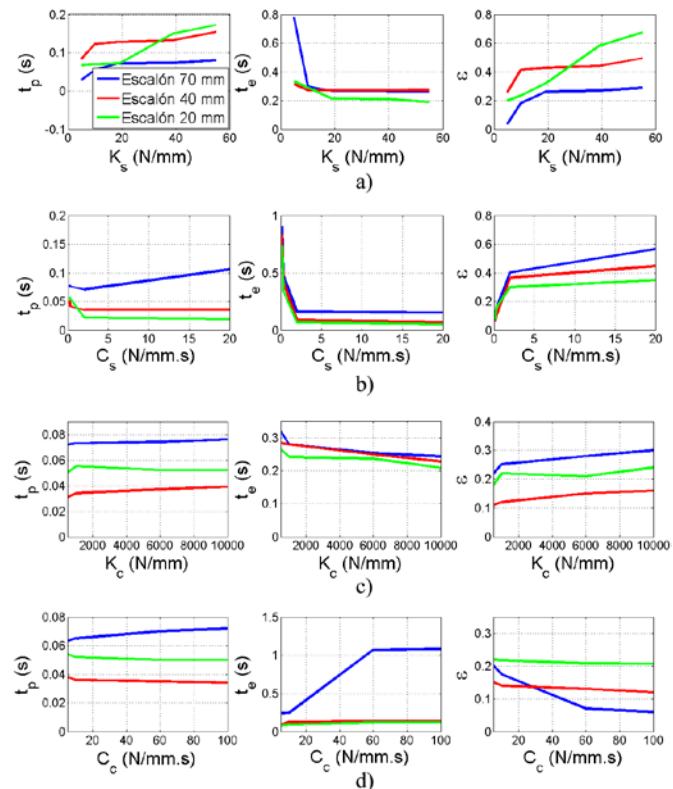


Figura 8. Parámetros de la respuesta de  $I_t$  durante el descenso de escalones con distinto tamaño y considerando variaciones de: a)  $K_s$ ; b)  $C_s$ ; c)  $K_c$  y d)  $C_c$ .

amortiguamiento de los amortiguadores  $C_s$  y la constante de rigidez de la rueda  $K_c$  se incrementan, el efecto en los parámetros de respuesta de  $I_t$  tienen un mismo comportamiento ( $t_p$  tiende a aumentar,  $t_e$  tiende a disminuir y  $\varepsilon$  tiende a aumentar). El incremento de  $\varepsilon$  es favorable porque implica un mayor amortiguamiento en el comportamiento de  $I_t$  y menos oscilaciones con  $I_t$  cercano a cero, que constituyen momentos de inestabilidad frente al vuelco. Aparte, la Figura 8d muestra que a medida que se incrementa la constante de amortiguamiento de la rueda  $C_c$ ,  $t_p$  tiende a permanecer constante,  $t_e$  también tiende a permanecer constante (para escalones con baja altura) y  $\varepsilon$  tiende a disminuir, esto implica un menor amortiguamiento en el contacto rueda-suelo.

Esta misma metodología se siguió en el análisis del índice de direccionamiento  $I_s$ . Después de determinar las fuerzas de reacción para cada simulación planteada en la Tabla 1, se utilizó a (2) para su cálculo. Del mismo modo como sucedió con  $I_t$  (Figura 6), el índice de direccionamiento  $I_s$  tuvo un comportamiento oscilatorio durante la 5ta etapa del descenso del escalón por tanto, se hizo un análisis análogo con base en los parámetros de respuesta  $t_p$ ,  $t_e$  y  $\varepsilon$ . En la Figura 9 se muestra el comportamiento de estos parámetros en la respuesta de  $I_s$  durante la 5ta etapa de descenso de un escalón con diferentes alturas.

De las Figuras 9a, 9b y 9c se observa que el efecto sobre el índice de direccionamiento es análogo cuando varían  $K_s$ ,  $C_s$  y  $K_c$ :  $t_p$  no presenta mayores variaciones,  $t_e$  tiende a ser mayor para bajas magnitudes de  $K_s$ ,  $C_s$  y  $K_c$ . Por otra parte,  $\varepsilon$  tiende a aumentar en la medida que se incrementan las variables  $K_s$ ,  $C_s$  y  $K_c$ , lo cual implica que  $I_s$  tiende a estar más amortiguado y con menores oscilaciones que podrían disminuir momentáneamente este índice lo cual es perjudicial para

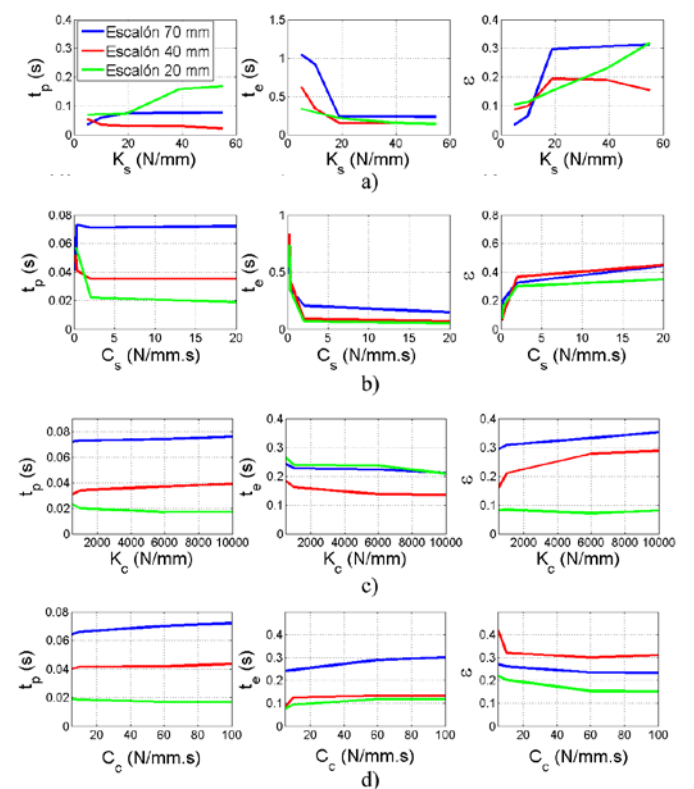


Figura 9. Parámetros de la respuesta de  $I_s$  durante el descenso de escalones con distinto tamaño y considerando variaciones de: a)  $K_s$ ; b)  $C_s$ ; c)  $K_c$  y d)  $C_c$ .

garantizar el direccionamiento del robot en ese instante crítico. Finalmente, en la Figura 9d se observa el efecto sobre  $I_s$  cuando se varía la constante de amortiguamiento de la rueda. Al respecto se observa que en la medida que  $C_c$  se incrementa,  $t_p$  y  $t_e$  presentan un leve incremento mientras que  $\epsilon$  disminuye.

Ahora, este análisis se realiza con la finalidad de especificar qué magnitudes en los parámetros del sistema de suspensión son adecuadas para garantizar una mejor estabilidad y direccionamiento en operaciones de descenso brusco sobre escalones. Para lograr una elección adecuada de estos parámetros, se especificaron tres criterios de selección, los cuales se enuncian en el orden de su importancia a continuación:

- i) El descenso de los índices durante la zona de inestabilidad (medidos a través de las amplitudes de las oscilaciones en la zona inestable), producida luego de ocurrir el impacto entre la superficie y las ruedas traseras, debe ser mínimo. Este criterio es crítico, ya que en este instante el robot puede experimentar un vuelco o perder su capacidad de direccionamiento. En la práctica, este criterio queda definido por el coeficiente de amortiguamiento del sistema ( $\epsilon$ ) que si se acerca a la unidad, garantiza que la variable en estudio ( $I_t$  o  $I_s$ ) presente la menor cantidad de oscilaciones y con amplitud menor.
- ii) El rango las oscilaciones en la zona inestable debe ser pequeño. Por tanto, se espera que el tiempo de establecimiento  $t_e$  sea bajo para evitar que se prolongue el riesgo de inestabilidad en el vuelco y pérdida de direccionamiento.
- iii) El tiempo pico ( $t_p$ ) aunque es una medida de menor relevancia debe considerarse ya que, si es muy alto incide en una respuesta lenta del sistema, mientras que si es muy corto, pudiera significar una sobreoscilación de gran amplitud. Por tanto, se espera que los parámetros elegidos produzcan un  $t_p$  intermedio.

Con base en estos criterios se consideró que la selección de los parámetros del sistema de suspensión en este caso debe estar dirigida a obtener: alta rigidez en los resortes y en las ruedas ( $K_s$  y  $K_c$  altos), alto coeficiente de amortiguamiento en los amortiguadores ( $C_s$  alto) y bajo amortiguamiento en las ruedas ( $C_c$  bajo). Con esto se garantiza un mejor desempeño del robot durante el descenso de escalones en cuanto a la estabilidad al vuelco y direccionamiento.

### 3.2. Ascenso sobre escalones

La superación de este tipo de obstáculos solo con el uso de la tracción en las ruedas también genera cargas de impacto, momentos de inestabilidad al vuelco y pérdidas de direccionamiento. Por tanto, se hizo un estudio para este caso considerando escalones con alturas de 20, 50 y 70 mm con el propósito de estudiar la influencia de los parámetros de suspensión en la estabilidad y direccionamiento. Durante esta tarea, también se identificaron cinco etapas mostradas en la Figura 10 de acuerdo a las fuerzas de reacción entre las ruedas del robot y el suelo mostradas en la Figura 11.

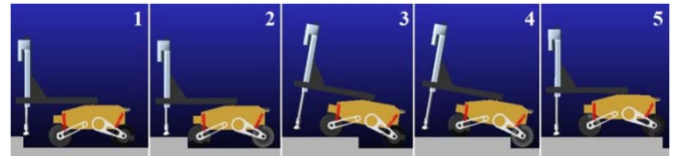


Figura 10. Etapas de desplazamiento del robot Lázaro durante el ascenso de un escalón.

La primera etapa comprende desde el inicio de la simulación hasta aproximadamente 0.58 s (Figura 11), donde las fuerzas de reacción en las cuatro ruedas son uniformes alrededor de los 60 N con pequeñas oscilaciones producto del contacto rodante entre la rueda y el suelo. A continuación se observa la segunda etapa desde los 0,6 hasta 0,8 s, donde inicialmente se aprecia un fuerte impacto sobre las ruedas delanteras producto del contacto entre las mismas y el obstáculo. En este periodo existen grandes oscilaciones en las cargas puesto que, cuando las ruedas impactan con el escalón son repelidas hacia atrás en varias ocasiones hasta que logran el agarre adecuado para iniciar su ascenso. Estos impactos con el escalón generan rebotes en las cuatro ruedas que producen saltos los cuales eliminan el contacto rueda - suelo y disminuyen momentáneamente las fuerzas de reacción hasta llegar a cero en todas las ruedas.

Posteriormente se da paso a una tercera etapa que se desarrolla desde los 0,8 hasta los 2,4 s cuando el robot se desplaza con las ruedas delanteras sobre el escalón. Aquí se observa una diferencia entre las reacciones de las ruedas delanteras y traseras alrededor de los 53 y 66 N respectivamente, ya que en ese periodo el vector peso se proyecta más cerca del eje que une las ruedas traseras, producto de la inclinación presente en el robot. Luego, a los 2,4 s comienza la cuarta etapa donde las ruedas traseras

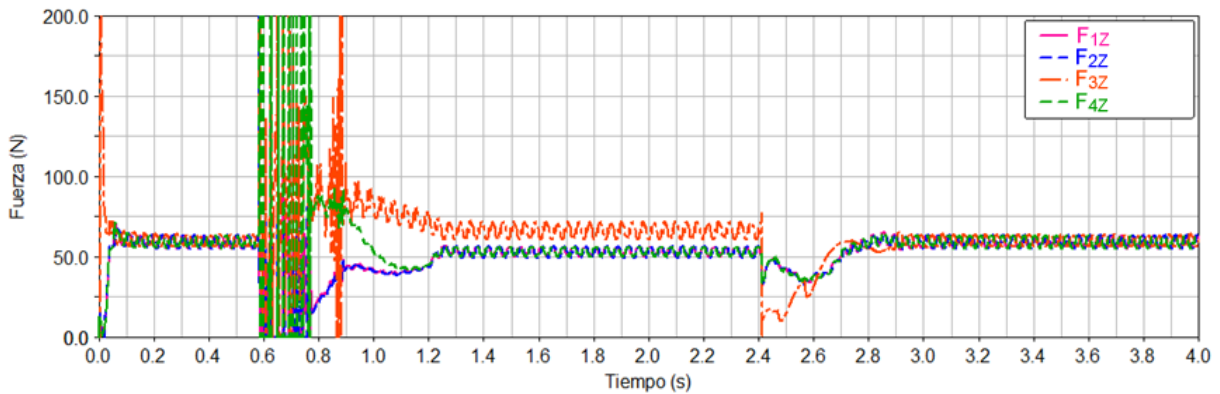


Figura 11. Fuerzas normales en las cuatro ruedas durante el ascenso de un escalón de 70 mm de altura y resortes con  $K_s = 39.07$  N/mm.

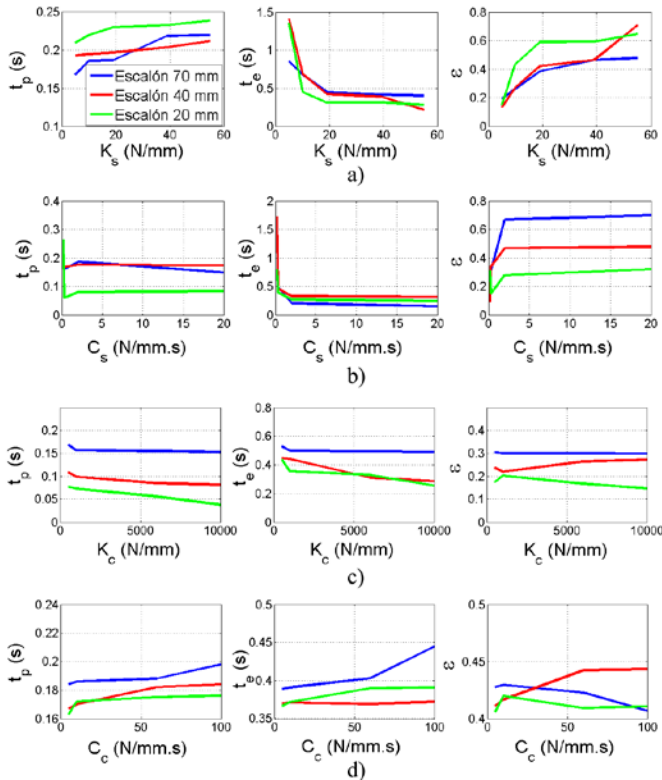


Figura 12. Parámetros de la respuesta de  $I_t$  durante el ascenso de escalones con distinto tamaño y considerando variaciones de: a)  $K_s$ ; b)  $C_s$ ; c)  $K_c$  y d)  $C_c$ .

ascienden sobre el escalón. En este punto las reacciones de las ruedas traseras disminuyen su magnitud pudiendo llegar hasta 0 durante un corto período de tiempo. Cuando estas ruedas alcanzan el borde superior del peldaño (2.9 s) comienza la quinta etapa donde las fuerzas de reacción se estabilizan para continuar el avance del robot.

Como se hizo para el caso anterior, a continuación se hicieron múltiples simulaciones modificando los parámetros de suspensión de acuerdo a la Tabla 1. Obtenidas las fuerzas de reacción se calcularon los índices de estabilidad y direccionamiento para todo el recorrido en el cual había dos momentos de inestabilidad debidos a cargas de impacto (etapas 2 y 4). Se analizó el efecto de los parámetros de suspensión durante la etapa cuatro ya que permite visualizar el fenómeno desde el momento de inestabilidad hasta la estabilidad completa (etapa 5). Para cada simulación, se observó la respuesta oscilatoria de  $I_t$  e  $I_s$  para obtener posteriormente a  $t_p$ ,  $t_e$  y  $\varepsilon$  tanto en el caso de estabilidad al vuelco (Figura 12) y direccionamiento (Figura 13).

Al analizar el efecto de los parámetros de suspensión en la respuesta de  $I_t$  e  $I_s$  se verificó que: la constante de rigidez de los resortes  $K_s$  puede adquirir una magnitud de mediana a alta, ya que una alta rigidez favorece la estabilidad al vuelco ( $\varepsilon$  alta con bajo  $t_e$ , ver Figura 12a), pero una rigidez muy alta desfavorece la capacidad de direccionamiento, siendo adecuada una rigidez con magnitud media (para el caso de estudio es apropiada una  $K_s=20$  N/mm) que produce el  $\varepsilon$  más alto con bajo  $t_e$  (ver Figura 13a). En el caso de la constante de amortiguamiento en los amortiguadores  $C_s$ , se encontró que una constante elevada es adecuada para mejorar  $I_t$  e  $I_s$  ya que en ambos casos, una  $C_s$  alta favorece una  $\varepsilon$  mayor que se traduce en pocas oscilaciones de esos índices y un bajo  $t_e$ , que implica una estabilización completa en menor tiempo

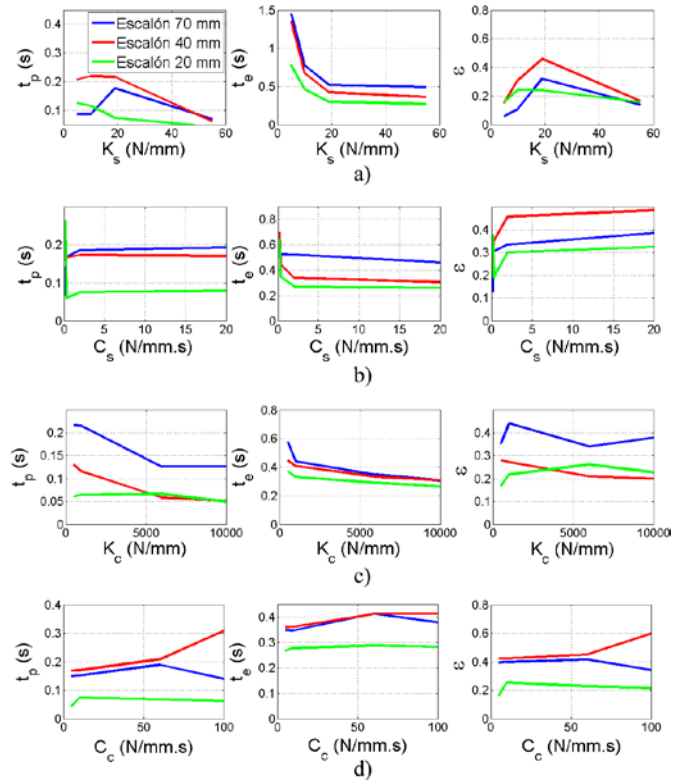


Figura 13. Parámetros de la respuesta de  $I_s$  durante el ascenso de escalones con distinto tamaño y considerando variaciones de: a)  $K_s$ ; b)  $C_s$ ; c)  $K_c$  y d)  $C_c$ .

(Figuras 12b y 13b).

Respecto a los parámetros de suspensión de la rueda, se encontró que la magnitud de la constante de rigidez  $K_c$ , no produce un comportamiento con tendencia definida en la respuesta de  $I_t$  e  $I_s$  (ver  $\varepsilon$  en las Figuras 12c y 13c). En todo caso, lo que si se evidencia es que una constante alta disminuye los tiempos de estabilización  $t_e$ . Finalmente, ocurre un caso equivalente con la constante de amortiguamiento de las ruedas  $C_c$ , donde la magnitud de este parámetro tampoco produce un comportamiento con tendencia definida en la respuesta de  $I_t$  e  $I_s$  (ver  $\varepsilon$  en las Figuras 12d y 13d). En este caso es preferible entonces una  $C_c$  con baja magnitud, que permite disminuir a  $t_p$  y  $t_e$ , lo cual implica una estabilización más rápida.

### 3.3. Descenso lateral sobre escalones

En esta tarea, el robot avanza sobre un escalón cuya geometría permite que descendan solo dos ruedas del mismo lado, mientras que las otras dos permanecen sobre el escalón. La evaluación de esta tarea es relevante puesto que en este caso, se podría producir el vuelco lateral del vehículo o incluso una disminución en la capacidad de direccionamiento puesto que las ruedas que permanecen sobre el escalón mantendrán menores fuerzas de reacción. Para comenzar el análisis, se dividió la tarea en cinco etapas que debe superar el robot (Figura 14). En la primera etapa, el robot avanza

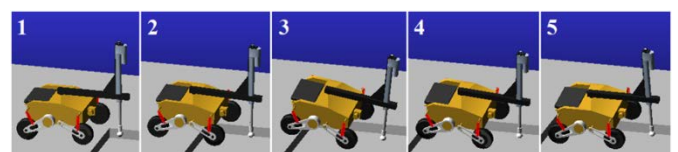


Figura 14. Etapas de desplazamiento del robot Lázaro durante el descenso lateral de un escalón.



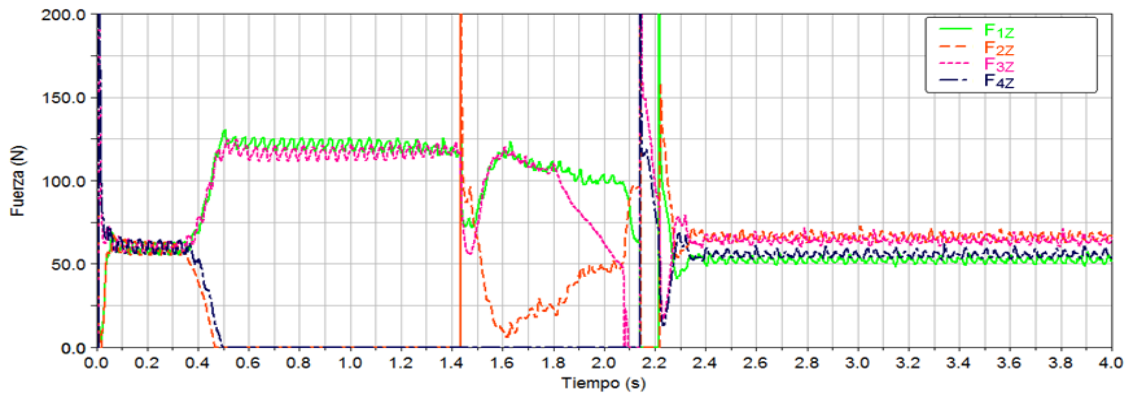


Figura 15. Fuerzas normales en las cuatro ruedas durante el descenso lateral de un escalón de 70 mm de altura y resortes con  $K_s = 39.07$  N/mm.

hasta llegar al escalón y las fuerzas de reacción se distribuyen uniformemente a pesar de las pequeñas fluctuaciones producto del contacto rodante rueda-suelo (Figura 15). La segunda etapa comienza a los 0,35 s cuando la rueda 2 (de acuerdo a la nomenclatura dada en la Figura 3) pierde el contacto con el suelo. En este período, la rueda 4 también pierde el contacto de manera que, el robot se mantiene en posición horizontal pero queda soportado solo por dos ruedas en diagonal (ruedas 1 y 3) cuyas fuerzas de reacción se incrementan casi hasta el doble (Figura 15). La tercera etapa comienza a los 1,42 s cuando el robot gira de manera que la rueda 2 desciende y toca la parte inferior del escalón produciendo una carga de impacto al generarse el contacto. A partir de este punto el robot estará soportado por tres ruedas quedando la rueda 4 todavía sin contacto con el suelo.

La cuarta etapa inicia a los 2,1 s cuando la rueda 3 desciende del escalón y casi simultáneamente la rueda 4 comienza a tocar la superficie superior del escalón. Este

hecho genera una gran carga de impacto en las ruedas 3 y 4 con el correspondiente efecto de rebote sobre las ruedas 1 y 2 quienes momentáneamente también pierden el contacto con el suelo. Por último, se aprecia la quinta etapa que inicia a los 2.3 s, donde las fuerzas de reacción comienzan a estabilizarse aunque la magnitud de las reacciones en las ruedas 2 y 3 será mayor que para las ruedas restantes debido a la inclinación remanente del robot y la proyección del vector peso más cerca del eje que une a estas dos ruedas.

Ahora, corresponde analizar la respuesta oscilatoria de  $I_t$  e  $I_s$  a través de las variables  $t_p$ ,  $t_e$  y  $\varepsilon$  para definir las magnitudes adecuadas de los parámetros del sistema de suspensión. Este análisis se hizo en la quinta etapa donde se observa el efecto de la suspensión después de las cargas de impacto y el proceso de estabilización de las reacciones. Comenzando con la constante de rigidez de los resortes  $K_s$ , se evidencia que una magnitud de mediana a grande produce mejores resultados: respecto a la estabilidad (Figura 16a) una  $K_s$

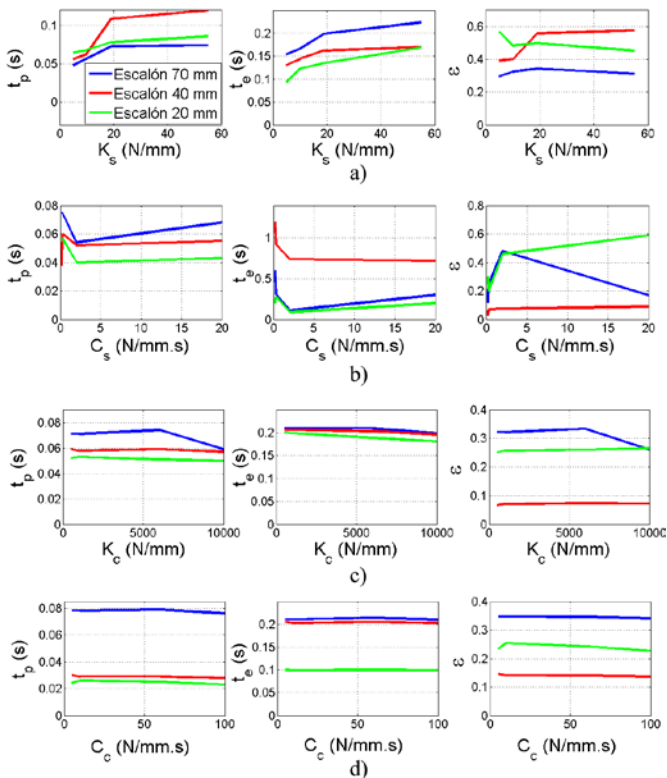


Figura 16. Parámetros de la respuesta de  $I_t$  durante el descenso lateral de escalones considerando variaciones de: a)  $K_s$ ; b)  $C_s$ ; c)  $K_c$  y d)  $C_c$ .

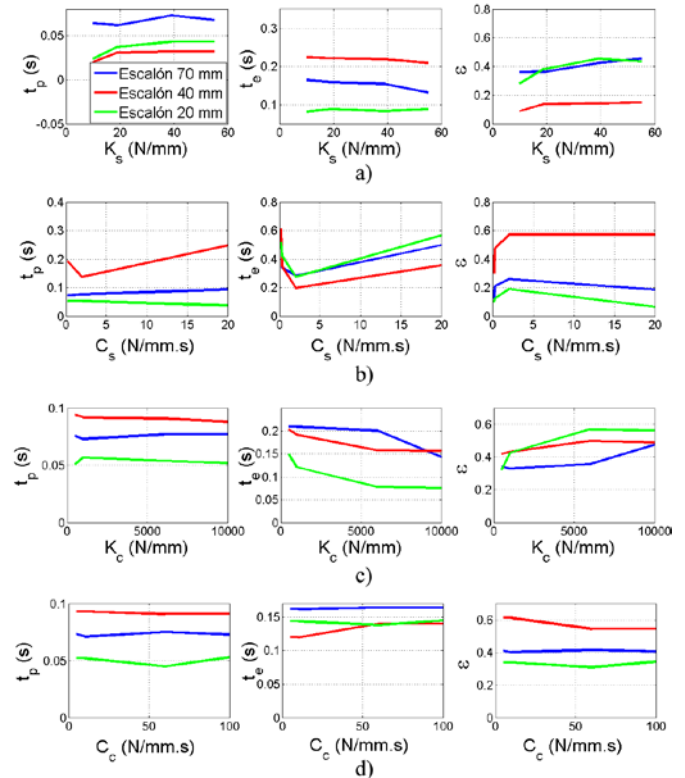


Figura 17. Parámetros de la respuesta de  $I_s$  durante el descenso lateral de escalones considerando variaciones de: a)  $K_s$ ; b)  $C_s$ ; c)  $K_c$  y d)  $C_c$ .

mediana es apropiada porque a pesar de que se produce una disminución mínima en la cantidad y amplitud de oscilaciones de  $I_t$  (estimadas a través de  $\varepsilon$ ), si disminuye  $t_e$ ; en el caso del direccionamiento (Figura 17a), una  $K_s$  alta disminuye la cantidad de oscilaciones en  $I_s$  ( $\varepsilon$  aumenta) y  $t_e$  tiende a disminuir de manera mínima. Luego, al analizar la constata de amortiguamiento en los amortiguadores  $C_s$ , se observa respecto a la estabilidad (Figura 16b) que para escalones con mediana o baja altura es preferible un valor de  $C_s$  alto que disminuye la cantidad de oscilaciones en  $I_t$  ( $\varepsilon$  aumenta) aunque  $t_e$  se incremente un poco. En el caso de escalones altos, se prefiere un  $C_s$  medio a bajo que producirá una cantidad menor de oscilaciones en  $I_t$  ( $\varepsilon$  aumenta). En el caso del direccionamiento (Figura 17b), es preferible en todos los casos un  $C_s$  bajo que permita disminuir la cantidad de oscilaciones en  $I_s$  ( $\varepsilon$  alto) y también disminuir  $t_e$ .

Respecto a los parámetros de las ruedas, la constante de rigidez  $K_c$  se prefiere con una magnitud de media a alta ya que, en el caso de la estabilidad (Figura 16c) disminuye de manera mínima  $t_e$  aunque la cantidad de oscilaciones de  $I_t$  permanece de casi constante ( $\varepsilon$  constante a excepción de escalones con elevada altura). En el caso del direccionamiento (Figura 17c), la magnitud de  $K_c$  se prefiere elevada ya que disminuye las oscilaciones de  $I_s$  ( $\varepsilon$  aumenta) y  $t_e$  disminuye. Finalmente, la magnitud de la constante de amortiguamiento de la rueda  $C_c$  no aporta ningún efecto sobre  $I_t$  ( $t_p$ ,  $t_e$  y  $\varepsilon$  son prácticamente constantes, ver Figura 16d) y el efecto es mínimo sobre  $I_s$  (se observa un leve mejoramiento de  $\varepsilon$  cuando  $C_c$  es baja, ver Figura 17d).

### 3.4. Desplazamiento sobre zanjás.

La última tarea que se analizará ocurre cuando el robot debe desplazarse sobre zanjás horizontales con longitud menor al diámetro de la rueda y sin ayuda de su brazo. Aunque esta operación produce un riesgo menor en la estabilidad al vuelco, este puede ser mayor respecto a la capacidad de direccionamiento, por tanto, se consideró para esta investigación. En este caso, se hicieron simulaciones cuando el robot se desplaza sobre zanjás con longitudes de 70, 40 y 20 mm.

Esta tarea también se subdividió en cinco etapas (Figura 18): en las etapas 1 (hasta los 0,7 s, ver Figura 19), 3 (desde 1 y 2,2 s) y 5 (a partir de los 2.5 s) el comportamiento es similar: las cuatro ruedas tocan el suelo y las fuerzas de reacción se distribuyen uniformemente alrededor de los 60 N, con pequeñas oscilaciones debidas al contacto rodante de las ruedas con el suelo. Pero las etapas 2 (entre 0,7 y 1 s) y 4

(entre 2,2 y 2,5 s) son relevantes puesto que existen fuerzas de impacto cuando las ruedas caen dentro de la zanja: las ruedas delanteras sufren el impacto en la etapa dos y las traseras en la etapa 4. En ambos casos y a pesar del incremento momentáneo de las fuerzas de reacción producto del impacto, no se genera una pérdida de contacto de las ruedas con el suelo, ni en aquellas que han caído en la zanja, ni en las adicionales por efecto de rebote.

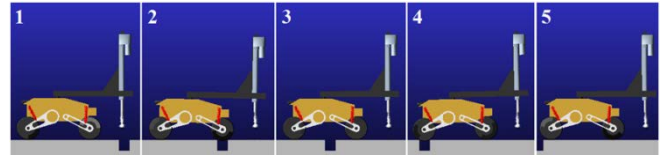


Figura 18. Etapas de desplazamiento del robot Lázaros sobre una zanja.

Como se ha venido haciendo en los casos anteriores, se realizaron simulaciones modificando los parámetros del sistema de suspensión. Luego, al obtener las fuerzas de reacción en las cuatro ruedas, se determinaron los índices de estabilidad  $I_t$  y direccionamiento  $I_s$  a lo largo de la simulación. Posteriormente se trabajó, para la etapa cuatro (contacto de las ruedas traseras), la respuesta oscilatoria de estos índices en función de los parámetros  $t_p$ ,  $t_e$  y  $\varepsilon$ , con el propósito de analizarlos y seleccionar a partir de los mismos, aquellos parámetros de suspensión que permitan obtener un mejor comportamiento de  $I_t$  e  $I_s$ . A continuación se describen los resultados.

Comenzando con la constante de rigidez de los resortes  $K_s$ , se encontró que tanto en el caso de  $I_t$  como de  $I_s$  se prefiere que esta tenga una magnitud media ya que si se elige con baja magnitud se garantizan menos oscilaciones con menor amplitud ( $\varepsilon$  es más alta, ver Figuras 20a y 21a) pero con mayores  $t_e$ ; caso contrario, aumentan las oscilaciones ( $\varepsilon$  baja) pero disminuye  $t_e$ . En el caso de la constante de amortiguamiento de los amortiguadores  $C_s$ , se obtuvo que una magnitud de media a grande es apropiada ya que en estos casos  $I_t$  e  $I_s$  tendrán menos oscilaciones con menor amplitud ( $\varepsilon$  aumenta) y menores  $t_e$  (ver Figuras 20b y 21b).

En cuanto a los parámetros de las ruedas se encontró que la constante de rigidez  $K_c$  debiera ser de media a alta ya que con estas magnitudes se garantiza una menor cantidad de oscilaciones de  $I_t$  e  $I_s$  ( $\varepsilon$  alta, Figuras 20c y 21c) con menos  $t_e$ . Finalmente, al considerar la constante de amortiguamiento en las ruedas  $C_c$  se consiguió que su magnitud no afecta la respuesta de  $I_t$  (Figura 20d) pero en el caso de  $I_s$  se consiguió que una constante de baja magnitud disminuye tanto las oscilaciones en  $I_s$  ( $\varepsilon$  alta, ver Figura 21d) como  $t_e$ .

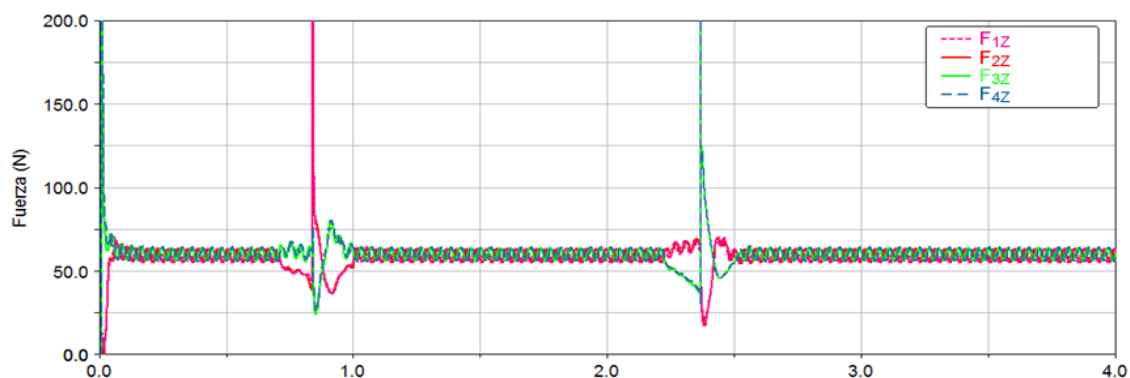


Figura 19. Fuerzas normales en las cuatro ruedas durante el desplazamiento sobre una zanja de 70 mm de largo utilizando resortes con  $K_s = 39.07$  N/mm.

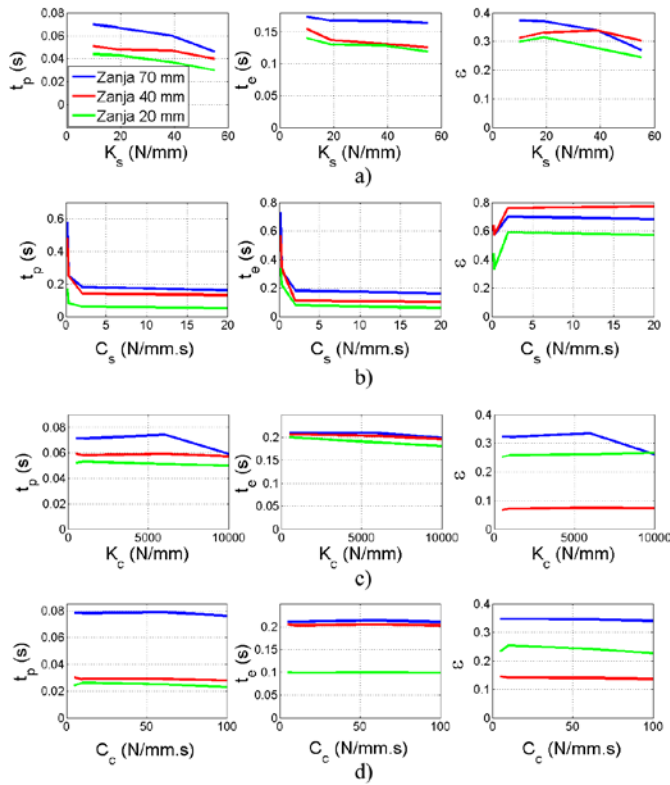


Figura 20. Parámetros de la respuesta de  $I_t$  durante el desplazamiento sobre zanjas considerando variaciones de: a)  $K_s$ ; b)  $C_s$ ; c)  $K_c$  y d)  $C_c$ .

4. Discusión

Después de analizar cada tarea y visualizar qué magnitudes deben adquirir los parámetros del sistema de suspensión para mejorar la estabilidad al vuelco ( $I_t$ ) y el direccionamiento ( $I_s$ ), ahora corresponde unificar los resultados obtenidos puesto que, al hablarse de un sistema de suspensión pasiva, solo existe una magnitud para cada parámetro del sistema de suspensión. Por tanto, se hace imprescindible seleccionar la magnitud de cada parámetro que permita un mejor desempeño en conjunto tanto de  $I_t$  como de  $I_s$ . Al respecto, se presentan en las Tablas 2 y 3, el resumen de las magnitudes de los cuatro parámetros de suspensión que produjeron un mejor desempeño individual de  $I_t$  e  $I_s$ . Estas magnitudes están limitadas al rango presentado en la Tabla 1. Un análisis rápido de las Tablas 2 y 3 permiten concluir que los parámetros del sistema de suspensión deben poseer las siguientes magnitudes: Las constantes de rigidez tanto de los resortes  $K_s$  como de las ruedas  $K_c$  así como la constante de amortiguamiento de los amortiguadores  $C_s$  deben ser de media a alta. Caso contrario sucede con la constante de amortiguamiento de las ruedas  $C_c$  la cual debe adquirir una baja magnitud. La elección de una única constante por cada parámetro no satisfará individualmente a cada caso particular puesto que hay casos antagónicos (por ejemplo  $C_s$ , ver Tabla 3) pero al menos permitirá mejorar la estabilidad y la capacidad de direccionamiento en la mayoría de los casos. Siguiendo este principio, se considera que para el caso del robot Lázaro, una configuración adecuada de los parámetros de suspensión que propiciará un buen comportamiento del sistema cuando el robot se desplaza sobre las discontinuidades de terreno estudiadas, está formada por:  $K_s = 39.07 \text{ N/mm}$ ,  $C_s = 10 \text{ N/(mm.s)}$ ,  $K_c = 6000 \text{ N/mm}$  y  $C_c = 5 \text{ N/(mm.s)}$ . En la Figura 22 se

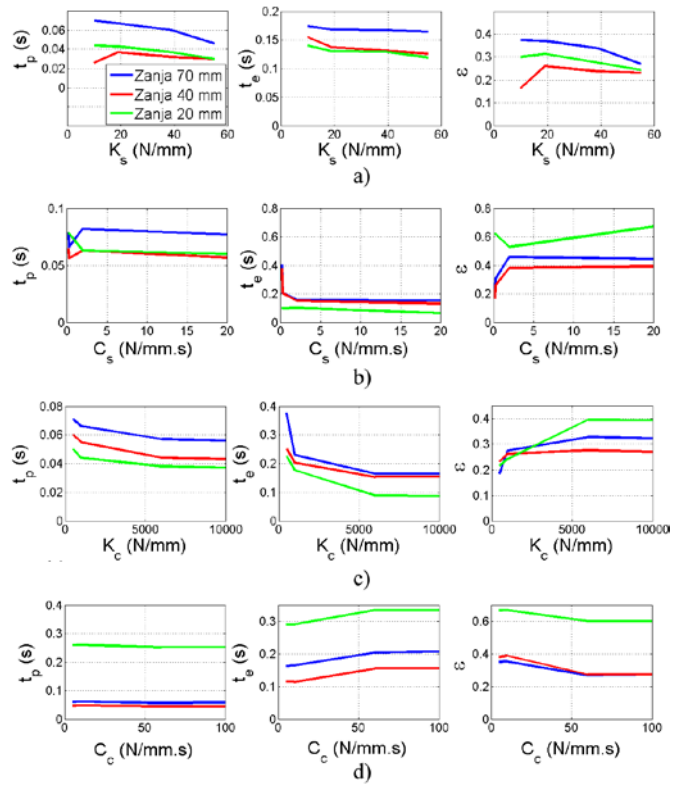


Figura 21. Parámetros de la respuesta de  $I_s$  durante el el desplazamiento sobre zanjas considerando variaciones de: a)  $K_s$ ; b)  $C_s$ ; c)  $K_c$  y d)  $C_c$ .

observa como la respuesta de  $I_t$  mejora al utilizar estos parámetros ya que se presenta un  $t_e$  bajo con sobreoscilaciones menores que comprometan la estabilidad al vuelco ( $I_t$ ) durante los período de mayor inestabilidad (Comparar Figura 22b con la Figura 6). Ahora, si se espera una suspensión que sea óptima para cada caso individual, se deberá migrar desde una suspensión pasiva a una suspensión semiactiva que permitirá modificar la magnitud de  $C_s$ , o una suspensión activa que permitiría modificar la dinámica total del sistema de acuerdo al tipo de obstáculo a superar.

Estos resultados, son compatibles con los obtenidos por otros investigadores: Abo-Shanab y Sepehri (2005) estudiaron la suspensión de una excavadora hidráulica en operaciones donde se extendía el brazo hasta llegar al inicio del vuelco, luego se retraía inmediatamente el brazo. Esto generaba cargas de impacto en la plataforma que al estar en el

Tabla 2. Magnitudes adecuadas en los parámetros del sistema de suspensión para mejorar la estabilidad ( $I_t$ ) durante la superación de obstáculos.

Tarea	$K_s$	$C_s$	$K_c$	$C_c$
Descenso de escalones	Alta	Alta	Alta	Baja
Ascenso de escalones	Alta	Alta	Alta	Baja
Descenso lateral de esc.	Media	Media a alta	Media a alta	-
Paso sobre zanjas	Media	Media a alta	Media a alta	-

Tabla 3. Magnitudes adecuadas en los parámetros del sistema de suspensión para mejorar el direccionamiento ( $I_s$ ) durante la superación de obstáculos.

Tarea	$K_s$	$C_s$	$K_c$	$C_c$
Descenso de escalones	Alta	Alta	Alta	Baja
Ascenso de escalones	Media	Alta	Alta	Baja
Descenso lateral de esc.	Alta	Baja	Alta	Baja
Paso sobre zanjas	Media	Media a alta	Media a alta	Baja

proceso de vuelco, volvía a la posición inicial produciéndose un nuevo contacto con el suelo. Se encontró que al aumentar la rigidez ( $K_s$ ) de la suspensión se mejora la estabilidad al vuelco; asimismo, al incrementar el amortiguamiento ( $C_s$ ) también se mejora la estabilidad. Otros investigadores obtuvieron resultados semejantes para experimentos análogos con manipuladores móviles provistos de suspensión que realizaban tareas de traslado de cargas (Moosavian *et al.*, 2007). En otra investigación (Sert & Boyraz, 2017), la suspensión pasiva de un bus mediano fue sometida a pruebas mientras el vehículo se desplazaba sobre reductores de velocidad que generaban cargas de impacto sobre la suspensión del vehículo. En este caso, también se encontró que al aumentar la rigidez de la suspensión, se producía una mejora en la estabilidad al vuelco. Por tanto, estos trabajos sirven como referencia que permiten verificar la conformidad de los resultados obtenidos en esta investigación.

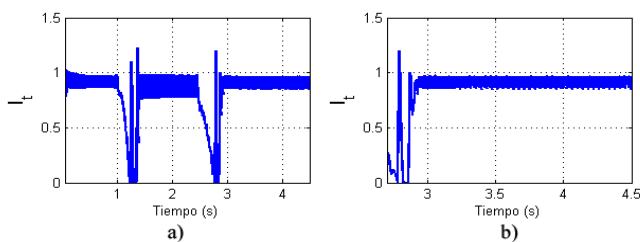


Figura 22. Respuesta de  $I_t$  durante el descenso un escalón con altura de 70 mm utilizando  $K_s = 39.07 \text{ N/mm}$ ,  $C_s = 10 \text{ N/(mm.s)}$ ,  $K_c = 6000 \text{ N/mm}$  y  $C_c = 5 \text{ N/(mm.s)}$ ; a)  $I_t$  durante todo el descenso; b) Detalle de  $I_t$  durante la 5ta etapa de la tarea.

Finalmente, se debe acotar que estos resultados también permiten confirmar que en el caso de robots con suspensión, los cuales están sometidos a desplazamiento sobre terrenos con obstáculos que puedan generar cargas de impacto, la estimación de la estabilidad al vuelco y la capacidad de direccionamiento debe considerar el efecto de la suspensión ya que al asumir una suspensión rígida, se sobreestiman las capacidades del robot para desplazarse eficientemente con buen direccionamiento y sin propensiones al vuelco.

## 5. Conclusiones

En este artículo se hizo un análisis completo del sistema de suspensión pasiva de un robot *Skid Steer* cuando transita sobre obstáculos que generan cargas de impacto en el contacto rueda-suelo. Se evaluó el efecto producido al variar los parámetros de la suspensión sobre la estabilidad al vuelco y el direccionamiento. Se encontró a nivel general, que para mejorar la capacidad del robot respecto a estos factores (estabilidad y el direccionamiento) cuando el móvil se desplaza sobre estos tipos de obstáculos, la suspensión debe poseer: resortes y ruedas con alta rigidez, amortiguadores con alto coeficiente de amortiguamiento y ruedas con bajo coeficiente de amortiguamiento.

Los trabajos futuros están dirigidos a estudiar el efecto de los parámetros de suspensión en la estabilidad y direccionamiento en otras situaciones comunes encontradas al desplazarse sobre terrenos irregulares: movimiento sobre superficies inclinadas y terrenos con alta rugosidad. De esta manera, se tendrá una visión general que permita seleccionar

un sistema de suspensión adecuado para cualquier tipo de terreno encontrado en un entorno natural.

## 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

- Abo-Shanab, R., & Sepehri, N. (2005). Tip-over stability of manipulator-like mobile hydraulic machines. *Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control*, 127 (2), 295-301.
- Bluethmann, B., Herrera, E., Hulse, A., Figuered, J., Junkin, L., Markee, M., y otros. (2010). An active suspension system for lunar crew mobility. *IEEE Aerospace Conference*, (págs. 1-9). Big Sky.
- Bruzzone, L., Fanghella, P., & Quaglia, G. (2017). Experimental performance assessment of mantis 2, hybrid leg-wheel mobile robot. *International Journal of Automation Technology*, 11 (3), 396-403.
- Chen, S., Li, X., Zhou, J., Wu, W., Yuan, S., & Liu, S. (2017). Modelling the vertical dynamics of unmanned ground vehicle with rocker suspension. *Proceedings of IEEE International Conference on Mechatronics and Automation*, (págs. 370-375). Takamatsu.
- Cordes, F., Kirchner, F., & Babu, A. (2018). Design and field testing of a rover with an actively articulated suspension system in a Mars analog terrain. *Journal of Field Robotics*, 35 (7), 1149-1181.
- Cordos, N., & Todorut, A. (2019). Influences of the suspensions characteristics on the vehicle stability. En N. Burnete, & B. Varga (Ed.), *Proceedings of the 4th International Congress of Automotive and Transport Engineering (AMMA 2018)* (págs. 808-813). Cham: Springer.
- Deremetz, M., Lenain, R., & Thuilot, B. (2017). tiffness and damping real-time control algorithms for adjustable suspensions : A strategy to reduce dynamical effects on vehicles in off-road conditions. *IFAC-PapersOnLine*, 50 (1), 1958-1964.
- Ellery, A. (2016). Rover mobility and locomotion. En *Planetary Rovers, Springer Praxis Books* (págs. 71-132). Berlin: Springer, Heidelberg.
- Funde, J., Wani, K., Dhote, N., & Patil, S. (2019). Performance analysis of semi-active suspension system based on suspension working space and dynamic tire deflection. En U. Chandrasekhar, L. Yang, & S. Gowthaman (Ed.). (págs. 1-15). Singapore: Springer.
- García, J. M., Gil, A., & Sánchez, E. (2018). Desarrollo de una arquitectura de software para el robot móvil Lázaró. *Ingeniare*, 26 (3), 376-390.
- García, J. M., Martínez, J. L., Mandow, A., & García-Cerezo, A. (2017). Caster-leg aided maneuver for negotiating surface discontinuities with a wheeled skid-steer mobile robot. *Robotics and Autonomous Systems*, 91, 25-37.
- García, J. M., Martínez, J. L., Mandow, A., & García-Cerezo, A. (2015). Steerability analysis on slopes of a mobile robot with a ground contact arm. *Proc. 23rd Mediterranean Conference on Control and Automation*, (págs. 267-272). Torremolinos, Spain.
- García, J. M., Medina, I., Cerezo, A. G., & Linares, A. (2015). Improving the static stability of a mobile manipulator using its end effector in contact with the ground. *IEEE Latin American Transactions*, 13 (10), 3228-3234.
- García, J., Medina, I., Martínez, J., García-Cerezo, A., Linares, A., & Porras, C. (2017). Lázaró: robot móvil dotado de brazo para contacto con el suelo. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática industrial*, 14 (1), 174-183.
- Goga, V., & Kl'úćik, M. (2012). Optimization of vehicle suspension parameters with use of evolutionary computation. *Procedia Engineering*, 48, 174-179.
- Hurel, J., Mandow, A., & García-Cerezo, A. (2013). Los sistemas de suspensión activa y semiactiva: una revisión. *Revista iberoamericana de automática e informática*, 10 (2), 121-132.
- Kang, S., Lee, W., Kim, M., & Shin, K. (2005). Robhaz-rescue: Rough-terrain negotiable teleoperated mobile robot for rescue mission. *IEEE International Workshop on Safety, Security and Rescue Robotics*, (págs. 105-110). Kobe.

- Lei, X., Zhang, G., Li, S., Qian, H., & Xu, Y. (2017). Dual-spring AGV shock absorption system design: Dynamic analysis and simulations. *IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO)*, (págs. 1-7). Macau.
- Li, B., Ma, S., Liu, J., Wang, M., Liu, T., & Wang, Y. (2009). Amoeba-I: a shape-shifting modular robot for urban search and rescue. *Advanced Robotics*, 23 (9), 1057-1083.
- Liu, Y., Meng, X., & Zhang, M. (2008). Research on mobile manipulator tip-over stability and compensation. *8th WSEAS International Conference on Robotics, control and Manufacturing Technology*, (págs. 114-120). Hangzhou.
- Mihon, L., & Lontış, N. (2019). Modeling and analysis of a vehicle suspension. En N. Burnete, & B. Varga (Ed.), *Proceedings of the 4th International Congress of Automotive and Transport Engineering (AMMA 2018)*, (págs. 113-121).
- Moosavian, A., Alipour, K., & Bahramzadeh, Y. (2007). Dynamics modeling and tip-over stability of suspended wheeled mobile robots with multiple arms. *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, (págs. 1210-1215). San Diego.
- Reid, W., Pérez-Grau, F., Göktoğan, A., & Sukkarieh, S. (2016). Actively articulated suspension for a wheel-on-leg rover operating on a martian analog surface. *IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, (págs. 5596-5602). Stockholm.
- Sert, E., & Boyraz, P. (2017). Optimization of suspension system and sensitivity analysis for improvement of stability in a midsize heavy vehicle. *Engineering Science and Technology, an International Journal*, 20, 997-1012.
- Suresh, A., Ajithkumar, N., Kalathil, S., Simon, A., Unnikrishnan, V., Mathew, D., y otros. (2017). An advanced spider-like rocker-bogie suspension system for mars exploration rovers. En J. Kim, F. Karray, P. Sincak, & G. Myung (Ed.), *Robot Intelligence Technology and Applications 4. Advances in Intelligent Systems and Computing*. 447, págs. 423-447. Springer.
- Yang, L., Cai, B., Zhang, R., Li, K., & Wang, R. (2018). A new type design of lunar rover suspension structure and its neural network control system. *Journal of Intelligent & Fuzzy Systems*, 35 (1), 269-281.
- Zhang, J., Jia, X., Zhao, Z., & Gao, R. (2015). Optimization of Positioning Parameters for McPherson Front Suspension based on ADAMS/Car. *International Conference on Computer Science and Mechanical Automation (CSMA)*, (págs. 297-301). Hangzhou.
- Zhang, S., Zhao, X., Su, W., Wu, H., Dai, Z., & Chen, Z. (2019). The design of suspension mechanism and analysis of obstacle ability to rescue robots. En K. Deng, Z. Yu, S. Patnaik, & J. Wang (Ed.), *Recent Developments in Mechatronics and Intelligent Robotics. ICMIR 2018. Advances in Intelligent Systems and Computing*. 856, págs. 677-685. Cham: Springer.