



Departamento de Ingeniería en Sistemas y Automática

# **Navegación de un robot móvil sobre terreno irregular con contacto de su brazo con el suelo**

TESIS DOCTORAL

presentada por

**D. Jesús Marcey García Caicedo**

y dirigida por:

Dr. D. Alfonso J. García Cerezo,

Dr. D. Jorge L. Martínez Rodríguez.

Octubre de 2015



*A Lucy y Jesús (mis padres),  
No podría ser de otra manera.*



# AGRADECIMIENTOS

---

Al terminar este proyecto de investigación, no puedo pasar por alto a todas aquellas personas que colocaron su grano de arena y contribuyeron en la culminación de esta empresa. En primer lugar quiero agradecer a los directores de esta tesis: Dr. Alfonso García-Cerezo y el Dr. Jorge Martínez por su disposición y paciencia para conducir este trabajo y llevarlo a feliz término.

Además, quiero agradecer encarecidamente a mis padres: Lucy y Jesús, quienes fueron mi sostén y apoyo en este tiempo, quizás no me ayudaron en aspectos técnicos, pero estoy seguro que, sin sus cuidados y comprensión, este trabajo no se habría realizado; este logro también les pertenece. A su lado, quiero agradecer a mis hermanas Marcela y Patricia quienes siempre estuvieron dispuestas a ayudarme en lo que necesitara para completar este proyecto.

También debo mencionar a mi segunda casa, la Universidad Nacional Experimental del Táchira, a su Decanato de Investigación y a sus Vicerrectores: Ing. Carlos Chacón y Dr. Alexander Contreras, quienes me brindaron un gran apoyo para el desarrollo de esta investigación. Además, debo hacer mención especial al Laboratorio de Prototipos que fue el epicentro de este trabajo: agradezco al Ing. Ángel Gil, a la Ing. Itza Medina y a la Dra. Belkys Amador, por su gran apoyo y paciencia dentro del laboratorio. De igual manera agradezco a la Fundación para la Ciencia y Tecnología – Táchira y al ex gobernador del estado Táchira, Dr. Cesar Pérez Vivas por el financiamiento otorgado que contribuyó para la construcción del robot Lázaro.

Adicionalmente, no puedo olvidar a Cristian, Jorge, Alonzo, Wilmer y Ender quienes decidieron contribuir en este proyecto a través de sus Trabajos de Aplicación Profesional. A mis amigos Carlos, Gelvy, Samuel, Isaac, Álvaro, Rocío, Rosita y a mis compañeros de trabajo, gracias por su apoyo y palabras de ánimo constantes. Hay muchos más que quisiera mencionar, pero aunque no lo hago, los llevo en el corazón y agradezco su ayuda incondicional.

Finalmente y más importante, agradezco a nuestro Padre que está en los cielos, por darme vida, fuerzas e inteligencia para alcanzar este sueño. A ti sea la honra y la gloria por los siglos de los siglos. Amén.



**D. Alfonso J. García Cerezo**, Catedrático de Universidad, y **D. Jorge L. Martínez Rodríguez**, Profesor Titular de Universidad, ambos del Departamento de Ingeniería de Sistemas y Automática de la Universidad de Málaga,

### **CERTIFICAN**

Que la memoria titulada “Navegación de un robot móvil sobre terreno irregular con contacto de su brazo con el suelo” ha sido realizada por D. Jesús Marcey García Caicedo bajo su dirección en el Departamento de Ingeniería de Sistemas y Automática de la Universidad de Málaga. Esta memoria constituye la Tesis de D. Jesús Marcey García presentada para optar al Grado de Doctor en Ingeniería Mecatrónica.

Málaga, a 26 de octubre de 2015

Dr. D. Alfonso J. García Cerezo

Dr. D. Jorge L. Martínez Rodríguez

VºBº El Director del Departamento responsable del programa de doctorado



# SÍNTESIS

---

En esta tesis se aborda el problema de la navegabilidad de robots móviles sobre terrenos irregulares, los cuales poseen diferentes inclinaciones y variedad de obstáculos. Este tema constituye actualmente una línea de investigación activa dirigida al desarrollo de nuevos robots y, adicionalmente, enfocada al desarrollo de estrategias de navegación eficientes y con el mínimo riesgo de inutilización.

En primer lugar se desarrolló el robot móvil Lázaro para navegar en este tipo de terrenos, el cual posee un brazo articulado con una rueda como efector final. Esta rueda le permite al brazo mantener un punto de contacto adicional con el suelo que puede ayudar al robot a compensar situaciones de inestabilidad y superar algunos obstáculos que pudieran presentarse en estos entornos.

Posteriormente, se desarrollaron tres medidas cuantitativas que permiten evaluar la navegabilidad de cualquier robot móvil cuando transita sobre terreno irregular. Estas tres medidas son: un índice de estabilidad, el cual evalúa la propensión al vuelco; un índice de direccionamiento, el cual evalúa la disponibilidad del robot para direccionarse y seguir una trayectoria dada y, por último, un índice de deslizamiento, el cual evalúa la propensión del robot a deslizarse hacia abajo cuando se desplaza sobre superficies inclinadas.

Finalmente, se definieron un conjunto de maniobras que puede ejecutar Lázaro y que están dirigidas a garantizar la navegación cuando el robot se desplaza sobre superficies inclinadas o cuando debe superar obstáculos tales como escalones, rampas o zanjas. Todas las estrategias diseñadas se fundamentan en el uso del brazo como herramienta adicional que posee el robot para mejorar su navegabilidad.



# ÍNDICE GENERAL

---

<b>1. Introducción .....</b>	<b>1</b>
1.1 Motivaciones de la tesis.....	1
1.2 Objetivos.....	2
1.3 Marco de realización de la tesis.....	2
1.4 Estructura de la memoria.....	3
<b>2. Robótica móvil sobre terreno irregular.....</b>	<b>5</b>
2.1 Introducción.....	5
2.2 Navegación sobre terreno irregular .....	7
2.2.1 Robots con suspensión .....	9
2.2.2 Múltiples sistemas de tracción .....	12
2.2.3 Cambio de forma.....	14
2.2.4 Movimientos compensatorios .....	17
2.2.5 Robots con su brazo en contacto con el suelo.....	21
2.3 Criterios para evaluar la estabilidad al vuelco.....	24
2.3.1 Margen de estabilidad estática (SSM).....	25
2.3.2 Margen de estabilidad energética (ESM).....	26
2.3.3 Punto de momento cero (ZMP).....	26
2.3.4 Margen de estabilidad fuerza-ángulo (FASM).....	27
2.3.5 Criterio basado en fuerzas de reacción (ZETUF).....	28
2.3.6 Medida de estabilidad momento altura (MHS).....	28
2.3.7 Pirámide de estabilidad .....	29
2.4 Conclusiones.....	30
<b>3. El robot móvil Lázaro .....</b>	<b>31</b>
3.1 Introducción.....	31
3.2 Estructura mecánica.....	32
3.3 Sistema electrónico.....	33
3.4 Cinemática del brazo .....	37

3.4.1	Volumen de trabajo .....	39
3.5	Control de movimiento del brazo .....	40
3.5.1	Sistema de control de la primera articulación .....	40
3.5.2	Sistema de control de la segunda articulación .....	45
3.6	Arquitectura de control.....	51
3.7	Interfaz de usuario .....	55
3.8	Conclusiones.....	58
<b>4.</b>	<b>Navegabilidad de robots móviles sobre superficies inclinadas.....</b>	<b>59</b>
4.1	Introducción.....	59
4.2	Índice de estabilidad al vuelco .....	60
4.3	Índice de direccionamiento.....	70
4.4	Índice de deslizamiento .....	72
4.5	Estrategias para mejorar la navegabilidad de Lázaró .....	74
4.5.1	Análisis y selección de la estrategia a implementar.....	80
4.6	Validación de los índices propuestos .....	82
4.6.1	Efectividad del índice de deslizamiento.....	86
4.6.2	Validación experimental del índice de deslizamiento.....	88
4.7	Pruebas simuladas sobre superficies inclinadas .....	92
4.8	Pruebas experimentales sobre superficies inclinadas .....	95
4.9	Conclusiones.....	100
<b>5.</b>	<b>Maniobras para la superación de obstáculos.....</b>	<b>101</b>
5.1	Introducción.....	101
5.2	Ascenso sobre escalones y rampas de gran inclinación .....	102
5.2.1	Análisis de la estabilidad al vuelco y direccionamiento .....	106
5.2.2	Pruebas simuladas .....	111
5.2.3	Pruebas experimentales.....	115
5.3	Descenso de escalones y rampas de gran inclinación.....	117
5.3.1	Análisis de estabilidad al vuelco y direccionamiento .....	120
5.3.2	Pruebas simuladas .....	125
5.3.3	Pruebas experimentales.....	128

5.4	Desplazamiento sobre una zanja .....	131
5.4.1	Análisis de estabilidad al vuelco y direccionamiento .....	134
5.4.2	Pruebas simuladas .....	134
5.4.3	Pruebas experimentales .....	137
5.5	Conclusiones.....	139
<b>6.</b>	<b>Conclusiones y trabajos futuros .....</b>	<b>141</b>
6.1	Conclusiones.....	141
6.2	Publicaciones derivadas.....	143
6.3	Trabajos futuros.....	145
	<b>Apéndice A. Nueva interfaz de usuario de Lázaró .....</b>	<b>147</b>
A.1	Introducción .....	147
A.2	Ventana principal .....	147
	<b>Apéndice B. Modelado de Lázaró en <i>ADAMS</i>.....</b>	<b>149</b>
B.1	Introducción .....	149
B.2	Fases de modelado .....	149
	<b>Acrónimos .....</b>	<b>155</b>
	<b>Nomenclatura .....</b>	<b>157</b>
	<b>Referencias .....</b>	<b>161</b>



# Capítulo 1

## INTRODUCCIÓN

---

### 1.1 Motivaciones de la tesis

El auge de la robótica móvil en los últimos años ha permitido el desarrollo de una gran cantidad de robots que pueden realizar distintas tareas tanto en entornos estructurados como en aquellos no tan estructurados. Así, los robots móviles son utilizados para realizar operaciones de búsqueda y rescate, exploración planetaria, operaciones de tipo militar y apoyo a actividades de agricultura, entre otras. Todas estas tareas tienen un común denominador: la navegación sobre terrenos irregulares con inclinaciones y obstáculos que deben ser superados por el robot.

De manera que el desarrollo de estas tareas conlleva un riesgo potencial para el robot, ya que éste puede volcarse y quedar inutilizado o simplemente no avanzar en su recorrido al encontrarse con terrenos de difícil navegación. Adicionalmente, el riesgo de vuelco se incrementa cuando el robot ejecuta tareas que incluyen manipulación de cargas pesadas.

Durante los últimos años se aprecia un notable interés a nivel mundial por tratar de solucionar este tipo de problemas. Sin embargo, aun no se ha alcanzado una tecnología lo suficientemente fiable como para disponer de robots con la autonomía

necesaria con objeto de navegar de forma segura y precisa en terreno irregular durante períodos largos y distancias prolongadas.

Por ello, es necesario, en primer lugar, desarrollar estrategias apropiadas que le permitan a los robots móviles navegar sobre ambientes de trabajo tal vez hostiles. Y, en segundo lugar, desarrollar criterios que permitan predecir en qué momento el robot corre el riesgo de quedar inutilizado a raíz de diversos fenómenos como vuelco o deslizamiento, antes de que éstos se hagan inminentes.

## **1.2 Objetivos**

El análisis las motivaciones presentadas permitió trazar los objetivos de esta investigación, los cuales se listan a continuación:

- Diseño, construcción y puesta en marcha de un pequeño robot móvil de ruedas con tracción por deslizamiento que esté dotado de un brazo para el contacto con el suelo.
- Desarrollo de criterios que permitan evaluar la navegabilidad del robot móvil cuando se desplaza sobre terrenos irregulares y utiliza el brazo en contacto con el suelo.
- Diseño y prueba de operaciones conjuntas del brazo con el vehículo para desplazamientos sobre terrenos inclinados y con obstáculos.

A partir de estos objetivos se desarrolló este trabajo de investigación, el cual presenta una solución viable al problema que constituye la navegación de los manipuladores móviles sobre terrenos irregulares.

## **1.3 Marco de realización de la tesis**

Esta tesis está enmarcada dentro de la línea de investigación en robótica móvil que sigue el Departamento de Ingeniería de Sistemas y Automática de la Universidad de Málaga y ha sido apoyada a través del proyecto de la Comisión Interministerial de Ciencia Tecnología (CICYT):

- DPI 2011-22443: Hacia la autonomía en robots de exploración de largo alcance en espacio naturales (RAMBLER). Investigador principal: Dr. Alfonso J. García Cerezo.

Adicionalmente, esta tesis ha sido encuadrada dentro del proyecto de excelencia de la Junta de Andalucía:

- PE-2010 TEP-6101: Navegación autónoma de un robot móvil 4x4 en entornos naturales mediante GPS diferencial y telémetro láser tridimensional. Investigador principal: Dr. Jorge L. Martínez.

Finalmente, ha recibido financiamiento del Decanato de Investigación de la Universidad Nacional Experimental del Táchira a través del proyecto de investigación:

- 01-020-2010: Navegación de un robot móvil sobre terreno irregular con contacto de su brazo con el suelo. Investigador responsable: Ing. Jesús Marcey García.

## **1.4 Estructura de la memoria**

La memoria de la tesis está dividida en 6 capítulos y dos apéndices. Cada capítulo, a excepción del primero y el último, consta de 3 partes fundamentales: una introducción, donde se esbozan los contenidos a tratar, el desarrollo del capítulo y un apartado de conclusiones donde se resumen los contenidos más relevantes.

El Capítulo 1, llamado “Introducción”, tiene como propósito contextualizar el trabajo de tesis, presentar una perspectiva general del tema y fijar el rumbo a seguir durante el desarrollo de la memoria.

El Capítulo 2 lleva por título “Robótica móvil sobre terreno irregular”. En este capítulo, que representa el marco teórico de la memoria, se muestran los distintos tipos de robots utilizados actualmente para navegar sobre terrenos irregulares. Además, se presentan las estrategias que estos robots implementan para mantener su estabilidad y se describen los criterios e indicadores que se utilizan para predecir condiciones de inestabilidad que puedan propiciar el vuelco y la consecuente inutilización del robot.

El Capítulo 3 intitulado “El robot móvil Lázaro” describe el robot diseñado y construido durante el desarrollo de esta tesis. Se incluyen los aspectos del diseño y construcción mecánica y electrónica. Además, se detallan la configuración hardware, sistemas de control y modos de operación.

El Capítulo 4, bajo el epígrafe “Navegabilidad de robots móviles sobre superficies inclinadas”, describe tres índices (estabilidad, direccionamiento y

deslizamiento) que permiten evaluar la navegabilidad de un robot móvil cuando se desplaza utilizando su brazo en contacto con el suelo. Además, se muestran varias estrategias para la navegación del robot. Dichas estrategias son evaluadas de acuerdo a los tres índices diseñados para seleccionar la más apropiada. Finalmente, se describen las pruebas realizadas cuando Lázaro se desplaza sobre superficies inclinadas.

El Capítulo 5, titulado “Maniobras para la superación de obstáculos”, describe algunas maniobras diseñadas para que el robot Lázaro pueda superar obstáculos tales como escalones, rampas o zanjas. Cada maniobra es analizada y evaluada de acuerdo a los índices desarrollados previamente para garantizar el logro exitoso de la maniobra sin que el robot sufra accidentes que limiten su capacidad de desplazamiento y funcionalidad. Adicionalmente, se muestran pruebas experimentales realizadas por Lázaro mientras ejecuta estas maniobras.

Finalmente el Capítulo 6, el cual lleva por título “Conclusiones y trabajos futuros”, permite resumir los logros y aportaciones más relevantes durante el desarrollo de la tesis. Además, se listan las contribuciones obtenidas en términos de publicaciones. Además, se proyectan las distintas actividades que se pudieran desarrollar para continuar esta línea de investigación.

## Capítulo 2

# ROBÓTICA MÓVIL SOBRE TERRENO IRREGULAR

---

### 2.1 Introducción

La utilización de robots móviles ha sido impulsada porque se elimina o se disminuye la limitación de un espacio de trabajo fijo, lo que les permite realizar tareas imposibles para los robots manipuladores e, incluso, trabajos difíciles o imposibles para el hombre [1]. Los robots móviles pueden efectuar tareas de gran complejidad en ambientes de trabajo poco estructurados tales como: exploración en ambientes confinados y peligrosos para la vida humana [2,3,4], exploración planetaria [5,6] y operaciones de búsqueda [7]. Además, la utilización de brazos acoplados a estos robots, les permite ampliar el rango de operaciones que pueden realizar, entre ellas: apoyo en la desactivación de bombas y minas [8], manipulación y traslado de cargas [9], operaciones de búsqueda complejas, las cuales pueden incluir tareas de remoción de escombros y rescate [10], exploración en terrenos de difícil acceso [11,12] y tareas en campos específicos como, por ejemplo, recolección de frutos en la agricultura.

El desarrollo de estos robots que puedan desplazarse sobre terrenos irregulares de manera eficiente ha sido uno de los grandes retos de la robótica móvil durante años. Al respecto, se han desarrollado principalmente tres tipos de sistemas de tracción que por sus características poseen ventajas y desventajas que los hacen útiles o inadecuados de acuerdo a la función que deban cumplir [13].

El mecanismo de tracción por ruedas ha sido el más utilizado por su elevada eficiencia cuando el robot se desplaza sobre terrenos planos y duros; además, permite desplazarse a grandes velocidades. Pero posee dos grandes desventajas: primero, se vuelve ineficiente cuando la rueda desliza sobre terrenos relativamente lisos o, por el contrario, cuando queda atascada en terrenos blandos como la arena. Además, resulta ineficiente para sobrepasar obstáculos mayores que el propio radio de la rueda.

El segundo mecanismo utilizado es la locomoción con patas, en semejanza a organismos biológicos. Estos mecanismos pueden funcionar donde un robot con ruedas es ineficiente, por ejemplo, para sobrepasar obstáculos de cierta altura. Pero esta ventaja está acompañada de algunos problemas: primero, la velocidad de desplazamiento es menor al compararse con los robots de ruedas; segundo, el consumo energético es mayor y, tercero, se requieren mecanismos altamente complejos con muchos grados de libertad (GDL) y control más complicados.

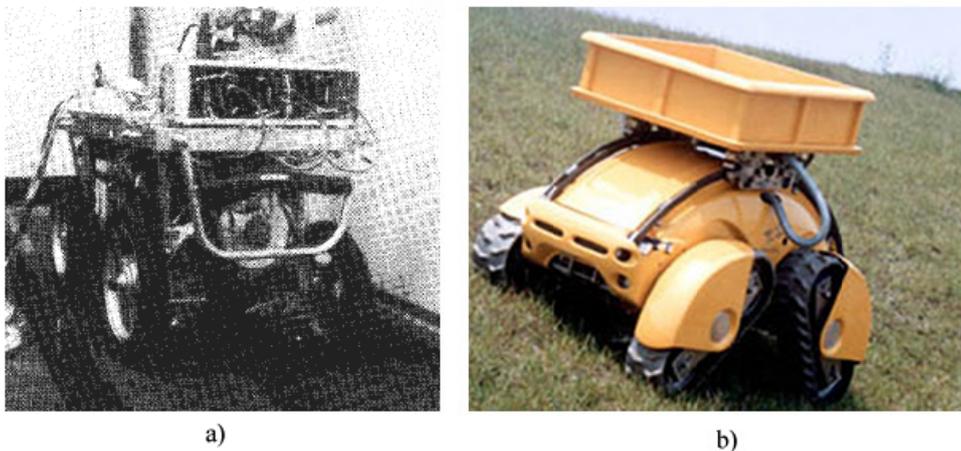
Finalmente, el tercer mecanismo de tracción usado corresponde a la locomoción por orugas. Los robots que utilizan este mecanismo poseen una mayor maniobrabilidad en terrenos blandos debido a una extendida cantidad de puntos de contacto del robot con el suelo (si se comparan con los robots de ruedas). Pero existen tres grandes desventajas: primero, es difícil predecir el centro de rotación del robot, por lo que no es fácil calcular cambios en la rotación y traslación del mismo, ya que esto depende del coeficiente de fricción instantáneo que pueda existir entre la oruga y el suelo; segundo, la fricción acumulada en este mecanismo es mucho mayor, por lo que se requerirán actuadores de mayor par y un amplio consumo de potencia; y tercero, no podrá sobrepasar obstáculos de tamaño mayor al radio de la rueda dentada o polea donde se articula la cadena o correa que conforma la oruga (al igual que las ruedas).

Como se puede percibir, los robots que utilizan solo uno de los tres mecanismos descritos anteriormente sin ningún complemento adicional, probablemente tendrán

algún tipo de inconveniente cuando se desplazan sobre terrenos irregulares que pudieran tener elementos tales como: cambios de pendiente y presencia de obstáculos, por lo que las investigaciones recientes están dirigidas a desarrollar mecanismos de tracción híbridos o el desarrollo de estrategias que le permitan a estos robots desplazarse sobre terrenos irregulares sin perder funcionalidad. En este capítulo se describen las investigaciones recientes respecto al desarrollo de estos robots y las estrategias que utilizan para mantener su condición de estabilidad al vuelco.

## 2.2 Navegación sobre terreno irregular

Hace algunos años se comenzaron a desarrollar robots que pudieran cumplir la función de navegar sobre terrenos irregulares. Un primer intento ocurrió en 1989, con un robot de 4 ruedas el cual poseía un sistema de suspensión activa [14] conformado por un eslabón vertical unido a un resorte y a un servomotor (ver Figura 1a). Esta suspensión se utilizó para controlar la inclinación del vehículo (ángulos *roll* y *pitch*) tratando de mantenerlo en una posición horizontal mientras éste se desplazaba sobre terreno irregular.

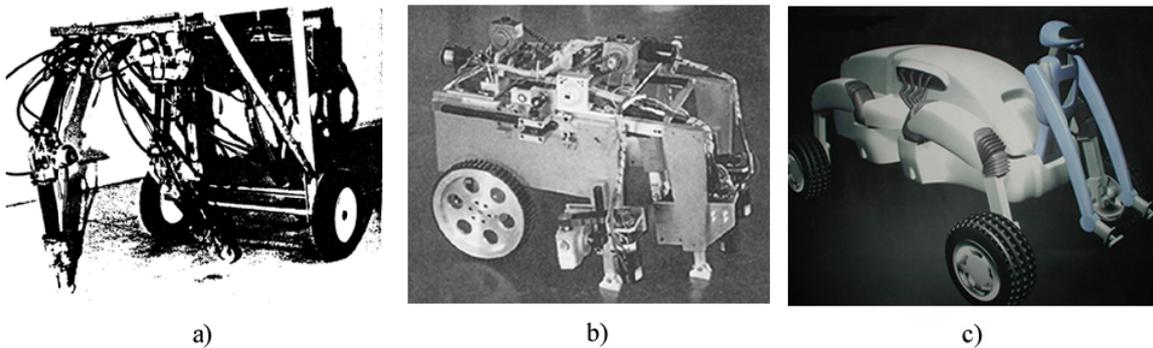


**Figura 1. Primeros robots diseñados para navegación sobre terreno irregular. a) Robot con suspensión activa. b) Taqt carrier.**

En 1992, se desarrolló el robot Taqt Carrier [15], el cual estaba formado por cuatro orugas orientables (dos por cada lado), las cuales le permitían ajustarse a la forma del terreno (ver Figura 1b). Estas orugas estaban unidas al chasis del robot por un eje ubicado en el centro de geométrico de la oruga, lo cual minimizaba el par necesario para orientar la oruga frente a las inclinaciones del terreno. Adicionalmente

poseía una cama para transportar carga que se desplazaba sobre un carril circular de manera que, ante una inclinación ésta se movía hasta llegar a una posición horizontal y, además, permitía la reubicación del centro de gravedad (COG) mejorando la estabilidad del robot.

Por otro lado, en 1995 se desarrolló el robot Sapphyr [16], el cual posee un mecanismo de tracción conformado por dos patas (cada una accionada por pistones neumáticos) y dos ruedas libres que permitían otorgarle estabilidad al robot (ver Figura 2a). Siguiendo este principio, en 1998 se construyó el robot Scarab [17], el cual poseía dos ruedas delanteras, dos pares de patas traseras (2 GDL cada una) y 2 brazos entre las ruedas (1 GDL cada uno). Este robot se diseñó para subir escalones partiendo de los dos brazos que se “enganchan” al escalón levantando el cuerpo del robot, el cual sube ayudado por las patas traseras (ver Figura 2b).



**Figura 2. Robots pioneros con sistemas de tracción compuestos: a) Sapphyr b) Scarab c) Workpartner.**

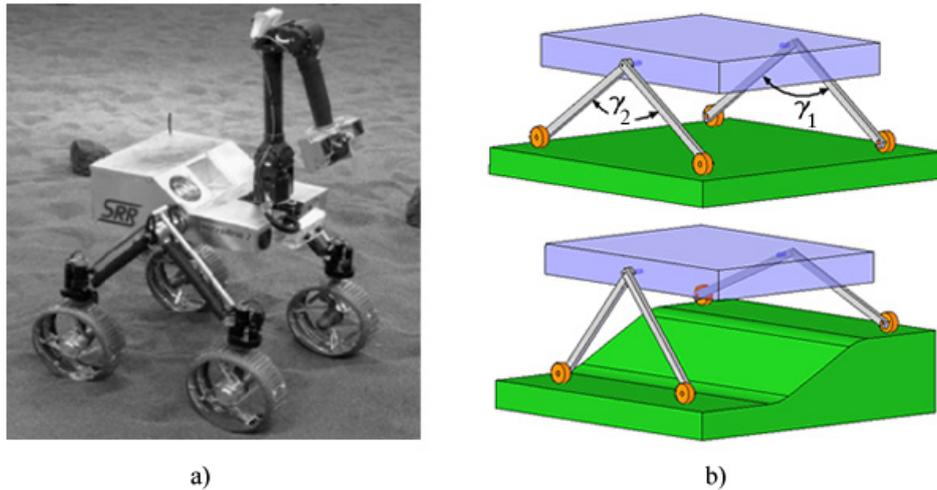
Un último ejemplo de los robots que se pudieran considerar como pioneros en esta área lo constituye el robot Workpartner [18], el cual posee un mecanismo de tracción formado por cuatro patas y cuatro ruedas acopladas en los extremos de las patas (ver Figura 2c). Esta configuración, llamada *Rolking*, permite un avance por rodadura, pero, ante la aparición de un obstáculo pequeño, la pata que lo toca se levanta sobre el mismo por acción del empuje y permite al robot pasar sobre el obstáculo. Adicionalmente, este robot tenía un manipulador formado por un cuerpo de 2 GDL y dos brazos (acoplados a ese cuerpo) de 3 GDL cada uno que terminan con dos garras para manipulación.

Actualmente, los robots que se utilizan para navegar sobre terrenos irregulares han evolucionado de tal manera que existe una gran diversidad de diseños concebidos para alcanzar este propósito de manera exitosa. Se podrían clasificar cinco grupos que se diferencian o por su forma, o por la estrategia que utilizan para enfrentar la navegación sobre terrenos irregulares. Los tres primeros se centran en la estructura del sistema de tracción del robot, mientras que los dos últimos casi son exclusivos de los manipuladores móviles y centran su atención en las estrategias que pudieran implementarse con el brazo acoplado a ellos.

### **2.2.1 Robots con suspensión**

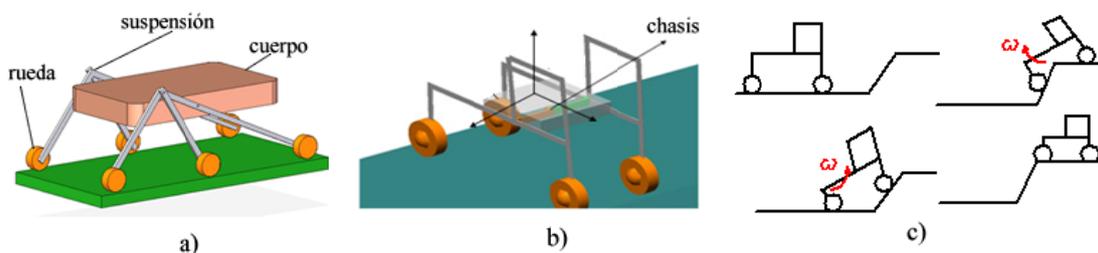
Los robots con suspensión activa incorporan un actuador al sistema de suspensión. Éste añade energía para modificar la respuesta del sistema ante las perturbaciones que provienen del terreno a consecuencia de una irregularidad [19]. El concepto de suspensión activa es aplicable a múltiples mecanismos diseñados e implementados en robots móviles. Uno de estos mecanismos profusamente utilizados se encuentra implementado en los *rovers* (vehículos de exploración espacial), los cuales comúnmente poseen un sistema de tracción conformado por eslabones y ruedas. Los eslabones, por lo general, están acoplados a actuadores que permiten cambiar la orientación de los mismos, logrando una mejor conformidad del robot con la superficie del terreno, lo cual se pudiera traducir en una mayor eficiencia en el desplazamiento sobre el terreno irregular y una mejora en la estabilidad del robot.

Un ejemplo de este tipo de mecanismo lo constituye el robot presentado en [20]. Éste posee un sistema de dos eslabones por cada lado del robot y en el extremo de cada eslabón hay una rueda que entra en contacto con el suelo (ver Figura 3). Este sistema está complementado por un conjunto de actuadores que permiten modificar el ángulo de apertura existente entre los dos eslabones de un mismo lado, lo cual permite, alterar el punto de contacto de la rueda con el suelo pudiendo mejorar la conformidad del robot con el terreno. Además permite ampliar el área del polígono de soporte en aquellos casos donde la estabilidad del robot esté en una condición crítica.



**Figura 3. Jet propulsion Laboratory Sample Return Rover (SRR). a) Robot, b) Estrategia de reposicionamiento.**

Este sistema ha ido evolucionando en el tiempo ante la revolución de la exploración planetaria. Por ello, han surgido nuevos mecanismos como el estudiado en [21]; aquí se presenta un mecanismo análogo al anterior (dos eslabones por cada lado del robot acoplados a un actuador), pero se agrega un tercer eslabón por cada lado del robot llamado “balancín” (ver Figura 4a). Este eslabón adicional posee un sistema diferencial formado por tres eslabones cónicos a través del cual se logra que el robot se adapte constantemente a la forma del suelo. A esta configuración se le llama “suspensión activa auto-adaptativa”. Otro mecanismo de eslabones con actuador se muestra en [22] (ver Figura 4b). En este caso, el actuador ejerce un par que impulsa las ruedas traseras del robot hacia arriba durante el proceso de ascenso sobre un obstáculo, facilitando la subida del robot (ver Figura 4c).



**Figura 4. Mecanismos con suspensión activa: a) Robot con suspensión activa auto-adaptativa, b) rover de 4 ruedas con suspensión activa, c) mecanismo de ascenso del rover mostrado en b).**

Para vehículos más pesados la suspensión activa es más exigente. Este es el caso del vehículo lunar Chariot de la NASA [23] (ver Figura 5a), el cual posee seis sistemas de amortiguación activa (3 por cada lado del robot). Cada sistema está compuesto por dos resortes, dos amortiguadores unidos a dos brazos y un motor con caja de engranajes (ver Figura 5b). El actuador está acoplado en serie después del sistema resorte-amortiguador, lo que le permite regular y absorber vibraciones de baja frecuencia (hasta 1 Hz). Adicionalmente, esta configuración le permite: añadir fuerza a la rueda para asegurar el contacto con el suelo, equilibrar la altura de los seis pares de ruedas para mantener una inclinación y levantar una rueda cuando esté atascada.



**Figura 5. Vehículo lunar Chariot. a) Prototipo, b) Mecanismo de su suspensión activa.**

El robot Sojourner (NASA), posee un mecanismo de suspensión auto-adaptativa [24] (se diferencia de la suspensión activa puesto que no posee ningún actuador) que cuando se enfrenta a obstáculo, se reajusta para amoldarse a la obstrucción por medio de desplazamientos y rotaciones de los eslabones que lo conforman, lo cual finalmente permite al robot superar el obstáculo encontrado (ver Figura 6a). En esta línea también está el *rover* JLUIV-6 descrito en [25], el cual posee una suspensión formada por dos mecanismos de palancas: uno cuadrilátero positivo y otro cuadrilátero negativo (ver Figura 6b). En conjunto, cada lado del robot posee seis palancas unidas a tres ruedas, lo que le permite al *rover* auto-ajustarse a la forma del terreno para superar obstáculos y mantener horizontal el chasis.

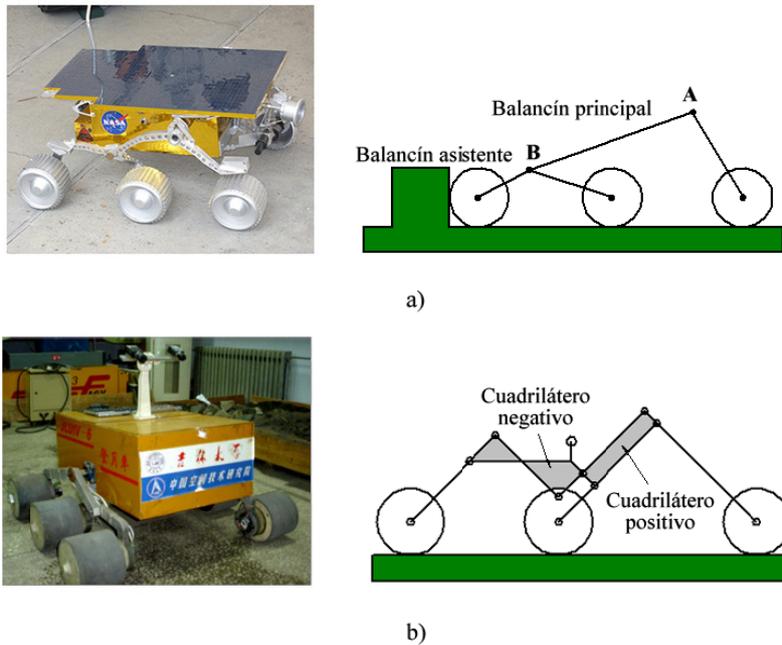


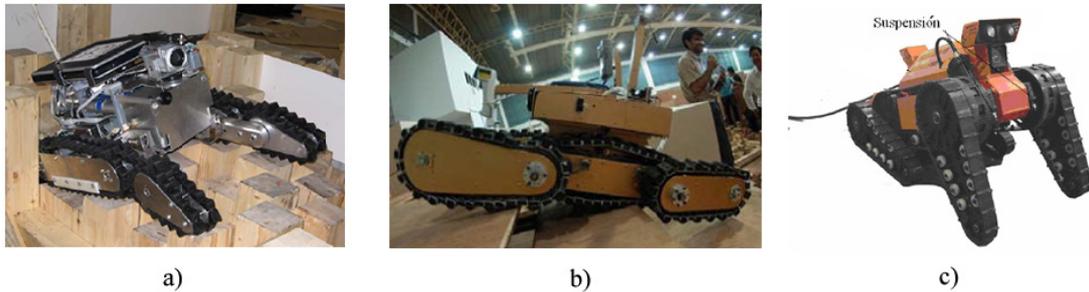
Figura 6. *Rovers* con suspensión auto-adaptativa. a) Sojourner, b) *Rover* lunar JLUIV-6.

## 2.2.2 Múltiples sistemas de tracción

En esta clasificación se incluyen aquellos robots que poseen dos o más mecanismos de tracción (ruedas, patas u orugas), de manera tal que el robot pueda utilizar cualquiera de ellos de manera independiente para desplazarse o una combinación de ellas para lograr el avance sobre el terreno. Este es el caso de tres robots específicos: Resquake [12], Tehzeeb [26] y otro robot descrito en [27] (ver Figura 7). Todos poseen un cuerpo principal traccionado por orugas y cuatro patas que poseen cada una su propia oruga. Pueden desplazarse de dos maneras: a través de sus orugas o por medio de una combinación de orugas y patas, lo cual les permite posicionarse sobre ciertos obstáculos (como escalones) y levantar el robot para sobrepasarlos.

En este mismo grupo está el robot Sherpa [28] (ver Figura 8a), el cual posee un sistema de locomoción híbrida que está formado por cuatro patas con ruedas en sus extremos. Cada pata posee 6 GDL (2 activos, 3 pasivos en la articulación pata-rueda y uno para tracción de la rueda). Este sistema híbrido le permite al robot desplazarse rodando con sus ruedas o caminando con sus patas, aunque sus diseñadores prefieren

utilizar sus patas solo en casos específicos (como sobrepasar un obstáculo o destrabar una pata), ya que el consumo energético del movimiento con las patas es mayor.



**Figura 7. Robots con dos sistemas de tracción. a) Resquake, b) Tehzeeb, c) Prototipo análogo.**

De manera análoga se describe a Octopus [29], el cual posee cuatro patas y ocho ruedas (ver Figura 8b). Cada pata está formada por dos eslabones y dos articulaciones; adicionalmente, posee una rueda en cada articulación. En total, el robot posee 15 GDL de los cuales 14 están motorizados (entre eslabones y ruedas), lo que permite al robot adoptar configuraciones variables ante obstáculos y sobrepasarlos utilizando sus patas, sus ruedas o una combinación de ambas. Este robot puede subir escalones considerablemente altos respecto a su tamaño.



**Figura 8. Robots con sistema de tracción híbrido (patas–ruedas). a) Sherpa, b) Octopus.**

Existen también robots que utilizan los tres mecanismos de tracción como los robots Azimut [30] y Mobit [31]. Ambos poseen 4 patas, 4 ruedas y 4 orugas acoplados en tríos, es decir, sobre una pata está acoplada una oruga y una rueda en el extremo más cercano al chasis del robot (ver Figura 9). Esta configuración permite al robot desplazarse con cuatro modos de locomoción: rodando, caminando, desplazándose con las orugas y un cuarto modo llamado “modo de negociación frente a obstáculos”, el cual

es una combinación de los otros tres (ver Figura 10). En este modo el robot puede, por ejemplo, utilizar algunas de sus ruedas para impulsarse mientras que con algunas de sus patas puede levantar el robot del suelo para salvar algún obstáculo.

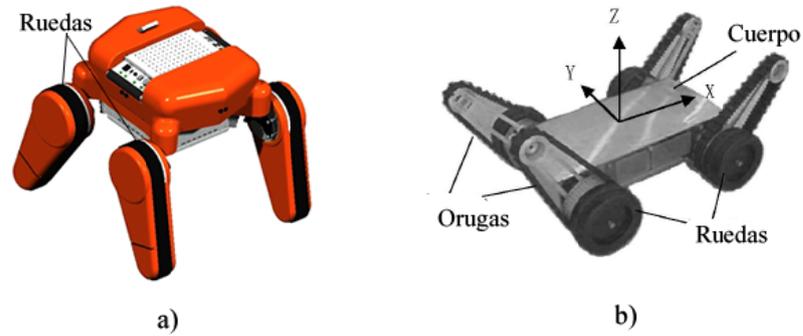


Figura 9. Robots con tres sistemas de tracción. a) Azimut, b) Mobit.

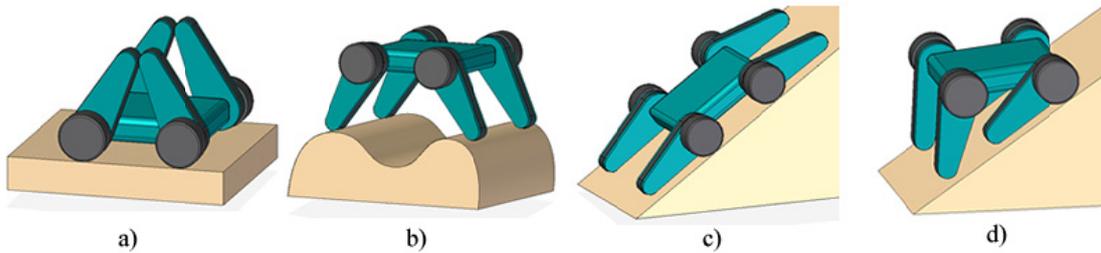
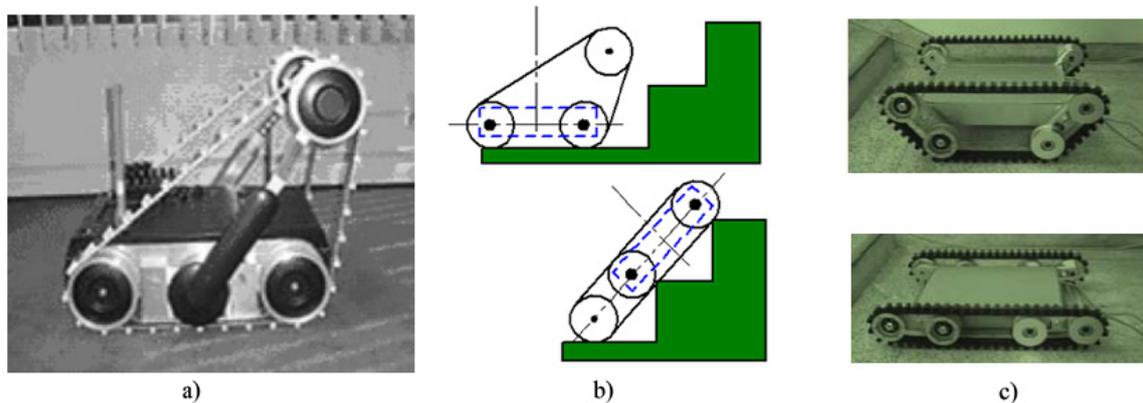


Figura 10. Modos de tracción de los robots Azimut y Mobit: a) rodando, b) caminando, c) desplazándose con las orugas, d) modo de negociación frente a obstáculos.

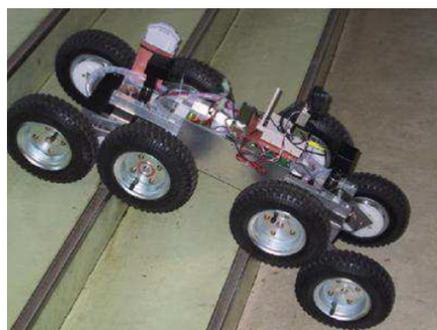
### 2.2.3 Cambio de forma

En esta categoría se pueden incluir muchos robots que estando formados por varias partes unidas entre sí a través de articulaciones, pueden reacomodar estas partes para cambiar su forma y ajustarse a la forma de un terreno irregular para desplazarse sobre él o salvar algún obstáculo. Un primer caso de este tipo de robot se describe en [32,33], donde se muestra el robot de orugas LMA que utiliza un mecanismo llamado “Mecanismo de acoplamiento actuador” (ver Figura 11a). Éste se fundamenta en una banda de deslizamiento con dos ruedas (una motorizada) más un brazo de longitud variable unido a una tercera rueda que se acopla a la banda, lo que permite cambiar la forma de la oruga para cumplir con la tarea de subir y bajar escaleras (ver Figura 11b) de manera óptima disminuyendo el riesgo de vuelco [34].



**Figura 11. Robots con forma de oruga variable. a) Robot LMA, b) Robot LMA subiendo escaleras, c) Robot VSTR.**

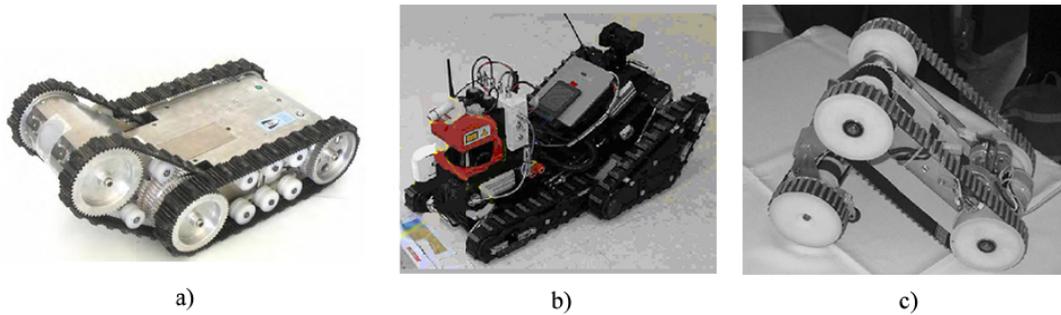
Un robot con características similares llamado VSTR (Variable Single-Track Robot) posee una oruga por cada lado que está acoplada a cuatro ruedas dentadas: dos fijas y dos unidas a un par de brazos con una articulación rotacional cada uno [35]. Estos brazos, al girar, permiten variar la forma de la oruga, pudiendo el robot amoldar su forma frente a un obstáculo para salvarlo (ver Figura 11c). Otro robot que cambia su forma lleva por nombre “Octal Wheel” [36] el cual posee ocho ruedas (ver Figura 12). Cada par de ruedas continuas (ambas traccionadas por un servomotor) están unidas a un brazo (también controlado por un servomotor), de manera que cuando el brazo rota, las ruedas se desplazan hasta lograr una posición deseada de acuerdo a la tarea que se esté desarrollando. Este robot está diseñado para superar obstáculos con forma semejante a escalones.



**Figura 12. Robot Octal Wheel.**

En esta categoría, también se pueden encontrar robots que dividen su cuerpo en dos o más partes, estando unidos entre sí por articulaciones motorizadas o no, que les

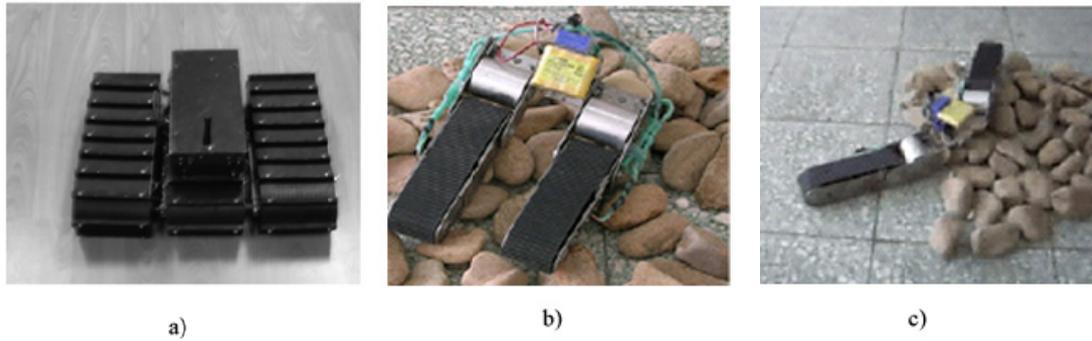
permiten cambiar su forma. En este grupo se pueden mencionar robots tales como Raposa [37] y Robhaz-DT3 [11] (ver Figura 13). Ambos poseen dos cuerpos unidos por una articulación rotacional. En cada cuerpo hay dos orugas (una derecha y otra izquierda), donde las dos orugas de cada lado (una por cada cuerpo) son accionadas por un mismo motor.



**Figura 13. Robots formados por dos cuerpos, a) Raposa, b) Robhaz-DT3, c) Prototipo análogo.**

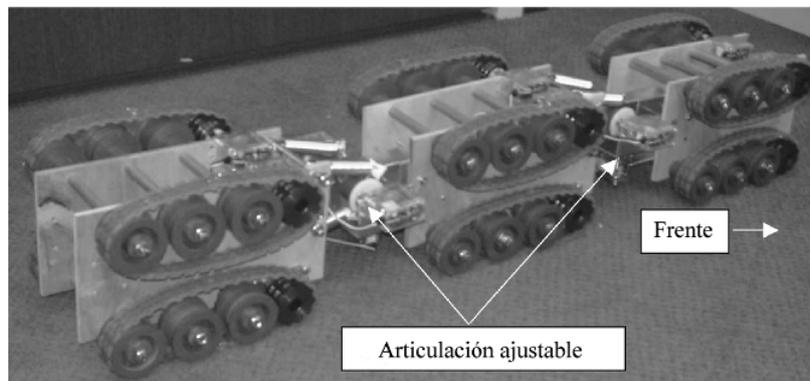
La diferencia fundamental entre estos dos robots consiste en que en Raposa, la articulación rotacional es accionada por un motor, mientras que en Robhaz-DT3, esta articulación está libre y se mueve por efectos inerciales y gravedad. Un tercer robot que se pudiera unir a este grupo se describe en [38] (ver Figura 13c). También posee dos cuerpos unidos entre sí por una articulación rotacional accionada por dos servomotores. Este robot se diferencia con respecto a Raposa en que el cuerpo secundario está traccionado por ruedas en lugar de orugas. Pero en todos los casos, estos robots cambian su forma para ajustarse al terreno y desplazarse sobre él. Cabe destacar que estos robots fueron diseñados principalmente para sobrepasar obstáculos como escalones.

Este grupo no se limita solo a robots con dos cuerpos, existen con tres o más [39]. Por supuesto, cuantos más cuerpos se agreguen al robot, mayores son las configuraciones en el cambio de forma que se pueden lograr. Este es el caso de los robots de la serie Amoeba (A-I y A-II) [40,41,42], los cuales están conformados por 3 cuerpos: uno central y dos laterales que poseen orugas para permitir el desplazamiento del robot (ver Figura 14a). Los 3 cuerpos están unidos por dos articulaciones; en el caso del robot A-I, cada articulación posee 2 GDL mientras que en el robot A-II, cada articulación posee 1 GDL. A través de estas articulaciones especiales, cada robot puede tomar formas distintas entre las que destacan configuración paralela (ver Figura 14b), en línea (ver Figura 14c) y triángulo, que le permiten amoldarse a la forma del terreno.



**Figura 14. Robots de la serie Amoeba. a) A-I, b) A-II en configuración paralela, c) A-II en configuración lineal.**

El caso del robot presentado en [3] se asemeja a una serpiente por su flexibilidad (ver Figura 15). Cada cuerpo de este robot posee cuatro orugas (dos arriba y dos abajo), permitiéndole mayor maniobrabilidad en caso de vuelco o mayor tracción cuando se desplace a través de espacios confinados. Además, los cuerpos están unidos entre sí por una articulación accionada por un motor, pero también posee un sistema de dos resortes que le permiten cierta movilidad a la articulación sin necesidad de la acción del motor. Esta característica le otorga cierta libertad a la articulación para amoldarse al terreno sin necesidad de control.



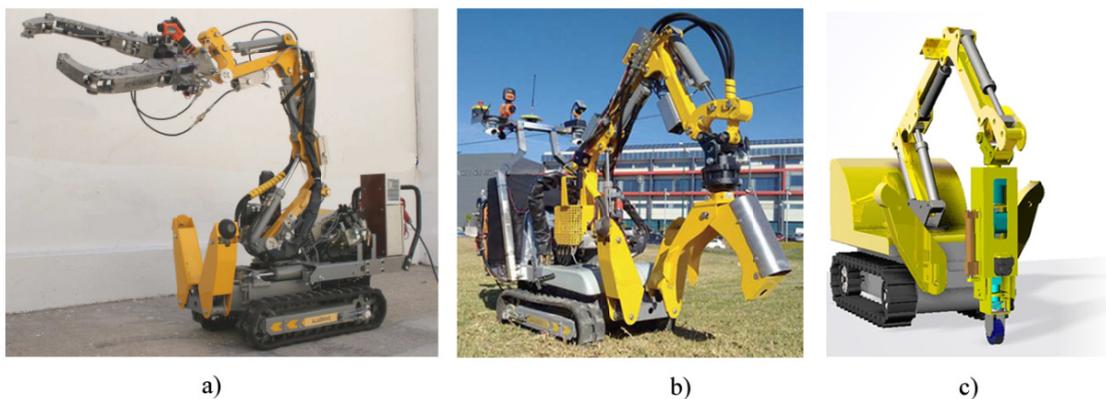
**Figura 15. Robot con múltiples cuerpos tipo serpiente.**

#### **2.2.4 Movimientos compensatorios**

El reposicionamiento del COG es utilizado mayormente por los manipuladores móviles para mejorar su estabilidad al vuelco, aunque no es exclusiva de éstos. Así,

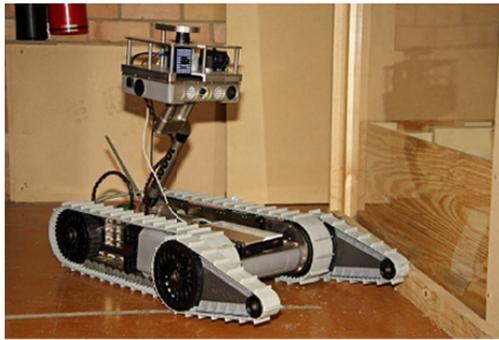
algunos robots móviles sin manipulador también la pueden implementar. Este caso se describe en [43] donde se emplea una masa específica móvil.

Normalmente se busca mantener el centro de gravedad dentro del polígono de soporte usando el manipulador del robot para lograr tal fin. Entre los manipuladores móviles que utilizan esta estrategia se tiene al ya comentado SSR [20] y a Alacrane [44], el cual es un robot de búsqueda y rescate cuyo sistema de tracción está formado por orugas. Además, posee un manipulador con 12 GDL compuesto por un brazo principal y dos brazos adicionales (izquierdo y derecho) acoplados al brazo principal al final de la quinta articulación (ver Figura 16a). También puede acoplarse un remolque para trasladar carga o una fuente adicional de energía [45]. Para desplazarse, el robot lo hace con el manipulador retraído (cerca de la base móvil), lo cual garantiza una posición óptima del centro de gravedad. Pero cuando el robot se desplaza sobre terreno inclinado, se efectúa, como estrategia reactiva, la rotación de la primera articulación del brazo principal, de manera que se desplaza el centro de gravedad a un punto dentro del polígono de soporte donde se mejore la estabilidad al vuelco.



**Figura 16. Robot Alacrane con distintos efectores finales: a) Brazos L-R, b) Garra, c) Rueda.**

Otro robot que utiliza esta misma estrategia se llama iRobot packbot [46], el cual posee un cuerpo principal traccionado con orugas, dos patas acopladas (también con orugas) y un brazo superior sobre el cual están instalados cámaras y sensores para exploración (ver Figura 17). Este robot también puede ser clasificado en la categoría de “robots con múltiples sistemas de tracción”, pero su brazo también realiza una estrategia de reposicionamiento del COG cuando se desplaza sobre terrenos inclinados. En este caso, el brazo solo tiene 1 GDL (hacia adelante o hacia atrás) [47].



**Figura 17. Robot iRobot Packbot.**

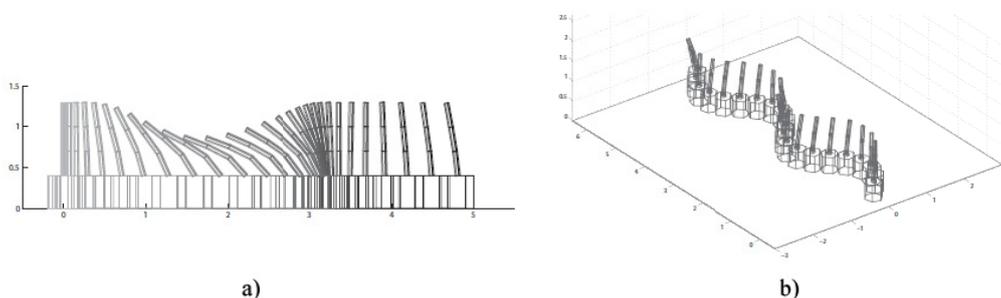
Es importante mencionar que esta estrategia es exitosa dependiendo del criterio que se use para evaluar la estabilidad del robot y del algoritmo que se implemente para ajustar el COG en una posición donde se reduzca la posibilidad de vuelco. Para el cálculo de la posición óptima del COG se pueden utilizar aspectos tales como: velocidad del desplazamiento del robot [48], tipo de obstáculo a enfrentar [49], adhesión del robot al terreno [43], tarea a ejecutar por el efector final y redundancia del brazo [50,51].

La estrategia descrita anteriormente, es útil para robots móviles que se desplazan a bajas velocidades, pero se ha demostrado que la estabilidad al vuelco de robots y manipuladores móviles puede afectarse cuando la plataforma móvil, su manipulador [52] o ambos [53] se mueven a altas velocidades y aceleraciones. Este riesgo se hace mayor cuando el robot transita sobre terrenos inclinados [54], cuando se desplaza sobre una trayectoria curva [55] o cuando se enfrenta a pequeños obstáculos o irregularidades en el terreno [56]. En estos casos, la compensación del COG se hace insuficiente.

Por ello, se desarrolló la estrategia de relevantes movimientos compensatorios, que se fundamenta en realizar actuaciones con las distintas partes del robot a cierta velocidad y aceleración, que puedan contrarrestar una condición de inestabilidad y devolver el robot a una posición estable. Por supuesto, estos movimientos son ejecutados siguiendo algún algoritmo de compensación que toma, como fundamento principal, la evaluación de la “estabilidad dinámica” a través de algún criterio que tenga en consideración los cambios de aceleración y velocidad tanto de la plataforma móvil como de su manipulador, si existe.

Un primer ejemplo está constituido por movimientos compensatorios solo del manipulador [57,58], pero si el brazo está ejecutando una tarea, algunos algoritmos prevén el abandono de la misma para ejecutar los movimientos compensatorios cuando el robot esté experimentando una condición de inestabilidad inminente [59]. En este caso, la estrategia no es totalmente eficiente, ya que, aunque se mejora la estabilidad, obliga al manipulador a abandonar la tarea. Esto se ha resuelto implementando robots móviles con manipuladores redundantes, de manera que el brazo pueda realizar los movimientos compensatorios necesarios sin necesidad de abandonar la trayectoria a seguir por el efector final (tarea). En este caso, los movimientos pueden ser realizados solo por el eslabón redundante [60] o por el brazo en general [61]. Los algoritmos que se utilizan para determinar las posiciones, velocidades y aceleraciones del brazo son complejos y algunos utilizan técnicas inteligentes tales como algoritmos genéticos [60] y sistemas neuro-difusos [62,63].

Un segundo ejemplo se presenta como una combinación de movimientos compensatorios entre el brazo y la plataforma móvil que se ejecutan cuando se llega a una condición de inestabilidad [64]. Un ejemplo de este caso se describe en [65], donde se presenta un control de movimiento de un manipulador móvil que recibe una fuerza externa variable en el efector final, la cual puede causar una condición de inestabilidad. Esta fuerza es compensada por aceleraciones del manipulador y de la plataforma móvil (ver Figura 18): la componente de la fuerza de alta frecuencia, es compensada con aceleraciones del brazo y la componente de baja frecuencia, es compensada por movimientos de la base móvil.



**Figura 18. Ejemplo de movimientos compensatorios del brazo y plataforma presentado en [64]. a) Robot moviéndose sobre una trayectoria recta, b) Robot moviéndose sobre un camino ondulado.**

### 2.2.5 Robots con su brazo en contacto con el suelo

Esta última estrategia ha tenido menor difusión en robótica móvil. Se fundamenta en el uso del brazo en un manipulador móvil que, a pesar de tener alguna función específica, se utiliza adicionalmente para apoyarse sobre el terreno y ayudar al robot a mejorar su estabilidad frente a una condición de vuelco inminente o para ayudarle a superar algún obstáculo. También se pudiera utilizar para retornar un robot volcado a su posición de correcto funcionamiento apoyando el brazo y ejerciendo una fuerza controlada a través de él [66]. Cabe destacar que este apoyo adicional se realiza en la mayoría de los casos con un efector final diseñado para tal fin.

El primer ejemplo que se puede mencionar es el robot Fuma [67] (ver Figura 19), el cual es un robot de cuatro ruedas que posee un brazo con 1 GDL; este brazo se utiliza para alojar tres cámaras y otros sensores que usa el robot para realizar operaciones de búsqueda. Adicionalmente el brazo, que logra girar hasta  $\pm 90^\circ$  desde la posición horizontal, puede ser presionado contra el suelo para empujar al robot y ayudarlo a sobrepasar obstáculos (consigue sobrepasar obstáculos de hasta 31 cm siendo el radio de sus ruedas 15 cm).

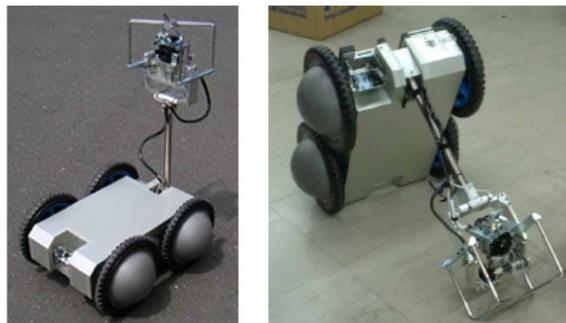


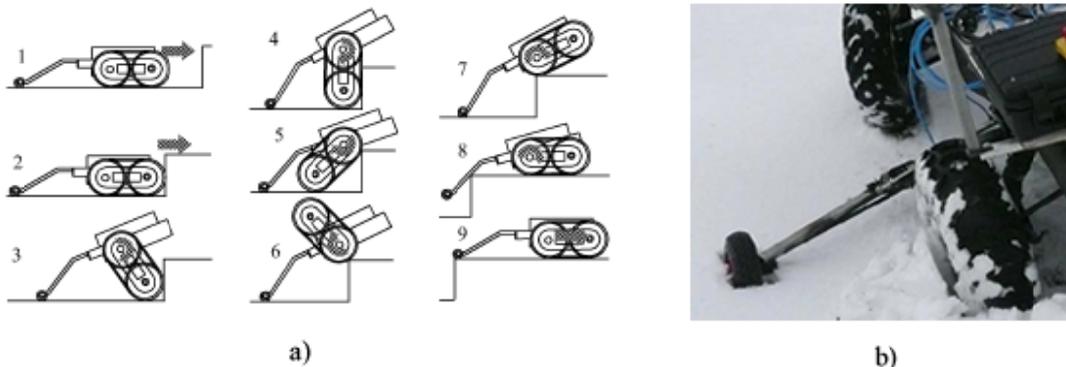
Figura 19. Robot Fuma.

Otro robot que cabe mencionar es Alacrane [68,69], el cual ya se describió anteriormente, pero en este caso, se exhibe con un nuevo efector final, el cual consiste en una gran garra que sustituye los dos brazos secundarios que estaban acoplados a su brazo principal. Este nuevo efector le permite manipular objetos de hasta 300 mm de tamaño y por su robustez, puede ser presionada contra el suelo en operaciones que el robot realiza para sobrepasar obstáculos (ver Figura 16b).

En estos dos robots, el brazo puede tocar el suelo pero, por las características del efector final, este contacto no puede ser continuo mientras el robot se desplaza, puesto que podría deteriorar las piezas que tocan el terreno (por ejemplo, el caso de la garra de Alacrane). Por ello, algunos investigadores ha optado por colocar una rueda como efector final del brazo que entrará en contacto con el suelo, ya que con este elemento, se permite un contacto rodante y constante del brazo con el terreno.

Un ejemplo de este tipo de robot se describe en [70], donde se muestra un robot de orugas con un mecanismo que permite al sistema de tracción (bandas, poleas y estructura que las soporta), girar alrededor del chasis del robot. Adicionalmente, posee un pequeño brazo con una rueda como efector final (ver Figura 20a). Dicho brazo se apoya contra el suelo durante una operación diseñada para superar obstáculos del tipo escalón. En esta operación el brazo se desplaza mientras está en contacto con el suelo, lo cual justifica la presencia de la rueda como efector final.

Este mismo caso se presenta en un vehículo todo terreno que ha sido modificado para convertirse en un vehículo autónomo no tripulado [71]. Adicionalmente, a dicho vehículo se le colocaron “estabilizadores laterales”, los cuales consisten en dos brazos de 1 GDL cada uno, cuyo efector final es una rueda. Cuando el sistema detecta una condición de inestabilidad (de acuerdo a un criterio establecido) que propicie un vuelco lateral, estos estabilizadores son desplegados apoyándose sobre el suelo para evitar el vuelco (ver Figura 20b).



**Figura 20. Robots móviles con acabado en rueda.**

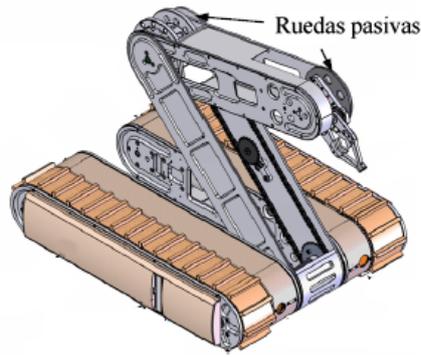
De acuerdo a lo descrito, el brazo de estos robots solo es útil para el contacto con el suelo, pero no podría realizar ninguna otra operación. Por ello, otros robots han sido diseñados con un efector final para manipulación y se les han colocado ruedas de manera estratégica en algún lugar del manipulador, lo cual les permite tener un brazo que pueda cumplir múltiples tareas: manipular y establecer el contacto con el suelo para mejorar la estabilidad.

Este es el caso de los robots de la serie Helios (VII[7], VIII [72] y IX [73]). Estos robots de orugas poseen un brazo cuyo efector final es una garra, pero en alguna articulación intermedia del brazo poseen ruedas pasivas (ver Figura 21a), de manera que pueden colocar el brazo en contacto con el suelo a través de estas ruedas en situaciones tales como: subir escaleras, sobrepasar obstáculos de gran altura y recobrar su posición normal después de un vuelco (ver Figura 21b).



**Figura 21 a) Robot Helios IX. b) Robots Helios realizando operaciones con el brazo en contacto con el suelo.**

En el mismo estilo que los robots Helios, en [74,75] se describe un robot formado por dos orugas y un brazo con dos eslabones más un efector final. Este robot posee la particularidad de que un eslabón del brazo puede ser incorporado dentro de otro eslabón, y este último puede incorporarse en medio de las dos orugas para formar una sola plataforma móvil. Adicionalmente, el brazo cuenta con dos ruedas pasivas en cada articulación, lo cual le permite al brazo entrar en contacto con el suelo para mejorar la estabilidad del robot y sobrepasar obstáculos (ver Figura 22).



**Figura 22. Robot móvil con ruedas pasivas en dos articulaciones del brazo.**

Por último, cabe mencionar nuevamente al robot Alacrane, ya que se diseñó, aunque no se construyó, un nuevo efector final para este robot [76,77], el cual se acopla al brazo principal una vez retirados los dos brazos secundarios. Este nuevo efector permite intercambiar de manera automatizada entre una garra y una rueda (ver Figura 16c), lo cual permitiría a Alacrane efectuar tareas de manipulación y, adicionalmente, realizar operaciones para mejorar su estabilidad y superar obstáculos colocando la rueda en contacto con el suelo.

### **2.3 Criterios para evaluar la estabilidad al vuelco**

Los robots descritos anteriormente ejecutan diferentes estrategias con el fin de compensar alguna condición de inestabilidad, por lo que es importante cuantificar cuándo existe ese momento de inestabilidad con el propósito implementar la estrategia que permitirá al robot salvar esa situación. Para ello, se han desarrollado, en el transcurso de los años, algunos índices que permiten predecir los momentos de inestabilidad cuando un robot se desplaza sobre una superficie. Cada uno de ellos mide la estabilidad del robot móvil tomando en consideración algunas características específicas, por lo que, de acuerdo al tipo de robot y tomando en cuenta las condiciones de operación, se deberá elegir uno u otro criterio que permita predecir con mayor exactitud las situaciones de inestabilidad que pueda experimentar el robot [78]. A continuación se describen los índices más utilizados en robótica móvil.

### 2.3.1 Margen de estabilidad estática (SSM)

Esta medida de estabilidad estaba diseñada originalmente para robots con patas que se desplazaban sobre un plano horizontal. Se fundamenta en el principio dado por McGhee y Frank [79], que define un polígono de soporte como el área convexa cerrada cuyos vértices están formados por los puntos de contacto de las patas con el suelo. Se afirma que, si la proyección vertical del COG de la máquina está contenida dentro del polígono de soporte, la máquina tendrá estabilidad estática. En consecuencia, se definió el índice SSM como la mínima distancia desde los bordes del polígono de soporte a la proyección vertical del COG.

Adicionalmente, se definió el “Margen de estabilidad longitudinal” (LSM) como la mínima distancia desde el borde frontal o trasero del polígono de soporte a la proyección vertical del COG. Nótese que este margen solo toma en consideración los bordes frontal y trasero del polígono y omite los bordes laterales; ésto tomando en consideración que la pérdida de estabilidad en las máquinas con patas es crítica en el sentido de avance.

En [80], el LSM fue redefinido específicamente al modificar la definición del polígono de soporte puesto que antes solo consideraba el desplazamiento de robots sobre un plano horizontal. Ahora el polígono de soporte consideraba el desplazamiento sobre superficies inclinadas, por lo que se definió como el área convexa cerrada cuyos vértices están formados por la proyección vertical de todos los puntos de contacto de la máquina con el suelo.

Como se puede observar, en la definición del LSM solo se tomaba en consideración los bordes frontal y trasero del polígono de soporte por su criticidad en máquinas con patas, pero, considerando que muchos robot móviles puede volcar de manera lateral, mayormente se utiliza el SSM pero considerando la definición del polígono de soporte sobre planos inclinados [44]. Por último es importante acotar que, este índice, por ser netamente geométrico, no toma en cuenta los efectos dinámicos e inerciales como aceleraciones, por lo que solo permite evaluar la “estabilidad estática”, limitando su uso solo para robots que se desplazan a bajas velocidades. Otra desventaja que presenta este índice es su insensibilidad a la aplicación de fuerzas externas sobre el robot.

### **2.3.2 Margen de estabilidad energética (ESM)**

Para su definición es necesario definir la “frontera de soporte”, la cual está formada por todos los segmentos de línea que conectan los puntos de contacto del robot con el suelo [81]. Nótese que en este caso, la frontera de soporte no necesariamente es un plano, sino una superficie. En segundo lugar, se debe definir el nivel de estabilidad energética, el cual es la energía potencial requerida para rotar el COG del robot alrededor de un borde de la frontera de soporte hasta la posición donde la proyección vertical del COG toque ese borde de frontera. Una vez evaluados todos los niveles de estabilidad energética correspondientes a todos los bordes de la frontera de soporte, se define el ESM como el mínimo de entre todos los evaluados. Si el ESM se hace menor que cero, el robot volcará.

Esta primera formulación, solo tomaba en consideración el efecto de la proyección vertical del COG, por lo que en [82] se modificó el criterio para tomar en cuenta el efecto de cargas inerciales, momentos y otras fuerzas no conservativas del exterior. Ahora, no solo se calcula el trabajo producido por las fuerzas conservativas para girar el COG alrededor de un borde de la frontera, también se hace el mismo cálculo para todas las fuerzas no conservativas. Finalmente, se define el nivel de estabilidad energética para cada borde como la diferencia entre los dos trabajos calculados, y el ESM como el mínimo de entre todos los niveles de estabilidad energética correspondientes a todos los bordes de la frontera de soporte.

### **2.3.3 Punto de momento cero (ZMP)**

Originalmente se definió sobre un plano horizontal (situado sobre el terreno) donde yacen todos los puntos de contacto del robot con el suelo [83]. Estos puntos forman un área convexa llamada región estable. El ZMP se define como aquel punto sobre este plano horizontal donde el momento resultante producto de la gravedad, fuerzas inerciales y fuerzas externas es igual a cero. Si el ZMP está situado dentro de la región estable, el robot también es estable. Es importante acotar que, aunque ZMP se definió sobre un plano horizontal, en [54] se demuestra que el criterio es aplicable en robots que se desplazan sobre superficies inclinadas tan solo con definir la región estable y el ZMP sobre el plano inclinado en el cual se mueve el robot en lugar de ser definidos sobre el plano horizontal.

Adicionalmente, se define el “grado de estabilidad” como un parámetro cuantitativo para estimar la estabilidad dinámica del robot. Este es el cociente entre la mínima distancia del ZMP a un borde de la región estable dividido entre la máxima distancia del ZMP a un borde de la región estable cuando el robot está en la posición más estable. El grado de estabilidad varía entre 0 y 1, por lo que, cuando este grado tienda a cero, el robot estará en riesgo de volcadura inminente.

#### **2.3.4 Margen de estabilidad fuerza-ángulo (FASM)**

Esta medida originalmente permite calcular la estabilidad dinámica de un robot móvil tomando en consideración las cargas inerciales, altura del COG y cargas externas [84]. Para su definición, es importante especificar un eje de vuelco, que es una recta definida por dos puntos de contacto consecutivos del robot con el suelo. Un robot tendrá “ $n$ ” ejes de vuelco cuya cantidad será igual a la cantidad de puntos de contacto que posea el robot con el suelo.

Por cada eje de vuelco, se calcula el ángulo entre la recta normal al eje (la cual debe pasar por el COG) y el vector de fuerzas resultante que actúan sobre el robot, cuyo origen es el COG (se consideran todas las fuerzas que actúan en el vehículo menos las fuerzas de reacción con el suelo). Una vez calculados estos ángulos, se define esta medida para cada eje de vuelco como el producto de dos parámetros cuantificables: el primero es el ángulo calculado y el segundo es el módulo del vector de la fuerza resultante que pasa por el COG.

Finalmente, se define el FASM global como el mínimo entre las medidas calculadas para cada eje de vuelco. Si esta medida tiende a cero, el robot será inestable por dos posibles razones: si el mínimo ángulo calculado tiende a cero, el robot está experimentando una condición de vuelco inminente [85]; pero, si la fuerza resultante tiende a cero, el robot es inestable puesto que cualquier perturbación podrá derribar al vehículo.

En [86], esta medida fue reformulada puesto que se agregó un tercer elemento que multiplica a los dos parámetros previamente descritos cuando se calcula el FASM para cada eje de vuelco. Este tercer elemento es la distancia entre una normal al vector de fuerzas resultantes ya calculado y el eje de vuelco. Este parámetro adicional permite

considerar una condición de inestabilidad adicional que ocurre cuando esta distancia tiende a cero, lo cual sucede cuando el COG tiende a situarse sobre el eje de vuelco. Esta condición es poco frecuente y podría ocurrir cuando un robot móvil posea una gran masa en su manipulador. Esta medida puede ser normalizada cuando se divide entre la medida tomada para un robot en su condición más estable sobre un plano horizontal [87].

### **2.3.5 Criterio basado en fuerzas de reacción (ZETUF)**

Este criterio presentado en 2003 [58] y posteriormente llamado ZETUF [88], toma en consideración la formulación de Newton para calcular las fuerzas de reacción de los puntos de contacto del robot con el suelo. En el caso de robots con tres ruedas, se considera el robot estable mientras las tres fuerzas de reacción sean mayores a cero; cuando una tiende a cero, el robot está experimentando una condición de inestabilidad y vuelco inminente. En robots con más de tres puntos de contacto con el suelo se define un eje de vuelco, el cual es la línea que une dos puntos de contacto consecutivos del robot con el suelo. Una vez definidos los ejes de vuelco, es posible calcular la suma de fuerzas de reacción sobre cada eje utilizando la formulación de Newton [62]. Si la suma de fuerzas de reacción sobre un eje tiende a cero, el robot está en peligro de vuelco inminente.

Este criterio es sensible a las cargas inerciales, aceleraciones y efectos de cargas externas ejercidas sobre el robot [89]. Por último, cabe mencionar que, a partir de este criterio, se han desarrollado formulaciones que normalizan esta medida bajo un índice que permite evaluar cuantitativamente el riesgo de inestabilidad [90].

### **2.3.6 Medida de estabilidad momento altura (MHS)**

Esta medida de estabilidad fue presentada en 2006 [91,92] y está diseñada principalmente para su uso en manipuladores móviles. Toma en consideración los efectos de cargas externas, fuerzas inerciales y la altura del COG. También ha sido utilizada para definir la estabilidad de robots con suspensión [93]. Para su cálculo se define un polígono de soporte como el área convexa cuyos vértices son los puntos de contacto del robot con el suelo. Adicionalmente, se efectúa una separación virtual entre

el manipulador y la plataforma móvil, sustituyendo el manipulador por las fuerzas y momentos que éste genera (ubicados en el punto de acoplamiento).

Una vez definidos estos parámetros previos se calcula para cada arista del polígono de soporte un producto de dos factores: primero, el momento resultante de las fuerzas y momentos ejercidos por el manipulador luego de haber sido trasladados a la arista estudiada; y, segundo, el momento de inercia de la base respecto a la arista en cuestión. Después de haber realizado este cálculo para cada arista, se obtiene el MHS como el mínimo producto de entre los calculados, multiplicado por la altura del COG. Finalmente, esta medida puede ser normalizada dividiéndola entre el MHS obtenido para una condición considerada como “nominal”. Si esta medida tiende a cero, el robot está llegando a una condición de vuelco.

### **2.3.7 Pirámide de estabilidad**

Este criterio fue presentado en el año 2006 [40,94], con el propósito de disponer de una medida de estabilidad especialmente aplicable a robots cambiantes de forma. Como indica su nombre, este criterio se fundamenta en una pirámide: la base está formada por un polígono convexo formado por los puntos de contacto más externos que posee el robot cuando está en contacto con el suelo; es decir, el polígono no necesariamente posee como vértices a todos los puntos de contacto, solo aquellos que forman el polígono más grande posible, quedando los puntos de contacto restantes dentro del polígono formado; esta definición es especialmente útil para robots cuya forma cambia en el tiempo. Todas las aristas del polígono formado son llamadas ejes de vuelco. Adicionalmente, el vértice superior de la pirámide está conformado por el COG del robot.

En primer lugar, se calcula para cada eje de vuelco, el ángulo entre la recta normal al eje (la cual debe pasar por el COG) y el vector de fuerzas resultante que actúan sobre el robot, cuyo origen es el COG (se consideran todas las fuerzas externas, fuerzas inerciales y gravitatorias que actúan en el vehículo menos las fuerzas de reacción con el suelo). Adicionalmente, para cada arista de altura (formada por la unión entre un vértice de la base y el vértice superior de la pirámide) se calcula el ángulo formado entre la arista en estudio y el vector de fuerzas resultantes con origen en el

COG. Una vez conocidos estos ángulos, se toma el mínimo entre ellos; si este tiende a cero, el robot está a punto de volcarse.

## **2.4 Conclusiones**

En este capítulo se describieron los distintos tipos de robots que se han diseñado para navegar sobre terrenos irregulares. En cada tipo de robot estudiado, se muestran las características físicas con las que se construyeron, las cuales propician una mejora en su navegabilidad y una mayor efectividad para superar obstáculos o enfrentar situaciones que puedan comprometer su estabilidad. Además, en algunos casos, se estudiaron diferentes estrategias que los robots móviles pueden utilizar (en especial los manipuladores móviles) para contribuir a la mejora de su navegabilidad sobre terrenos irregulares. En este aspecto, se debe resaltar que la estrategia de “Brazo en contacto con el suelo” que utilizan algunos manipuladores móviles, constituye un interesante campo de investigación, puesto que son pocos los robots que utilizan esta estrategia, la cual es altamente útil para superar con éxito algunas situaciones específicas que pueden propiciar condiciones de inestabilidad en estos robots.

Adicionalmente, se presentaron siete de los criterios que comúnmente se utilizan para evaluar la estabilidad de los robots móviles cuando se desplazan sobre terrenos irregulares. Además de describir los criterios, se especificó el tipo de estabilidad que evalúan (estática o dinámica) y los tipos de cargas que consideran (gravitatorias, inerciales y externas). Se debe indicar que, de estos criterios, el “Margen de estabilidad longitudinal” (LSM) es el menos general, ya que considera la menor cantidad de variables que pueden influir en la estabilidad de un robot, y solo se debe utilizar en condiciones muy específicas donde se requiera evaluar solo la estabilidad estática.

## Capítulo 3

# EL ROBOT MÓVIL LÁZARO

---

### 3.1 Introducción

En el capítulo anterior se hizo énfasis en la estrategia utilizada por algunos manipuladores móviles que colocan su brazo en contacto con el suelo para mejorar su estabilidad y evitar el vuelco. Adicionalmente, se comentó que esta estrategia ha sido poco implementada, por lo que es un área de investigación potencial. En función de estas premisas, se desarrolló a Lázaro en Venezuela, el cual es un pequeño robot móvil con un brazo diseñado especialmente para propiciar un punto adicional de contacto con el suelo (ver Figura 23). En este capítulo se describen en detalle los componentes de este robot.

Específicamente, se aborda la descripción de la estructura mecánica así como los componentes electrónicos destinados a percepción, comunicación y control. Posteriormente, se revisan las características de funcionamiento de este robot, en cuanto a su cinemática, arquitectura de control y modos de operación. Finalmente, se hace una descripción de su interface de operación.



**Figura 23. Robot Lázaro.**

### **3.2 Estructura mecánica**

El diseño mecánico del robot Lázaro estuvo delimitado por las siguientes premisas de diseño: Primero, un tamaño y masa apropiados que le permitiera sobrepasar obstáculos con una altura semejante a la de un escalón. Segundo, un brazo con la mínima cantidad de articulaciones y un efector final que le permitiera al robot mantener un punto de apoyo adicional con el suelo. Tercero, un sistema de tracción apropiado para su desplazamiento sobre terrenos irregulares duros con pendientes de hasta 20°.

A partir de estas condiciones se diseñó Lázaro con las siguientes características mecánicas [95]:

- Masa de 26 Kg y dimensiones especificadas en la Figura 24.
- Sistema de tracción diferencial por deslizamiento (*skid steer*) compuesto por cuatro ruedas (dos por cada lado). Las dos ruedas del mismo lado son traccionadas por un motor DC de 24V con caja de engranes planetarios que entrega un par de 12.5 N.m., el cual se transmite y distribuye a las dos ruedas a través de un sistema de poleas y bandas de sincronización. Cada rueda posee amortiguación pasiva compuesta por un sistema resorte-amortiguador (de aire) y un eslabón de aluminio acoplado al chasis a través de una articulación rotacional pasiva, el cual permite a la rueda (acoplada en

el otro extremo del eslabón) pivotar verticalmente para amoldarse a pequeñas irregularidades del terreno (ver Figura 24).

- Brazo con dos articulaciones: La primera es rotacional e impulsada por un actuador compuesto por un motor DC de 24 V y una caja de engranajes, cuyo último engrane está acoplado al primer eslabón del brazo generando un par máximo de aproximadamente 100 N.m (a rotor bloqueado). La segunda articulación es prismática y es movida por un actuador lineal de 12 V: Posee una carrera de 0.30 m y genera una fuerza máxima de 151.24 N, suficiente para levantar un lado del robot cuando se requieran ejecutar operaciones para superar obstáculos. Adicionalmente, el brazo posee como efector final una rueda pivotante de 32 mm de diámetro que permite el contacto constante y rodante del robot con el suelo (ver Figura 24).

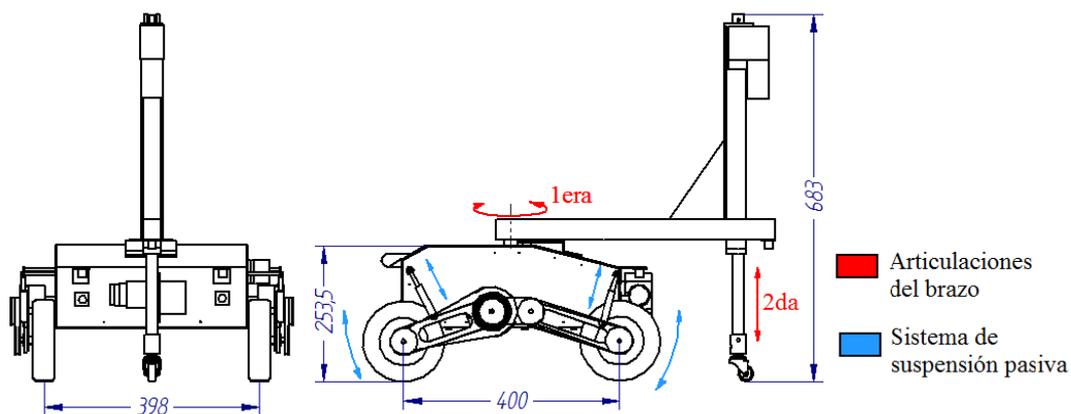


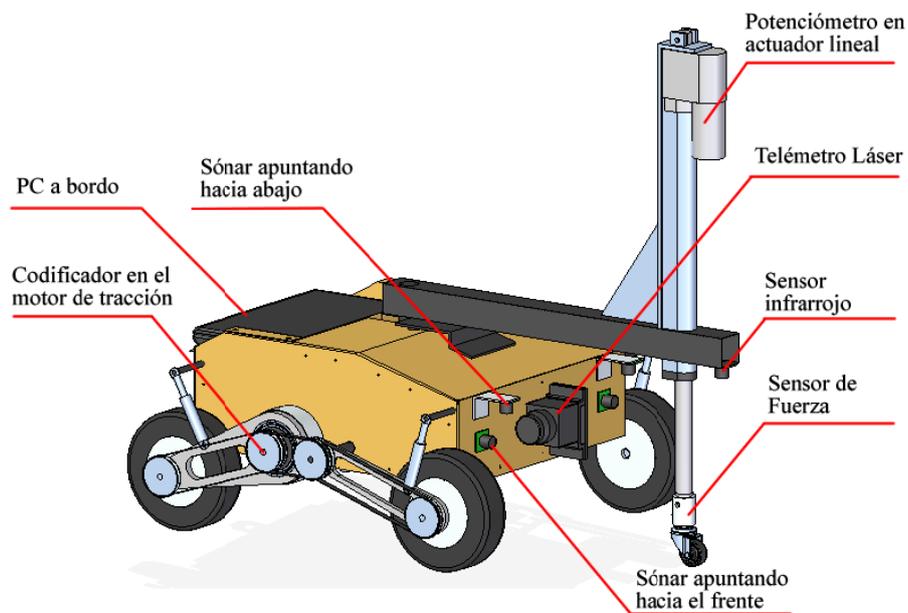
Figura 24. Dimensiones características del robot LázarO en mm.

### 3.3 Sistema electrónico

La estructura electrónica está compuesta por elementos de medición y percepción (sensores), de comunicación y de control. A continuación se listan los sensores utilizados en LázarO (ver Figura 25):

- Codificadores incrementales acoplados a los motores de tracción con una resolución de 48 pulsos por vuelta.
- Codificador absoluto de 10 bits de resolución unido a la primera articulación del brazo para medir el ángulo de rotación del primer eslabón del mismo.

- Potenciómetro alojado dentro del actuador lineal de la segunda articulación del brazo, destinado a medir el desplazamiento longitudinal del segundo eslabón del brazo.
- Unidad de medición inercial (IMU) destinada a medir los ángulos *roll*, *pitch* y *yaw* del robot.
- Sensor infrarrojo con un rango de medición de 0.1 a 0.8 m, ubicado al final del primer eslabón del brazo y dirigido hacia abajo con el propósito de medir la distancia hasta el suelo.
- Sensor de fuerza resistivo con un rango de medición de 0 a 98 N, el cual está ubicado en el acoplamiento entre el extremo del actuador lineal del brazo y el efector final (rueda): Destinado a medir la fuerza de reacción que se genera cuando el efector final del brazo toca el suelo.
- Cuatro sónares con un rango de medición de 0.15 a 6.45 m, ubicados en la parte frontal del chasis: dos dirigidos hacia el frente para detectar obstáculos situados delante del robot y dos dirigidos hacia abajo para detectar posibles zanjas o depresiones en el terreno y medir su profundidad.



**Figura 25. Sensores instalados en Lázaró.**

- Telémetro 2D marca Hokuyo URG-04LX-UG01, el cual posee un campo de vista de 240°, una resolución angular de 0.36° y un alcance máximo de 4 m. Este sensor está ubicado al frente de chasis robot y realiza el barrido laser de manera vertical, con lo cual se puede: detectar obstáculos ubicados frente al robot, estimar su posición y dimensionar el obstáculo. Este telémetro también puede ubicarse sobre el chasis del robot para realizar barridos horizontales que se pueden utilizar en un sistema de SLAM [96].

Además de los sensores, se utilizan seis módulos XBEE como elementos de comunicación inalámbrica entre el robot y un ordenador remoto. Estos módulos poseen una potencia de salida de 1 mW, lo que les permite transmitir a una distancia máxima de 100 m (sin obstáculos) a una velocidad de 250 kbps. Adicionalmente, se utilizan dos módulos XBEE para la comunicación entre el ordenador remoto y, el *Joystick* inalámbrico utilizado para teleoperación.

Los elementos destinados a propiciar el procesamiento de datos y control de los actuadores en el robot son:

- Tarjeta de fabricación propia conformada principalmente por dos microcontroladores PIC16F877A. El primero está destinado a recolectar y codificar la información percibida por los sensores (salvo el telémetro láser) para ser enviada al ordenador remoto. El segundo microcontrolador está destinado a recibir las consignas de actuación provenientes del ordenador y decodificarlas para ser enviadas a las tarjetas controladoras de los actuadores.
- Tarjeta controladora de motores TReX Jr DMC02: Permite controlar dos motores DC con un rango de tensión de 5-24 V y con una corriente máxima de 2.5 A (de manera continua) que pudiera alcanzar los 5 A (en picos). Se instalaron dos tarjetas: la primera para los dos motores de tracción y la segunda para el actuador de la primera articulación del brazo.
- Tarjeta controladora de motores TReX DMC01: También permite controlar dos motores DC pero con un rango de tensión de 6-16 V y con una corriente máxima de 13 A (de manera continua) que pudiera excederse hasta los 30 A (en picos). Se

utilizó esta tarjeta para el control del actuador lineal ubicado en la segunda articulación del brazo, puesto que éste posee mayores requerimientos de corriente.

- Tarjeta de alimentación, la cual toma la energía de un par de baterías de 12 V/7 Ah, para transformarla y entregar energía a 6V, 12 V y 24 V de acuerdo a los requerimientos de los distintos actuadores. Esta tarjeta, adicionalmente, posee un circuito de protección contra fallas y cortos.

Todos estos periféricos están organizados conforme a la configuración de hardware mostrada en la Figura 26. Así, todas las lecturas de los sensores a excepción del telémetro, son enviadas a un ordenador remoto a través de dos transmisores XBEE. La señal hacia los actuadores del robot, también es transmitida desde el ordenador remoto al robot utilizando un XBEE. A partir de ello se puede inferir que todo el control del robot se ejecuta en el ordenador remoto. En el caso del telémetro, se encontró que el volumen de datos que éste entrega es muy grande, por lo que se ha acoplado un ordenador portátil sobre el robot, el cual tiene como función, recibir la información del telémetro, procesarla, y entregar, como salida, información relacionada a algún tipo de obstáculo encontrado frente al robot (si lo hay). Esta información es la que se envía al ordenador remoto a través de un transmisor XBEE.

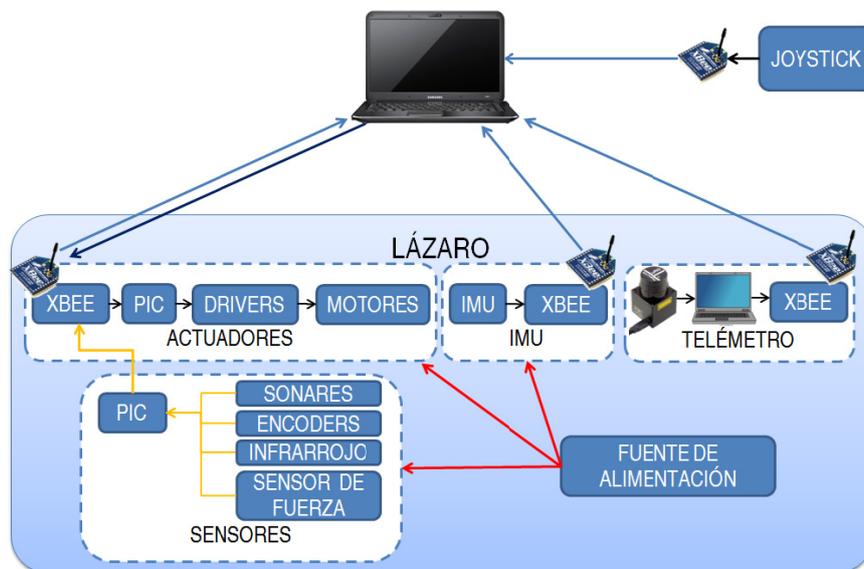


Figura 26. Configuración de hardware.

### 3.4 Cinemática del brazo

Debido a la relevancia que posee el brazo del robot Lázaro en el desarrollo e implementación de las estrategias que se describirán en los siguientes capítulos, se dedicó este espacio para detallar la cinemática del mismo. Respecto a su base móvil, no se describe su modelo cinemático puesto que todas las estrategias desarrolladas se fundamentan en hipotéticos desplazamientos de la base móvil a muy baja velocidad por lo que esta se considera cuasi estática. Una descripción detallada de la cinemática de un robot de ruedas tipo *skid steer* está presentada en [97].

El modelado cinemático directo del brazo perteneciente a Lázaro se hizo utilizando el algoritmo de Denavit-Hartenberg (D-H) [98], para lo cual, se establecieron los sistemas de referencias propios de cada eslabón (ver Figura 27) y, en función de ellos, se definieron los parámetros D-H para cada articulación del brazo (ver Tabla 1). Es importante destacar que el origen del sistema de referencia base ( $X_0Y_0Z_0$ ) se ubicó en la intersección del eje de la primera articulación del brazo con el polígono de soporte definido por la unión de los cuatro puntos de contacto de las ruedas con el suelo (asumiendo el robot situado sobre un suelo plano).

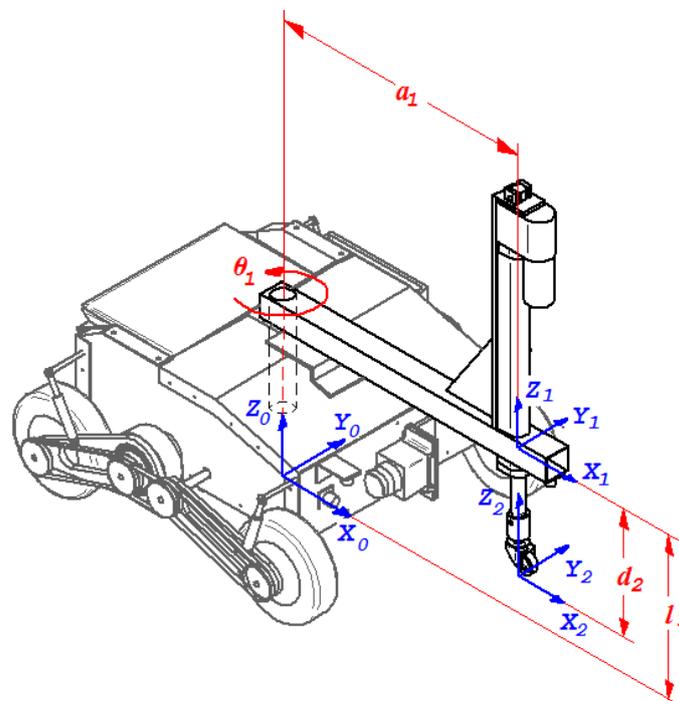


Figura 27. Parámetros D-H en el brazo.

**Tabla 1. Parámetros D-H para el brazo de Lázaro**

Articulación (i)	$\theta_i$	$d_i$	$a_i$	$\alpha_i$
1	$\theta_1$	$l_1$	$a_1$	0
2	0	$d_2$	0	0

La matriz de transformación homogénea que relaciona el sistema de la base con el sistema de referencia ( $X_2Y_2Z_2$ ) es:

$${}^0T_2 = {}^0T_1 \cdot {}^1T_2 = \begin{bmatrix} \cos \theta_1 & -\sin \theta_1 & 0 & a_1 \cos \theta_1 \\ \sin \theta_1 & \cos \theta_1 & 0 & a_1 \sin \theta_1 \\ 0 & 0 & 1 & l_1 + d_2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

A partir de esta matriz es posible conocer la posición del efector final del robot ( ${}^0x_2, {}^0y_2, {}^0z_2$ ) respecto al sistema base del brazo utilizando:

$$\begin{bmatrix} {}^0x_2 \\ {}^0y_2 \\ {}^0z_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_1 \cos \theta_1 \\ a_1 \sin \theta_1 \\ l_1 + d_2 \end{bmatrix} \quad (2)$$

donde  $\theta_1$  corresponde al ángulo de rotación de la primera articulación del brazo,  $d_2$  corresponde al desplazamiento en la segunda articulación del brazo,  $a_1=420$  mm y  $l_1=282.5$  mm. A partir de (2), se puede deducir fácilmente la cinemática inversa del brazo (obtención de las variables articulares dada la posición del efector final) resultando en:

$$\begin{bmatrix} \theta_1 \\ d_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \tan^{-1} \left( \frac{{}^0y_2}{{}^0x_2} \right) \\ {}^0z_2 - l_1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

Por último, se debe indicar que la velocidad de movimiento en las articulaciones del brazo está restringida por los límites de los actuadores acoplados a estas articulaciones. Así, la velocidad de giro máxima de la primera articulación del brazo es  $\dot{\theta}_1=2.5$  rad/s y la velocidad de desplazamiento máximo de la segunda articulación es  $\dot{d}_2=43$  mm/s.

### 3.4.1 Volumen de trabajo

El brazo del robot fue diseñado de manera tal que la primera articulación del brazo tuviese un rango de acción de  $360^\circ$ , es decir, el brazo puede girar ubicándose en cualquier ángulo posible de  $\theta_1$  y completar ciclos completos de manera continua sin limitación. Respecto a la segunda articulación, fue diseñada para que la carrera del actuador quedase distribuida a partes iguales sobre una línea imaginaria definida por el suelo cuando el robot está situado sobre un plano horizontal; Es decir, que los 0.3 m de la carrera del actuador lineal están distribuidos 0.15 m por arriba del nivel del suelo y los 0.15 m restantes, por debajo de este nivel. Esta configuración fue concebida pensando en la implementación de las estrategias que el robot utiliza para sobrepasar algunos obstáculos.

Estos parámetros permiten delimitar el volumen de trabajo del efector final del brazo, el cual queda definido por una banda cilíndrica de 0.42 m de radio y una altura de 0.3 m distribuidos uniformemente a partir de la línea imaginaria definida por el nivel del suelo (ver Figura 28). Con este volumen de trabajo, Lázaro puede ubicar su efector final en cualquier posición alrededor de su chasis, lo que le permite utilizar diversas estrategias para mejorar su estabilidad y sobrepasar obstáculos utilizando su brazo como herramienta fundamental.

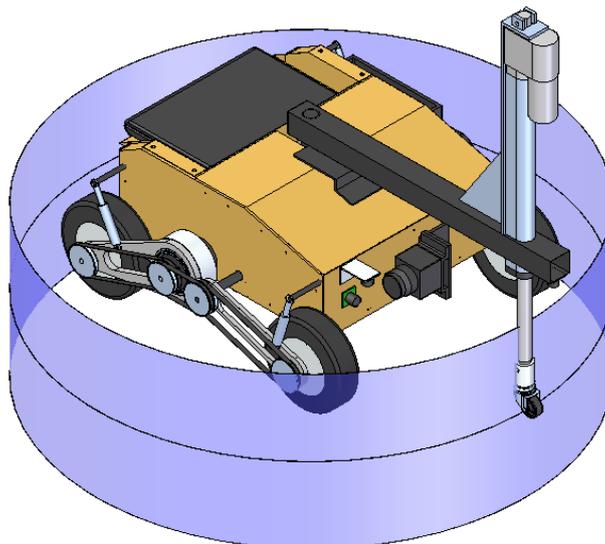


Figura 28. Volumen de trabajo del efector final (en morado).

### 3.5 Control de movimiento del brazo

Cada una de las articulaciones que conforman el brazo del robot Lázaro posee su propio sistema de control, el cual depende de los requerimientos de funcionamiento, estrategias a implementar y variable a controlar. A continuación se describen el sistema de control para cada uno de ellos.

#### 3.5.1 Sistema de control de la primera articulación

La primera articulación del brazo está formada por un motor DC con caja reductora de velocidad formada por 4 etapas de reducción: la primera constituida de una transmisión por banda de sincronización, la segunda formada por un acoplamiento tornillo sinfín – corona y las dos restantes formadas por engranes cilíndricos. El engrane final está acoplado al brazo, permitiendo a través de este ensamble, obtener una articulación rotacional que mueve el primer eslabón del brazo. De acuerdo con [99] el par requerido para mover un brazo ( $\tau_b$ ) utilizando una articulación rotacional que posee un tren de engranajes en el acoplamiento motor-brazo queda definida por:

$$\tau_b = (I_b + \eta^2 I_m) \ddot{\theta}_1 + (B_b + \eta^2 B_m) \dot{\theta}_1 \quad (4)$$

donde  $I_b$  es la inercia en el brazo,  $\eta$  es la relación de transmisión en el tren de engranajes presente,  $I_m$  es la inercia del rotor,  $B_b$  es el coeficiente de fricción viscosa en los cojinetes de apoyo y  $B_m$  es el coeficiente de fricción viscosa que incluye fricciones en las escobillas y engranajes. Ahora, un análisis más profundo de la dinámica del brazo concluye que el par generado por el motor ( $\tau_m$ ) no solo es utilizado para impulsar el movimiento del brazo, adicionalmente debe compensar el efecto de los pares generados por la fricción estática ( $\tau_{est}$ ) [100], fricción seca o fricción de Coulomb ( $\tau_{fc}$ ) [101], fricción generada por el contacto de la rueda con el suelo ( $\tau_r$ ) y un par adicional producto del efecto gravitatorio ( $\tau_g$ ) [102], el cual se genera cuando el brazo se mueve sobre superficies inclinadas. Todo esto se resume en:

$$\tau_m = K_w \left( \frac{\tau_b + \tau_g + \tau_{fc} + \tau_{est} + \tau_r}{\eta} \right) \quad (5)$$

donde la constante  $K_w$  está especificada en:

$$K_w = \left( \frac{\cos \phi_n \sin \lambda + f \cos \lambda}{\cos \phi_n \cos \lambda - f \sin \lambda} \right) \frac{d_w N_g}{d_g N_w} \quad (6)$$

la cual relaciona los parámetros dimensionales y de operación en el sistema tornillo sinfín – corona. Estos parámetros son:  $\phi_n$  y  $\lambda$  (ángulo de presión normal y ángulo de avance en el tornillo sinfín respectivamente),  $f$  (coeficiente de fricción en el acoplamiento sinfín – corona),  $d_w$  y  $d_g$  (diámetros del tornillo sinfín y su corona respectivamente) y finalmente  $N_w$  y  $N_g$  (cantidad de dientes en el tornillo sinfín y la corona).

Adicionalmente, se obtiene que:

$$\tau_{fc} = \tau_c \operatorname{sgn}(\dot{\theta}_1) \quad (7)$$

$$\tau_{est} = \begin{cases} 0 & \text{si } \dot{\theta}_1 \neq 0 \\ F(\theta_1) & \text{si } \dot{\theta}_1 = 0 \end{cases} \quad (8)$$

$$\tau_r = -\operatorname{sgn}(\dot{\theta}_1) \mu_r F_{5z} a_1 \quad (9)$$

$$\tau_g = W_b r_b (\sin \phi \sin \theta_1 + \cos \phi \sin \alpha \cos \theta_1) \quad (10)$$

donde  $\tau_c$  es la constante de fricción seca,  $\operatorname{sgn}(\dot{\theta}_1)$  es la función signo,  $F(\theta_1)$  es una función polinómica que define el par de fricción estática, ya que se encontró que en la primera articulación del brazo en Lázaro, este par no es constante y depende de la posición del brazo;  $\mu_r$  es el coeficiente de fricción por rodadura en el efector final del brazo (rueda),  $F_{5z}$  es la fuerza de contacto del efector final con el suelo,  $\phi$  es el ángulo *pitch*,  $\alpha$  es el ángulo *roll* (ambos medidos a través de la IMU),  $W_b$  es el peso del brazo y  $r_b$  es la distancia desde el eje de rotación de la primera articulación del brazo hasta el centro de gravedad considerando solo el brazo (ver Figura 29). Substituyendo (5) en (4) y reacomodando se obtiene:

$$\tau_m = \frac{K_w(I_b + \eta^2 I_m)}{\eta} \ddot{\theta}_1 + \frac{K_w(B_b + \eta^2 B_m)}{\eta} \dot{\theta}_1 + K_w \left( \frac{\tau_g + \tau_{fc} + \tau_{est} + \tau_r}{\eta} \right) \quad (11)$$

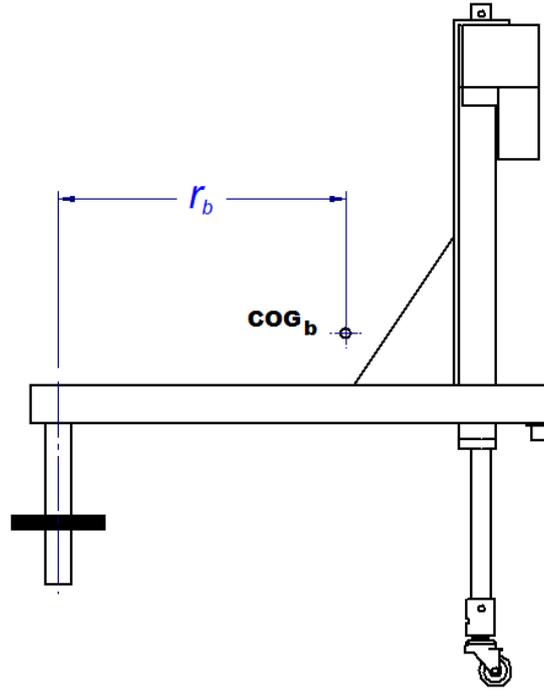


Figura 29. Posición del centro de gravedad del brazo.

Adicionalmente, en [103] se describe el modelo dinámico de un motor eléctrico DC. A partir de este modelo y considerando despreciable la inductancia del rotor, se obtiene:

$$V = \frac{R}{K_m} \tau_m + K_b \omega_m \quad (12)$$

donde  $V$  es la tensión de alimentación al motor,  $R$  es la resistencia eléctrica del rotor,  $K_m$  es la constante mecánica del motor,  $K_b$  es la constante de la fuerza contra electromotriz y  $\omega_m$  es la velocidad angular del motor.

Finalmente, sustituyendo (11) en (12) y considerando que  $\omega_m = \eta \dot{\theta}_1$  se obtiene:

$$V = \frac{K_w R}{K_m} \left[ \frac{(I_b + \eta^2 I_m)}{\eta} \ddot{\theta}_1 + \frac{(B_b + \eta^2 B_m)}{\eta} \dot{\theta}_1 + \frac{\tau_g + \tau_{fc} + \tau_{est} + \tau_r}{\eta} \right] + \eta K_b \dot{\theta}_1 \quad (13)$$

la cual define la tensión eléctrica con la cual se debe alimentar el motor para mover la primera articulación del brazo. Esta ecuación constituye el modelo para el diseño del control de esta articulación.

La ecuación se cumple si  $V \neq 0$ , en el caso contrario  $\dot{\theta}_1 = \ddot{\theta}_1 = 0$ . Esto es debido a la acción autobloqueante del sistema de transmisión tornillo sinfín – corona; la cual permite movimiento si el tornillo impulsa a la corona, es decir, si hay alimentación desde el motor; en caso contrario, se genera el bloqueo del brazo impidiendo su movilidad. Este principio de no reversibilidad está descrito en [104], donde se indica que si el ángulo de avance del tornillo es menor a  $10^\circ$ , por lo general, se produce la condición de autobloqueo. En el caso del tornillo sinfín instalado en Lázaro, este ángulo es igual a  $4^\circ$ , por lo que se asegura esta condición.

Una vez definido el modelo dinámico del brazo, se utilizó para diseñar un controlador cuyo objetivo es lograr el posicionamiento de la primera articulación del brazo de acuerdo a un ángulo requerido ( $\theta_{1\ sp}$ ) a partir de una posición dada ( $\theta_1$ ). Debido a la condición de autobloqueo existente en la primera articulación del brazo, solo se utilizó un controlador proporcional con un *bias* (ver Figura 30). La salida de este lazo, es la acción de control  $u(t)$  hacia el motor DC, la cual es una señal de modulación por ancho de pulsos (PWM). Es importante acotar que, tanto la constante de proporcionalidad ( $K_p$ ) como el *bias*, se hicieron variables para compensar el efecto del par perturbador ( $\tau_p$ ) que afecta la dinámica del brazo (par de gravedad sumado a los pares debidos a los diferentes tipos de fricción); por lo que, el sistema fue diseñado para que tanto  $K_p$  como el *bias* sean funciones lineales y directamente proporcionales a  $\tau_p$ :

$$\tau_p = \tau_g + \tau_{fc} + \tau_{est} + \tau_r \quad (14)$$

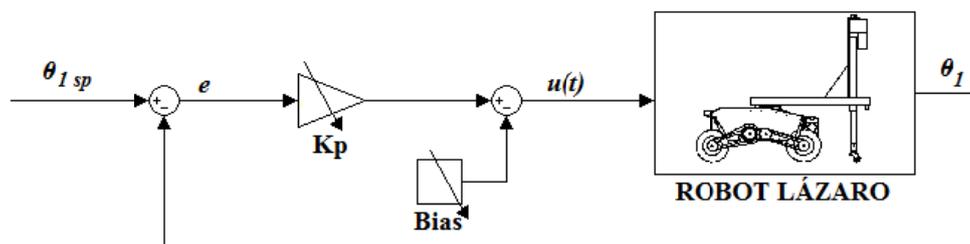
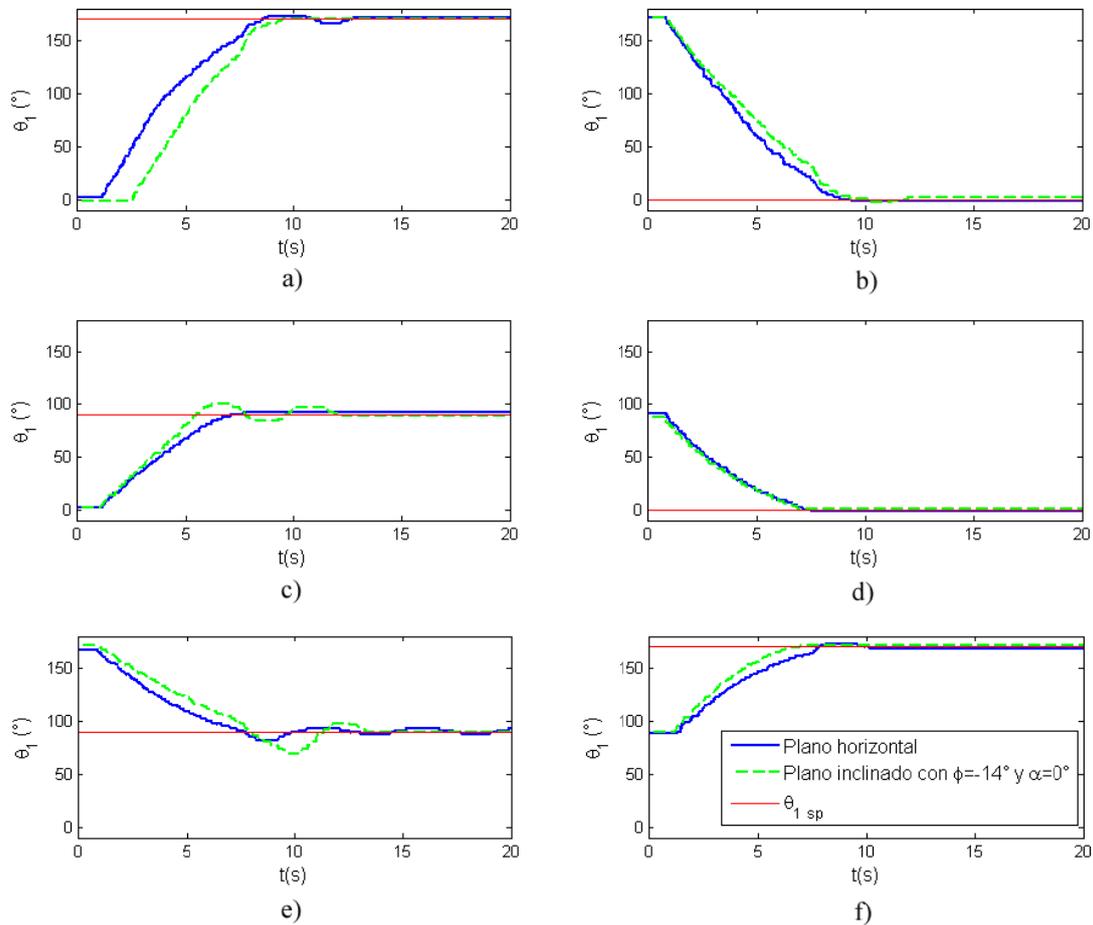


Figura 30. Lazo de control en la primera articulación del brazo.

Esta configuración con  $K_p$  y *bias* permite al controlador adaptarse a los requerimientos del sistema. Por ello, cuando el robot esté situado sobre un plano horizontal, la constante de proporcionalidad ( $K_p$ ) y el *bias* serán más pequeños;

mientras que cuando el robot esté posicionado sobre un terreno inclinado se obtienen mayores valores para  $K_p$  y  $bias$ , lo cual garantiza una mejor respuesta del controlador para afrontar eficientemente las exigencias mayores del sistema (en este caso, efecto de la gravedad).

Una vez definido el controlador se hicieron diferentes pruebas para estudiar la eficiencia del controlador diseñado. Se probó el controlador estando el robot situado sobre un plano horizontal y, posteriormente, se repitieron las pruebas estando el robot situado sobre un plano inclinado con ángulos  $pitch \phi = -14^\circ$  y  $roll \alpha = 0^\circ$ . La Figura 31 muestra el resultado de estas pruebas.



**Figura 31. Pruebas realizadas sobre el sistema de control de la primera articulación del brazo con distintas condiciones iniciales y finales.**

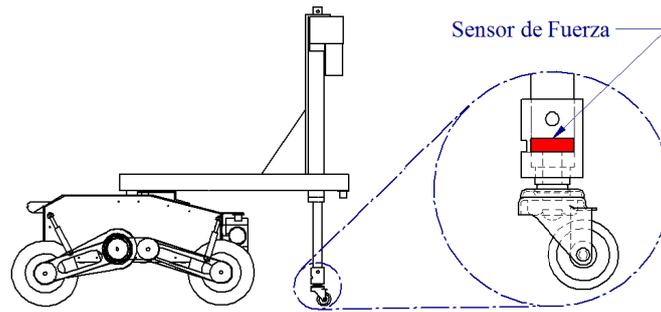
En la Figura 31 se observa la robustez del controlador ante el efecto de la gravedad sobre la dinámica del brazo, ya que, no importa si el robot está situado sobre

un terreno plano o inclinado. Adicionalmente, se debe señalar que, en las pruebas la máxima pendiente del terreno estaba situada en la dirección  $\theta_1 = 180^\circ$ , por lo que el controlador no estaba sometido a mucha exigencia cuando  $\theta_{1\ sp}$  era  $0^\circ$  ó  $180^\circ$ , ya que, en estos casos, el efecto de la gravedad es menor; pero si  $\theta_{1\ sp}=90^\circ$ , el efecto de la gravedad era máximo, por lo que el controlador estuvo sometido a requerimientos mayores. Ésto se vislumbra en las Figura 31c y 31e donde el controlador tiende a oscilar alrededor del ángulo requerido, pero finalmente se estabiliza en este valor.

### 3.5.2 Sistema de control de la segunda articulación

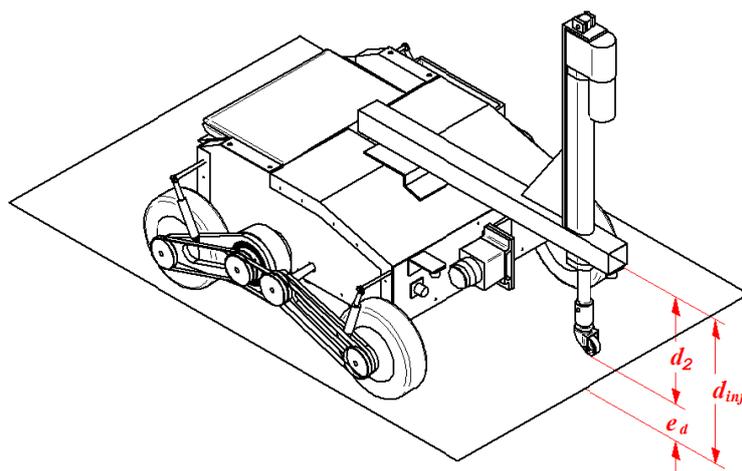
En la segunda articulación del brazo se utiliza un control selectivo con tres lazos de control asociados a distintas situaciones derivadas de la estrategia que el robot pueda implementar con su brazo. Estas situaciones se diferencian entre sí a través de dos parámetros asociados a la fuerza de contacto entre el efector final del brazo y el suelo: la fuerza de contacto requerida ( $F_{5z\ sp}$ ) y la fuerza de contacto real ( $F_{5z}$ ), la cual es medida por el sensor de presión alojado en el acoplamiento entre el extremo del actuador lineal del brazo y el efector final (ver Figura 32). Las tres situaciones que permiten activar uno u otro lazo de control son:

- *Situación 1:* No se requiere contacto del efector final del brazo con el suelo, o existe una transición desde la posición de contacto a la posición libre (sin contacto). Esto ocurre si  $F_{5z\ sp} = 0$  y  $F_{5z} \geq 0$ .
- *Situación 2:* existe una transición desde la posición libre (sin contacto) a la posición de contacto. Esto ocurre si  $F_{5z\ sp} > 0$  y  $F_{5z} = 0$ .
- *Situación 3:* existe contacto entre el efector final del brazo con el suelo. Esto ocurre si  $F_{5z\ sp} > 0$  y  $F_{5z} > 0$ .



**Figura 32. Detalle de la ubicación del sensor de fuerza.**

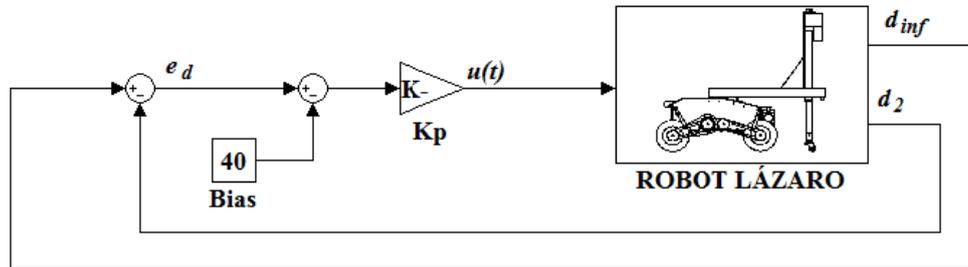
El lazo de control utilizado en la *Situación 1*, tiene como propósito mantener el brazo sin el contacto con el suelo o eliminar el contacto (si éste existe). Además, se espera mantener el brazo a una distancia razonablemente cercana al suelo para que, si existe la necesidad de apoyarse con el brazo, la respuesta sea rápida para lograr el contacto. Para implementar este lazo de control, no se requiere el uso del sensor de presión. En este caso, se utilizan dos sensores adicionales: el potenciómetro ubicado en el actuador lineal, a través del cual es posible medir la distancia  $d_2$  (ver Figura 33) y el sensor infrarrojo ubicado en el brazo (apuntando hacia abajo), a través del cual se mide la distancia entre este sensor y el suelo ( $d_{inf}$ ). Se puede considerar que existirá un contacto del efector final con el suelo cuando la diferencia ( $e_d$ ) entre estas dos medidas sea cero.



**Figura 33. Medidas  $d_2$  y  $d_{inf}$  tomadas por el potenciómetro y sensor de fuerza respectivamente.**

Partiendo de esta premisa se creó un lazo de control proporcional donde, adicionalmente, se utiliza un *bias* de 40 mm para garantizar una separación razonable

del efector final con el suelo (ver Figura 34). La salida de éste y los demás lazos, es la acción de control  $u(t)$  hacia el actuador lineal, la cual es una señal PWM.



**Figura 34.** Lazo de control utilizado en el brazo para mantener el efector final del brazo sin contacto con el suelo.

El lazo de control utilizado en la *Situación 2* tiene como objetivo permitir que el efector final del brazo entre en contacto con el suelo garantizando que la fuerza de contacto inicial sea acorde con la fuerza requerida. Si la velocidad de desplazamiento del efector final es muy elevada, se producirá un contacto con una alta fuerza de reacción, la cual puede ser inapropiada dependiendo de la magnitud de la fuerza de contacto requerida ( $F_{5z\ sp}$ ). Este lazo tiene como variables de entrada: la diferencia ( $e_d$ ) y la fuerza de contacto requerida ( $F_{5z\ sp}$ ). La acción de control a la salida del lazo  $u(t)$  podrá tomar solo dos valores de señal PWM dependiendo de la condición:

$$u(t) = \begin{cases} u_{min} & \text{si } e_d \leq 5 \text{ mm y } F_{5z\ sp} \leq 15 \text{ N} \\ u_{nom} & \text{en caso contrario} \end{cases} \quad (15)$$

donde  $u_{min}$  representa la señal PWM constante que origina una velocidad de desplazamiento pequeña, que garantiza que, durante el contacto inicial, la fuerza de contacto no se eleve excesivamente sobre la fuerza de contacto requerida ( $F_{5z\ sp}$ ). La acción de control  $u_{nom}$  representa la señal PWM constante que permite una velocidad de desplazamiento mayor, la cual es necesaria cuando la separación entre el efector final y el suelo es grande ( $e_d > 5 \text{ mm}$ ), por lo que se requiere un desplazamiento rápido para alcanzar el contacto con el suelo.

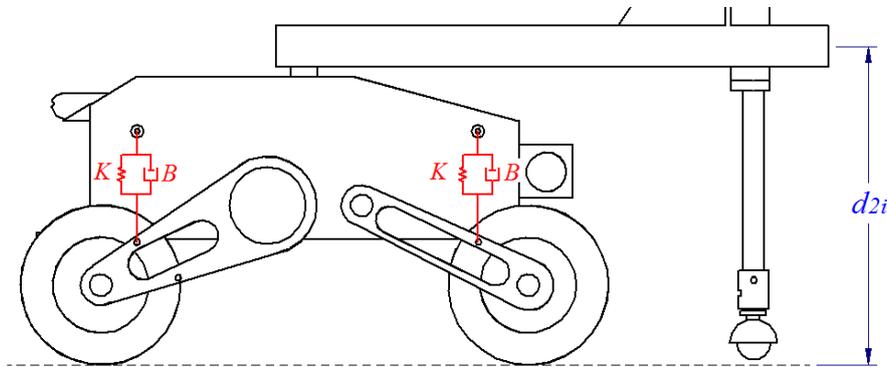
El lazo de control utilizado en la *Situación 3* permite controlar la intensidad de la fuerza de contacto ( $F_{5z}$ ) entre el efector final y el suelo una vez establecido el contacto

(este control se requiere en algunas estrategias implementadas). La magnitud de esta fuerza se obtiene a partir de:

$$F_{5z} = 4K(d_2 - d_{2i} - a_1 \sin \phi) + 4B(\dot{d}_2 - a_1 \dot{\phi}) + W_z \quad (16)$$

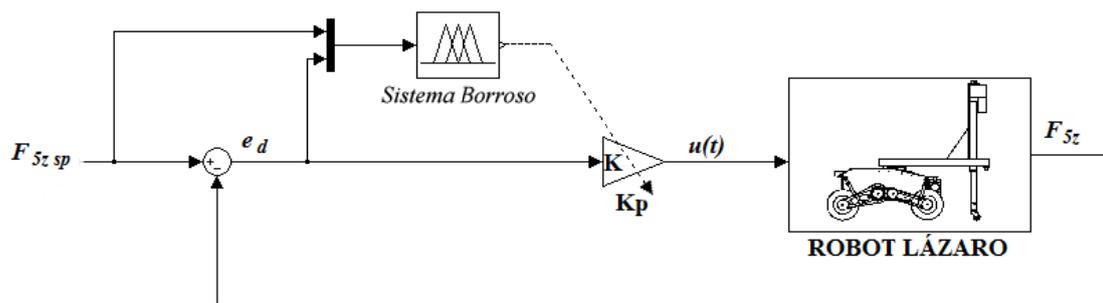
donde  $d_{2i}$  es el valor de  $d_2$  cuando el efector final del brazo toca el suelo sin que exista compresión alguna en el sistema de amortiguamiento del robot ( $d_{2i} = 282.5 \text{ mm}$ ),  $\phi$  es el ángulo *pitch*,  $W_z$  es la proyección del vector peso respecto a la dirección vertical,  $K$  es la constante de rigidez de cada resorte (N/mm) y  $B$  es la constante de amortiguamiento de cada amortiguador en N.s/mm (ver Figura 35).

La fuerza  $F_{5z}$  crece rápidamente a medida que se incrementa el desplazamiento del actuador lineal ( $d_2$ ) variando desde 0 (momento en que el efector final del brazo toca el suelo) hasta  $81.29 \text{ N}$  (momento en que se levantan las ruedas delanteras del robot) con un  $\Delta d_2 \cong 19 \text{ mm}$ , lo cual implica un diseño robusto del lazo de control ya que se requieren fuerzas cuyas magnitudes pueden cambiar rápidamente frente a variaciones muy pequeñas de  $d_2$ .



**Figura 35. Sistema de amortiguamiento.**

En este lazo se implementó un control proporcional con planificación de ganancias [102] a través de un sistema de inferencia borroso (ver Figura 36). Este sistema de tipo Mandani tiene como antecedentes la fuerza de contacto requerida ( $F_{5z \text{ sp}}$ ) y el error ( $e_f$ ) entre la fuerza de contacto requerida ( $F_{5z \text{ sp}}$ ) y la fuerza medida por el sensor ( $F_{5z}$ ). Adicionalmente, tiene como consecuente la constante de proporcionalidad ( $K_p$ ) del control.



**Figura 36. Lazo de control utilizado en el brazo para regular la intensidad de la fuerza de contacto entre el efector final del brazo y el suelo.**

La Tabla 2 y la Figura 37 muestran los conjuntos borrosos tanto de los antecedentes como del consecuente. Adicionalmente, se diseñaron 101 reglas difusas que relacionan los antecedentes con el consecuente (ver Figura 38a), generando una superficie de posibles constantes de proporcionalidad ( $K_p$ ) mostrada en la Figura 38b. Esta superficie muestra que la fuerza de contacto  $F_{5z}$  es más sensible a cambios cuando es pequeña, ya que, cuando el error  $e_f$  tiende a cero y la fuerza requerida ( $F_{5z\ sp}$ ) es pequeña, se requieren acciones de control mínimas (evidenciado por un  $K_p$  tendiente a cero); mientras que para el mismo error  $e_f$  tendiente a cero pero con una fuerza requerida ( $F_{5z\ sp}$ ) grande, se utiliza una  $K_p$  mayor a pesar de la magnitud mínima del error.

**Tabla 2. Conjuntos borrosos de los antecedentes y del consecuente en el sistema de inferencia borroso utilizado en el control de la segunda articulación del brazo.**

$F_{5z\ sp}$	$e_f$	$K_p$
	Error enorme positivo (EEP)	
	Error grande positivo (EGP)	
	Error intermedio positivo (EIP)	$K_p$ enorme (KE)
Cercana a cero (CC)	Error pequeño positivo (EPP)	$K_p$ gigante (KGI)
Fuerza baja (FB)	Error aproximadamente cero positivo (EACP)	$K_p$ grande (KG)
Fuerza intermedia (FI)	Error aproximadamente cero negativo (EACN)	$K_p$ mediana (KM)
Fuerza alta (FA)	Error pequeño negativo (EPN)	$K_p$ pequeña (KP)
Fuerza exorbitante (FE)	Error intermedio negativo (EIN)	$K_p$ diminuta (KD)
	Error grande negativo (EGN)	$K_p$ tendiente a cero (KTC)
	Error enorme negativo (EEN)	

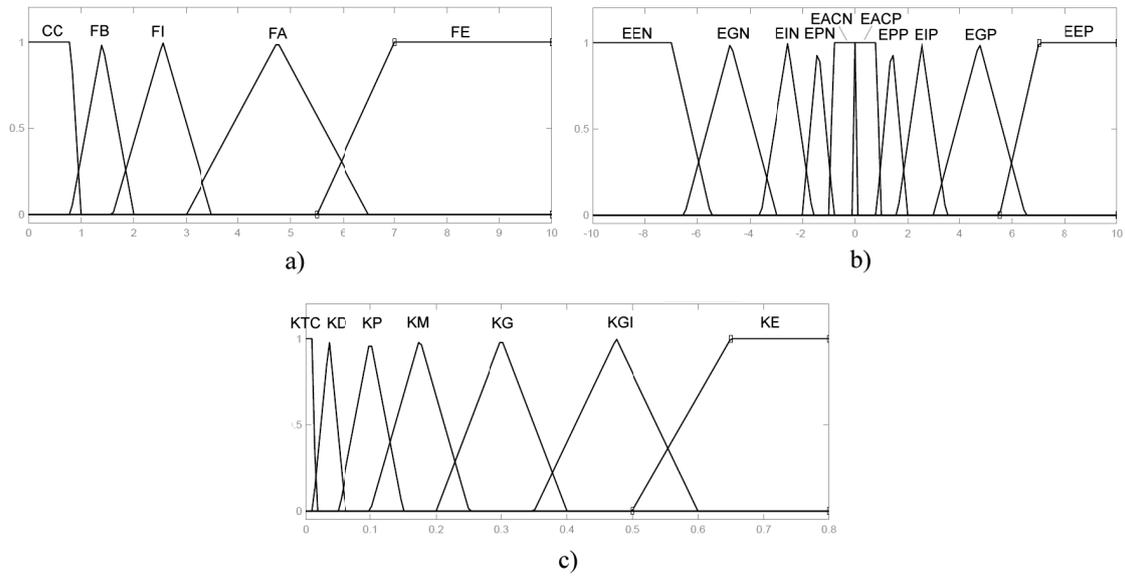


Figura 37. Antecedentes y consecuentes del sistema de inferencia borroso utilizado en el control de la segunda articulación del brazo. a) Antecedente  $F_{5z\ sp}$ ; b) Antecedente  $e_f$ ; c) Consecuente  $K_p$ .

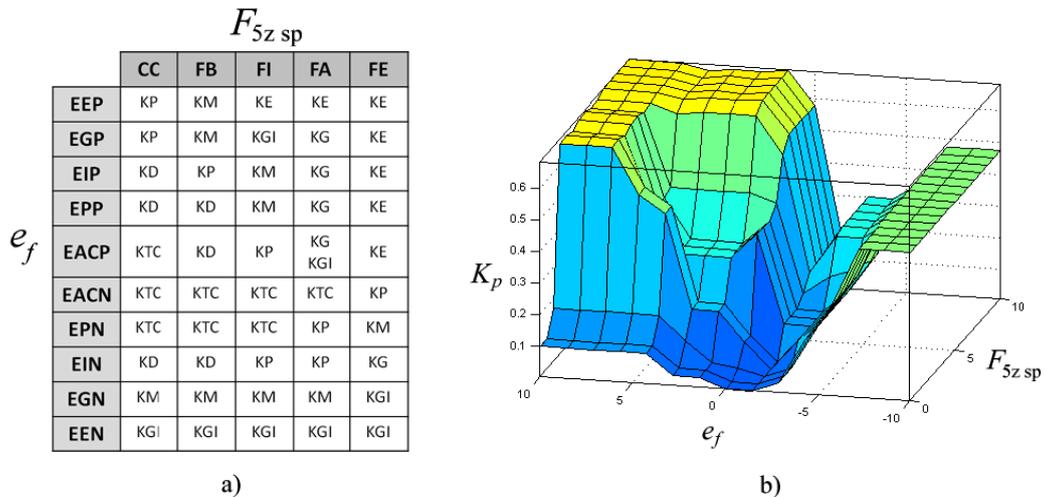


Figura 38. Sistema de inferencia borroso: a) reglas borrosas; b) Superficie generada para el consecuente  $K_p$  a partir de las reglas mostradas en a).

Este sistema de control fue probado directamente sobre Lázaros. En la Figura 39 se muestran algunas gráficas de pruebas realizadas para controlar la intensidad de la fuerza de contacto  $F_{5z}$ , en situaciones de incremento y disminución siguiendo el valor de referencia  $F_{5z\ sp}$ . Cabe destacar que, en estas pruebas, se tomó la medida del sensor de fuerza sin el uso de ningún filtro digital que la modifique. Adicionalmente, se debe

indicar que se estableció un sistema de bandas alrededor del valor de referencia: se considera correcta una fuerza de contacto cuya magnitud esté contenida en el intervalo  $F_{5z\ sp} \pm 2\ N$ .

Al analizar las gráficas presentadas en la Figura 39, se evidenció un tiempo muerto variable durante los primeros segundos en las pruebas realizadas. Este tiempo se debe a retrasos asociados a la velocidad de transmisión desde el robot al ordenador y viceversa, además de retrasos debidos al procesamiento de datos tanto en el robot como en el ordenador remoto. Pero, a pesar de ello, se evidencia que el sistema de control es capaz de llevar la fuerza de contacto al valor de referencia durante los tres primeros segundos de cada prueba, tanto en aquellas pruebas donde la diferencia entre el valor inicial y el valor de referencia es alta como en los casos donde esta diferencia es pequeña.

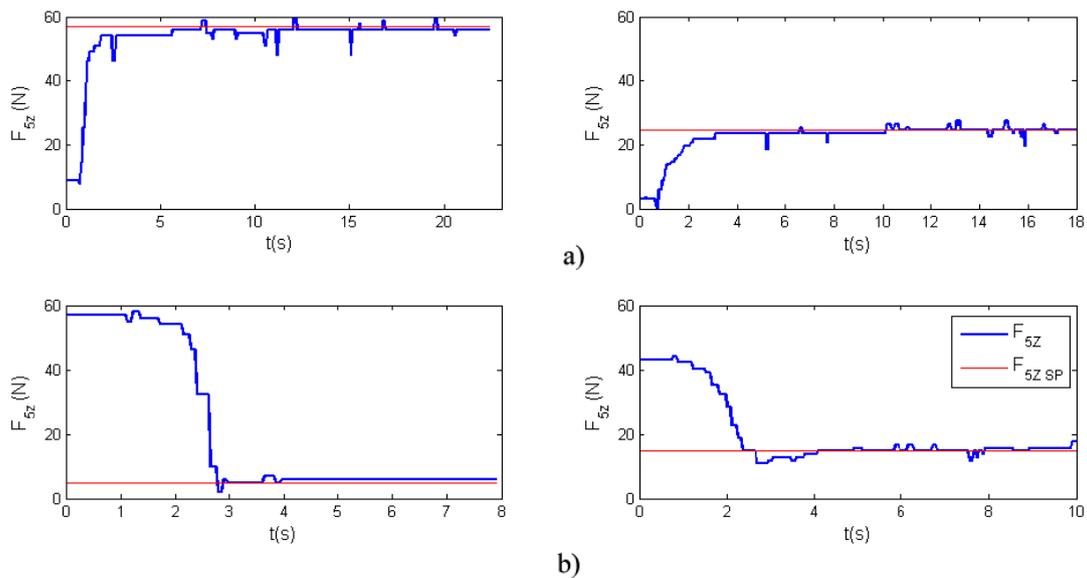


Figura 39. Pruebas realizadas sobre el sistema de control difuso; a) Aumento de la fuerza  $F_{5z}$ , b) Disminución de la fuerza  $F_{5z}$ .

### 3.6 Arquitectura de control

Se diseñó una arquitectura de control para ser implantada en Lázaró (ver Figura 40). Dicha arquitectura es considerada *híbrida* [105,106,107] puesto que posee niveles donde se exhibe claramente una jerarquía funcional [108] y, a su vez, hay un nivel reactivo basado en comportamientos [109,110] que permiten al robot efectuar diferentes

acciones en respuesta a los estímulos que pudiera recibir a partir de sus sensores para completar la tarea asignada [111]. La implementación de la arquitectura se hace desde dos entornos: un sistema llamado local, incorporado dentro del robot; y un sistema remoto, ubicado en un ordenador externo. La transmisión de datos entre los dos sistemas se realiza a través de comunicación inalámbrica.

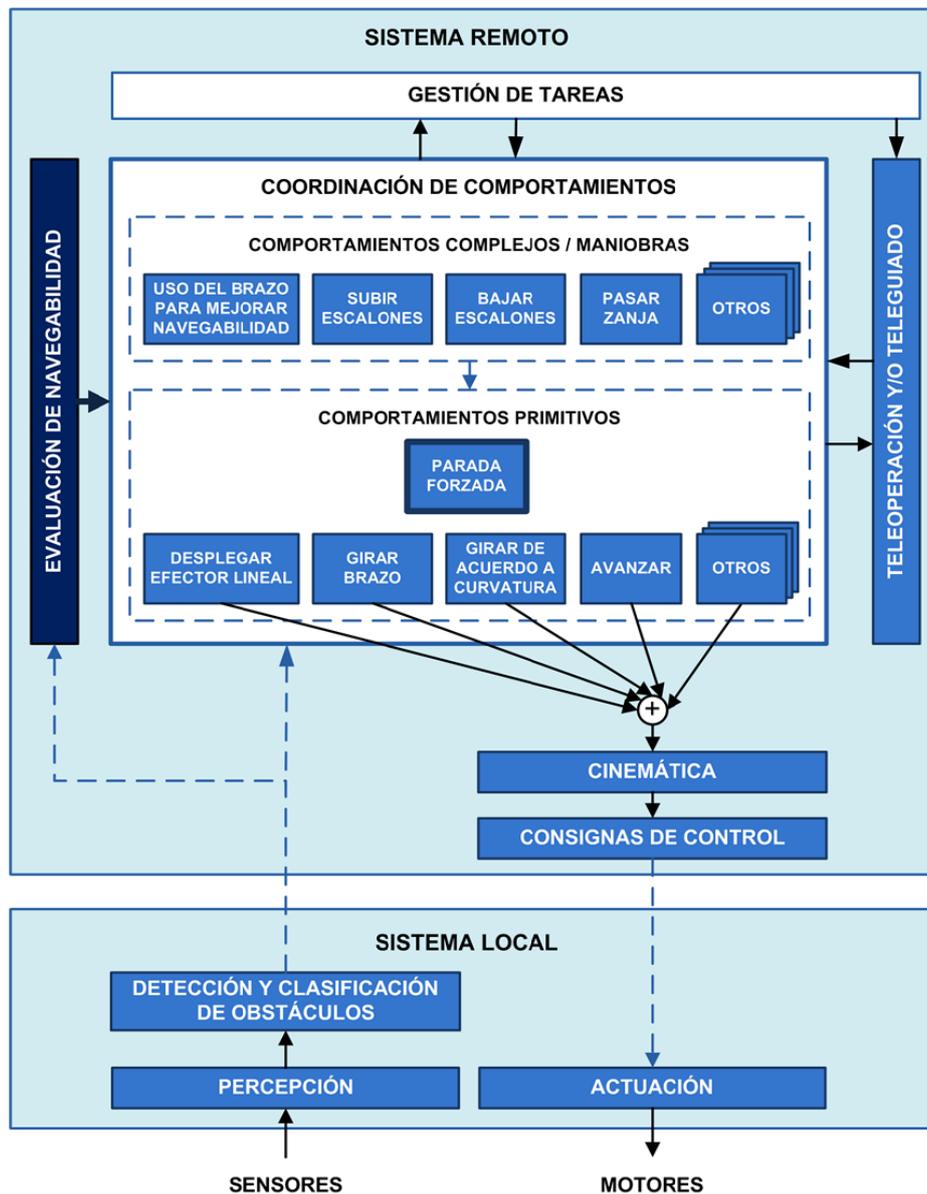


Figura 40. Arquitectura de control diseñada.

En el sistema local está el nivel más bajo de la arquitectura conformado por los módulos de percepción (recepción de datos a partir de los sensores) y actuación (entrega de consignas a los motores para efectuar movimientos controlados). Adicionalmente,

existe un módulo de más alto nivel llamado “Detección y clasificación de obstáculos”, el cual recibe datos del telémetro láser y los analiza en un ordenador local para detectar, clasificar y dimensionar obstáculos que pudiera encontrarse el robot mientras se desplaza sobre un terreno irregular.

El sistema remoto está monitorizado por el usuario del robot en cada momento. El módulo de *Coordinación de comportamientos* tiene como función seleccionar los comportamientos a utilizar para el cumplimiento de una tarea, además de permitir la fusión entre los mismos (de ser posible) o imponer la ejecución de algún comportamiento en particular dependiendo de la información recibida. En este módulo se hizo una jerarquización de comportamientos, teniendo, en primer lugar, aquellos comportamientos complejos u maniobras que permiten al robot ejecutar acciones complicadas tales como subir un escalón. Estos comportamientos complejos, por lo general, no se pueden fusionar entre sí, pero destacan excepciones tales como la unión del comportamiento “uso del brazo para mejorar navegabilidad” en conjunto con otro comportamiento complejo, por ejemplo: *Navegación* (no visible en la Figura 40). En un nivel más bajo están los comportamientos primitivos, los cuales son vinculables entre sí y permiten, en conjunto, producir un comportamiento complejo.

Un módulo adicional se denomina *Evaluación de la navegabilidad*; en él se recibe los datos de percepción y se evalúa constantemente la propensión del robot a fallar durante su navegación a raíz de tres fenómenos (vuelco, pérdida de capacidad para direccionarse y deslizamiento del robot). Si en este módulo se determina que la posibilidad de falla es inminente, se emite una señal de alerta al módulo de coordinación de comportamientos para que se ejecute el comportamiento *Parada forzada*, el cual detiene el robot completamente. Este comportamiento, a pesar de ser de bajo nivel, inhibe totalmente a cualquier comportamiento que se esté ejecutando previamente.

El módulo de *Teleoperación y/o teleguiado* permite al usuario manejar de manera remota al robot, ya sea el vehículo, el brazo o ambos. Ésto implica que, cuando este módulo está activo, la teleoperación puede influir en la ejecución de algún comportamiento o fusionarse con otro. Por ejemplo, puede fusionar el teleguiado de la base móvil con el *Uso del brazo para mejorar navegabilidad*.

La incorporación de este módulo implica el uso de algunos modos de operación, los cuales describen el grado de autonomía del robot frente a acciones de teleoperación. Estos modos se especificaron considerando aspectos tales como: grado de autonomía esperado, dificultad de la tarea, eficacia en las operaciones de teleoperación y riesgo de inutilización por pérdida de navegabilidad en el robot. Así, se especificaron cuatro modos:

- *Modo 1. Control absoluto del usuario:* El usuario tiene acceso a todos los actuadores y lecturas de sensores, por lo que se utiliza para realizar procedimientos de teleoperación en el brazo y teleguiado en el vehículo.
- *Modo 2. Autonomía en la base móvil:* El vehículo es controlado autónomamente de acuerdo a los comportamientos implantados siguiendo alguna tarea previamente impuesta, mientras que el brazo está disponible para procedimientos de teleoperación.
- *Modo 3. Autonomía del brazo:* Es el brazo quien goza de autonomía mientras la base móvil está disponible para que puede ser teleguiada por el usuario.
- *Modo 4. Autonomía total:* El robot dispone de total autonomía para ejecutar la tarea que se le haya indicado. Aunque el usuario cumple labores de supervisión, puede retomar el control del robot (cambiar a otro modo de operación) cuando así lo requiera.

Adicionalmente se encuentra el módulo *Gestión de tareas* en un nivel más alto, donde se seleccionan o se programan las tareas que el robot va a efectuar y se selecciona el modo de operación que se utilizará mientras el robot realiza la tarea. Por último, es importante destacar que, aunque se describe la arquitectura global diseñada para Lázaros, actualmente no se han implementado los módulos de gestión de tareas; detección y clasificación de obstáculos. Respecto al módulo de coordinación de comportamientos, se han implementado los comportamientos complejos de manera individual, pero sin la gestión del módulo de coordinación.

### 3.7 Interfaz de usuario

Lázaro puede ser operado y controlado desde dos entornos: *Simulink* y una nueva interfaz de usuario diseñada para tal fin. Las pruebas realizadas y plasmadas en este documento fueron realizadas utilizando *Simulink*, por lo que se describe esquemáticamente esta interfaz. El segundo entorno se describe en el apéndice A.

La Figura 41 muestra una vista esquemática de la interfaz de operación implementada en *Simulink*, la cual está instalada en un ordenador remoto. En primer lugar (izquierda), se muestran cuatro bloques correspondientes a los enlaces de entrada al entorno (verde claro). Tres de estos enlaces corresponden a la conexión física entre el ordenador y tres módulos XBEE que efectúan la comunicación serie inalámbrica entre el robot y este ordenador utilizando comandos. Específicamente a través de estos módulos se recibe información de la unidad de medición inercial, el grupo de sensores instalados en el robot y un PC portátil instalado en el robot (que procesa información adquirida por el telémetro láser). Un módulo XBEE adicional permite recibir datos desde un *Joystick*, el cual está destinado a operaciones de teleoperación y teleguiado. Actualmente, el enlace correspondiente al PC portátil no está operativo puesto que el *módulo de detección y clasificación de obstáculos* no está activo.

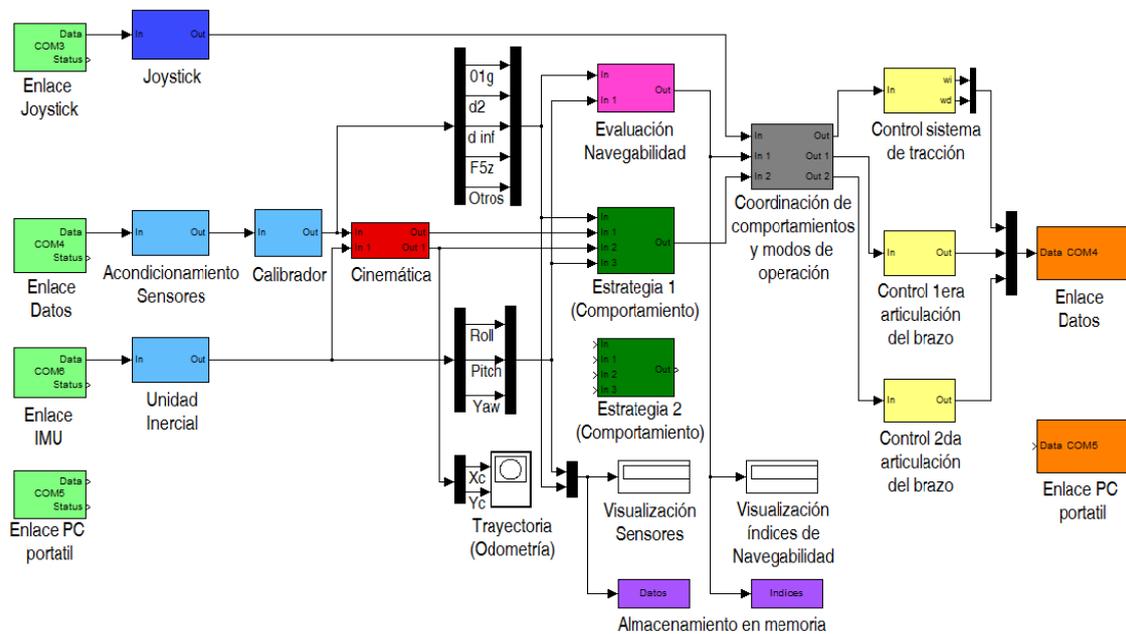


Figura 41. Interfaz de usuario desarrollada en el entorno *Simulink*.

Una vez recibidos los datos a través de los enlaces de entrada, toda la información es decodificada, separada y filtrada para obtener variables individuales correspondientes a las medidas reales adquiridas por los sensores instalados. Esta tarea es efectuada utilizando varias funciones representadas por tres bloques de color azul claro en la Figura 41. Entre ellos destaca un bloque llamado *calibrador*, el cual representa una función que cumple la tarea específica de contabilizar los pulsos provenientes de los codificadores incrementales instalados en los motores de tracción para obtener la velocidad de giro de cada motor. En el caso del *Joystick*, se decodifica la señal recibida a través del enlace utilizando una función representada por el bloque de color azul oscuro.

A continuación se representa la función *cinemática* a través del bloque de color rojo. Esta función recibe la información correspondiente a los sensores (codificadores de tracción y brazo, potenciómetro del brazo, medidas de la unidad inercial) para calcular las variables cinemáticas del robot tales como velocidad de desplazamiento y giro, además de la posición del robot respecto a un sistema de referencia fijo, el cual tiene como origen la primer posición registrada en el robot cuando se inicia el programa. Las posiciones sucesivas se obtienen utilizando información odométrica y son corregidas parcialmente utilizando información proveniente de la unidad inercial.

Posteriormente se muestran en la Figura 41, dos bloques de color verde oscuro representado funciones diseñadas para que el robot efectúe alguna estrategia (subir o bajar escalones, utilizar su brazo para mejorar su estabilidad, entre otras). Solo se muestran dos bloques pero existirán tantos bloques como estrategias se deseen implementar. Es importante destacar que en la figura solo hay un bloque conectado al sistema, esto sucede ya que el *módulo de coordinación de comportamientos* no ha sido implementado completamente. Específicamente, no se ha desarrollado la función que permitiría seleccionar la estrategia a ejecutar a partir de información emitida por el *módulo de detección y clasificación de obstáculos* (también inactivo). En consecuencia, se conecta solamente la estrategia que se va a implementar durante la ejecución del programa en un momento dado.

Adicionalmente, en la Figura 41 se muestra un bloque de color magenta el cual representa el *módulo de evaluación de navegabilidad*. Este módulo corresponde a una

función que calcula tres índices que permiten estimar condiciones de riesgo tales como vuelco, pérdida de direccionamiento o deslizamientos cuando el robot se desplaza sobre terreno irregular. La información obtenida a través de esta función es direccionada a otra función representada por un bloque color gris, que correspondería al *módulo de coordinación de comportamientos*, el cual, si estuviese completamente desarrollado permitiría seleccionar la estrategia a implementar, seleccionar el modo de operación a utilizar y efectuar una parada forzada, en caso de presentarse una condición de riesgo predicha por los índices de navegabilidad. Actualmente, solo están implementadas las dos últimas funciones de dicho módulo.

Luego se muestran en la Figura 41 tres bloques de color amarillo, los cuales representan los sistemas de control de tracción y de cada una de las articulaciones del brazo (explicados previamente en este capítulo). Estos sistemas entregan como salida la señal de control que debe enviarse de vuelta al robot, mediante dos enlaces de retorno (representados por dos bloques de color naranja). Dichos enlaces corresponden a la conexión física entre el ordenador y dos módulos XBEE que permiten efectuar la comunicación inalámbrica entre el ordenador y el robot. Cabe resaltar que estos dos enlaces son los mismos que envían información desde el robot al ordenador remoto, por lo que poseen comunicación bidireccional.

Finalmente, se muestra en la parte inferior de la Figura 41 varios bloques de visualización (en color blanco). El primero llamado *Trayectoria*, permite visualizar en un plano Cartesiano  $XY$  el recorrido seguido por el robot de acuerdo a las posiciones obtenidas utilizando la función *cinemática*. Los demás bloques de visualización permiten monitorizar en tiempo real las medidas tomadas por los sensores y los índices de navegabilidad del robot. Toda esta información también es almacenada en memoria para su posterior análisis a través de las funciones representadas por los bloques color violeta que llevan por nombre *Almacenamiento en memoria*.

El sistema descrito está alojado dentro de un ciclo de operación infinito de tiempo real con un período de muestreo de 35 ms. Este ciclo puede ser interrumpido por el usuario para detener el programa y a su vez, detener el funcionamiento del robot.

### 3.8 Conclusiones

En este capítulo se describió el diseño y construcción de Lázaro en Venezuela. Lázaro es un robot móvil con 4 ruedas tipo *skid steer* que posee un brazo con dos articulaciones y un efector final formado por una rueda pivotante que permite al robot mantener un contacto constante y rodante entre el brazo y el suelo. Esta característica resulta ser la más relevante de este robot, ya que, a través de ella, se pueden implementar algunas estrategias de navegación innovadoras.

Además de detallar los componentes mecánicos y electrónicos del robot, se describió también la cinemática y los algoritmos de control implementados en el brazo, los cuales se diseñaron utilizando herramientas de control inteligente. Asimismo, se especificó la arquitectura de control del robot y una interfaz de usuario diseñada para el entorno *Simulink* la cual permite no solo la monitorización sino también la incorporación de tareas, comportamientos e instrucciones para ser ejecutadas por el robot.

Por sus características, este robot es útil para navegación sobre terrenos irregulares y con obstáculos. En los próximos capítulos se describen estrategias desarrolladas para que Lázaro pueda realizar este tipo de tareas de manera segura, es decir, conservando su estabilidad al vuelco, direccionamiento y evitando deslizamientos.

## **Capítulo 4**

# **NAVEGABILIDAD DE ROBOTS MÓVILES SOBRE SUPERFICIES INCLINADAS**

---

### **4.1 Introducción**

Cuando un robot móvil transita sobre terrenos inclinados siguiendo una determinada trayectoria, existen tres maneras por las cuales podría fallar en la consecución de esta tarea:

1. El robot puede volcar producto de la excesiva inclinación del terreno.
2. El robot puede deslizarse y perder la trayectoria a seguir.
3. El robot es incapaz de direccionarse de acuerdo con la orientación apropiada a la trayectoria.

Para evaluar el riesgo del robot a sufrir cualquiera de estas situaciones, en este capítulo se definen tres índices, los cuales están ajustados para el caso de estudio (Lázaro). Éstos son: índice de estabilidad al vuelco, que mide la propensión del robot a voltearse; índice de direccionamiento, que mide la capacidad del robot para cambiar de orientación y un índice de deslizamiento, que mide la propensión del robot a resbalarse

hacia abajo. Estos tres índices, que permiten evaluar la navegabilidad del robot cuando transita sobre superficies inclinadas, fueron validados utilizando el software *ADAMS*. Así, se puede para corroborar que la formulación utilizada en el desarrollo de estos índices es acorde al comportamiento dinámico del robot.

Adicionalmente, en este capítulo se describe el proceso de selección de una estrategia de navegación que utiliza Lázaro junto con su brazo, de manera que con ella se logre mejorar su índice de estabilidad y, a su vez, se garantiza su navegabilidad respecto al direccionamiento y deslizamiento cuando transita sobre terrenos inclinados. Finalmente, se muestran prueban experimentales ejecutadas por Lázaro cuando utiliza la estrategia seleccionada mientras se monitoriza la navegabilidad a través de los índices de estabilidad, direccionamiento y deslizamiento.

## 4.2 Índice de estabilidad al vuelco

Este índice de estabilidad es una métrica que permite estimar el momento en el que un robot inicia un proceso de volteo [112]. Los índices de estabilidad se diseñan utilizando algún criterio de estabilidad (descritos en el Capítulo 2), y pueden tomar en consideración distintas variables tales como: posición del COG, cargas y momentos externos ejercidos sobre el robot, y cargas inerciales tales como aceleraciones lineales y angulares.

Cuando el robot y su manipulador se desplazan a bajas velocidades y no existen grandes aceleraciones o componentes inerciales aparte de la gravedad, ni cargas externas mayores, se pueden despreciar todos estos elementos y realizar un análisis cuasiestático para predecir la condición de inestabilidad cuando el robot se mueve sobre superficies inclinadas [44,85]. Este trabajo se fundamenta en este principio.

La definición de un índice de estabilidad útil para Lázaro, fue sometida a una evolución en los criterios utilizados, de manera que se obtuviese un índice apropiado para las condiciones específicas de este robot, el cual difiere de la mayoría, puesto que posee un brazo que se utiliza para mantener un contacto adicional con el suelo.

En primer lugar, se utilizó un índice de estabilidad fundamentado en el *Margen de Estabilidad Estática* (SSM) [79], pero se encontró que no predice con mucha

fiabilidad la estabilidad del robot cuando el brazo está en contacto con el suelo y se ejerce una fuerza producto de la acción del efector final del brazo.

Posteriormente, se decidió utilizar el criterio *ZETUF* [88], el cual predice para un robot de cuatro ruedas, una condición de inestabilidad y vuelco inminente cuando las fuerzas de reacción con el suelo de dos ruedas consecutivas, se hacen igual a cero. Este criterio es apropiado para Lázaro, puesto que, para la definición de las fuerzas de reacción, incluye además de la posición del COG, las fuerzas externas que puedan perturbar la dinámica del robot (como la reacción producida por el brazo cuando toca con el suelo).

Pero, aun cuando este criterio toma en consideración todas estas variables, no se cumple de manera literal en Lázaro debido a la presencia del brazo en contacto con el suelo, ya que es posible encontrar situaciones donde las fuerzas de reacción de dos ruedas consecutivas tiendan a cero sin que el robot esté en una situación de vuelco inminente. Esto ocurre cuando el brazo en contacto con el suelo hace que dos ruedas consecutivas pierdan contacto con el terreno, de manera que el robot queda en una situación estable estando apoyado sobre tres puntos. Por ello, se desarrolló una modificación del criterio *ZETUF* llamado *ZETUF compuesto* ( $ZETUF_{comp}$ ) que ajusta el criterio *ZETUF* para robots de cuatro ruedas con un punto de apoyo adicional. Para la delimitación de este criterio, es importante considerar las siguientes definiciones y axiomas:

*Definición 1:* Un eje de vuelco está definido como la línea recta imaginaria limitada por los puntos de contacto con el suelo de dos ruedas consecutivas en un robot móvil de ruedas [84].

*Axioma 1:* Sea  $F_n$  la fuerza de reacción de una rueda en contacto con el suelo. En robots móviles con tres ruedas es posible calcular las fuerzas de reacción en los tres puntos de contacto con el suelo utilizando la formulación de Newton. En robots móviles con más de tres ruedas puede ser bastante difícil calcular la fuerza de reacción de cada rueda con el suelo. Para robots de cuatro ruedas es posible calcular la suma de las fuerzas de reacción en dos ruedas consecutivas utilizando la formulación de Newton [62]. De acuerdo con ello, se define a  $F_{nm}$  como la suma de las fuerzas de reacción de

dos ruedas consecutivas  $m$  y  $n$ , es decir, la suma de fuerzas de reacción sobre un eje de vuelco.

*Definición 2:* Un robot de cuatro ruedas será inestable cuando la suma de las fuerzas de reacción sobre un eje de vuelco tienda a cero. En el caso de un robot de tres ruedas, éste será inestable cuando la fuerza de reacción sobre alguna rueda tienda a cero [88].

*Axioma 2:* Un robot de cuatro ruedas con un brazo articulado podría tener hasta cinco puntos de contacto con el suelo (el quinto punto pudiera ser generado por el contacto del efector final con el terreno). Un robot de este tipo puede mantener la estabilidad con tres, cuatro o cinco puntos de contacto con el suelo [79].

Ahora, utilizando las definiciones y axiomas anteriores, se describe el procedimiento para calcular un índice de estabilidad utilizando el criterio  $ZETUF_{comp}$  para un robot de cuatro ruedas con un contacto adicional provisto por el brazo cuando toca el suelo. Dicho procedimiento es distinto de acuerdo a las tres posibles situaciones de estabilidad anteriormente descritas.

**1. *El robot apoyado sobre sus 4 ruedas sin contacto del brazo con el suelo (cuatro puntos de contacto):***

- Calcular las sumas de reacciones para los cuatro ejes de vuelco del robot.
- Calcular el índice  $ZETUF$  definido como la mínima suma de reacciones de entre los cuatro ejes de vuelco. Si al menos una es menor o igual que cero, considerar el índice de estabilidad igual a cero.

**2. *El robot apoyado sobre sus cuatro ruedas con contacto del brazo con el suelo (cinco puntos de contacto):***

- Calcular las sumas de reacciones para los cuatro ejes de vuelco considerando el robot de cuatro ruedas e incluyendo la fuerza generada por el quinto contacto provisto por el brazo cuando toca el suelo.
- Si todas las sumas de reacciones son mayores que cero, se considera que el robot está apoyado sobre cinco puntos de contacto. Adicionalmente, determinar la

posición del quinto punto de contacto (el cual depende de las variables articulares del brazo).

- Comparar la fuerza del quinto punto de contacto ( $F_{5z}$  en lo sucesivo) con la suma de reacciones del eje de vuelco más cercano a la posición del quinto punto de contacto (eje  $mn$ ). Si  $F_{nm} \geq F_{5z}$ , calcular el índice  $ZETUF$  para un robot de cuatro ruedas definido como la mínima suma de reacciones de entre los cuatro ejes de vuelco (el quinto contacto genera una fuerza que se considerará una fuerza perturbadora).
- Si  $F_{nm} < F_{5z}$  se considera que la fuerza  $F_{5z}$  está acercándose al valor donde pudiera levantar las dos ruedas correspondientes al eje  $mn$ . Se dice que, en este punto, existe una transición entre la configuración con cinco puntos de contacto a una configuración con tres puntos de contacto. En este caso, calcular el índice  $ZETUF$  para un robot de cuatro ruedas definido como la mínima suma de reacciones de entre los cuatro ejes de vuelco pero sustituyendo la suma de reacciones  $F_{nm}$  por  $F_{5z}$ .

**3. *El robot apoyado sobre dos ruedas más el contacto del brazo con el suelo (tres puntos de contacto):***

- Calcular las sumas de reacciones para los cuatro ejes de vuelco considerando el robot de cuatro ruedas incluyendo la fuerza generada por el quinto contacto provisto por el brazo cuando toca el suelo.
- Si al menos una es menor o igual que cero, verificar la existencia de la fuerza  $F_{5z}$  provista por el contacto del brazo con el suelo.
- Si ésta existe, se considera que el robot está apoyado con el brazo de manera que tendrá tres puntos de contacto con el suelo.
- En este caso, calcular las fuerzas de reacción de los tres puntos de contacto del robot con el suelo.
- Si todas son mayores que cero, calcular el índice  $ZETUF$  para un robot de tres ruedas: es la menor fuerza de reacción de entre las tres calculadas. Si al menos una es menor que cero, considerar el índice de estabilidad igual a cero.

La Figura 42 resume esquemáticamente la definición del índice de estabilidad al vuelco basado en el criterio  $ZETUF_{comp}$ .

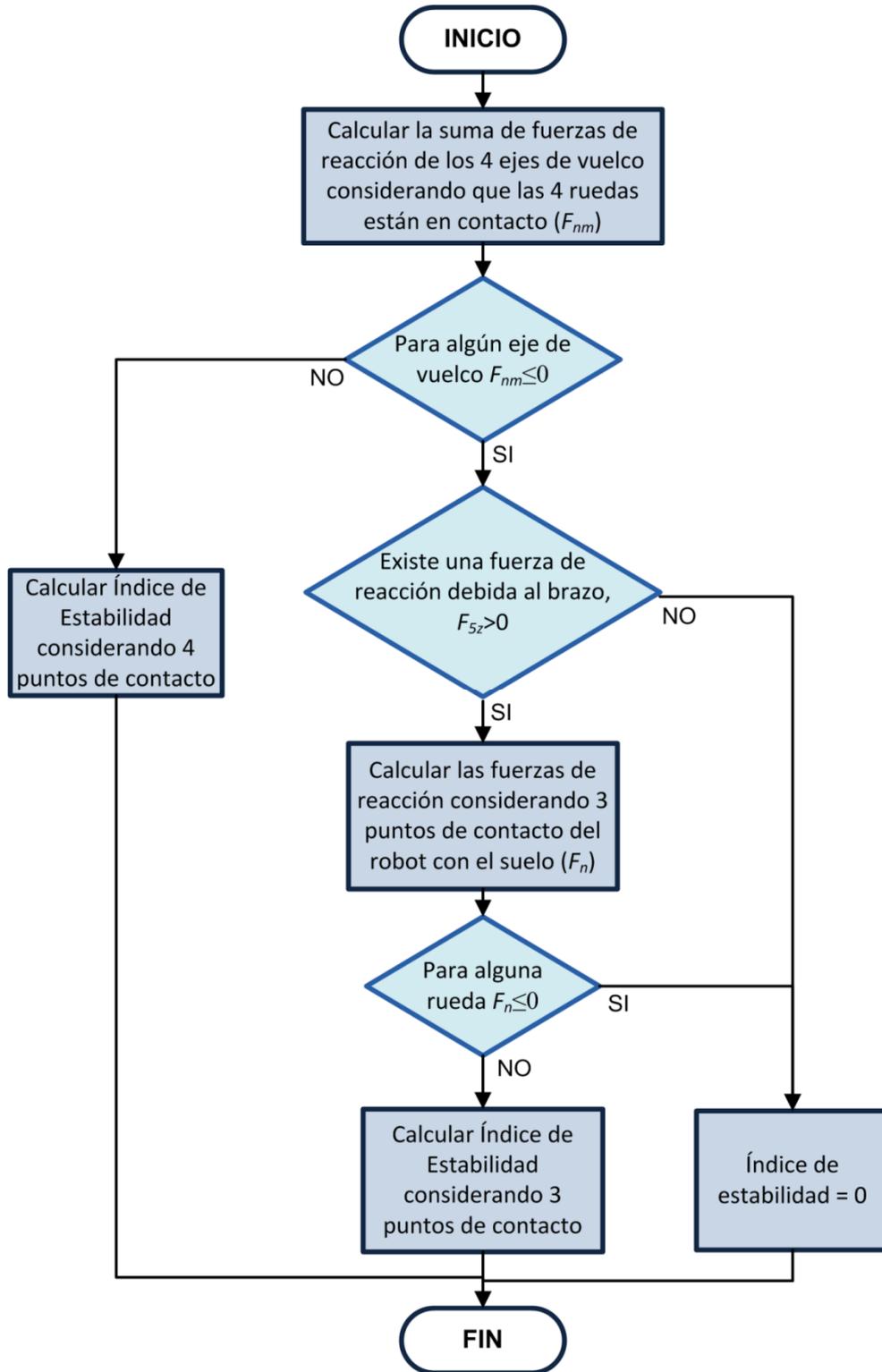


Figura 42. Algoritmo para calcular el índice de estabilidad de acuerdo al criterio  $ZETUF_{comp}$

A continuación se detalla, para el caso de estudio, el cálculo del índice de estabilidad de acuerdo a las tres situaciones planteadas.

**1. El robot apoyado sobre sus cuatro ruedas con o sin contacto del brazo con el suelo (cuatro o cinco puntos de contacto):**

En primer lugar, se definió un sistema de referencia local  $X_c Y_c Z_c$  propio del vehículo (ver Figura 43), cuyo origen es la intersección del eje de la primera articulación del brazo con el polígono de soporte, el cual está formado por los puntos de contacto del robot con el suelo. Dicho polígono se asumió plano considerando que el robot es pequeño y, a su vez, asumiendo que las irregularidades del terreno inclinado no son abruptas. Adicionalmente, se consideró el plano  $X_c Y_c$  coincidente con el área de dicho polígono. Si el robot se mueve sobre una superficie inclinada, este polígono tendrá una pendiente respecto a un plano horizontal definida por los ángulos *roll* ( $\alpha$ ) y *pitch* ( $\phi$ ).

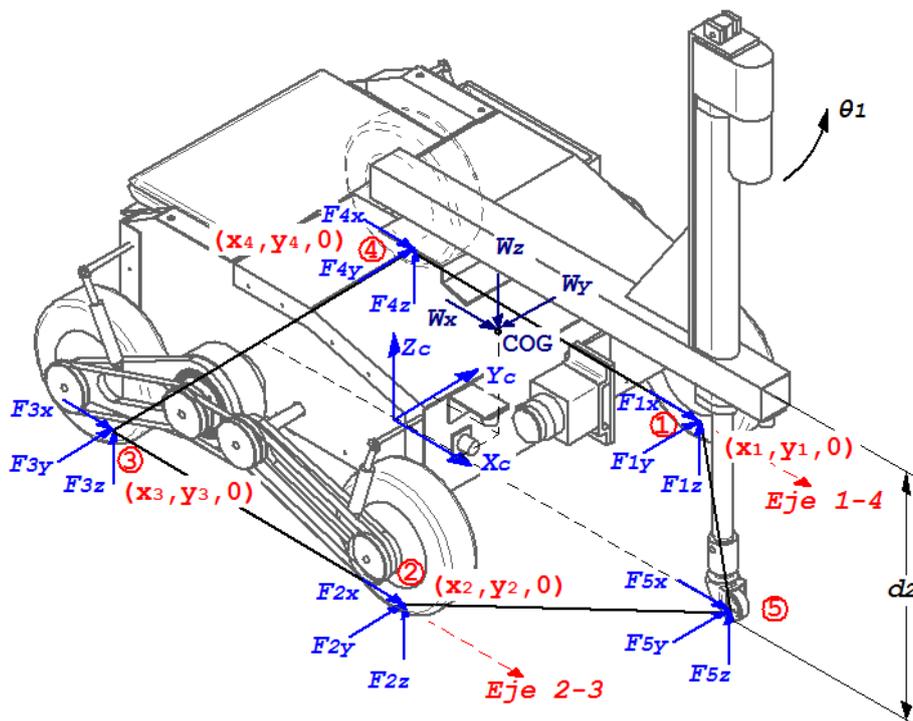


Figura 43. Lázarο mostrando las fuerzas de reacción sobre cada punto de contacto con el suelo.

Secundariamente, se definieron las coordenadas  $(x_n, y_n, z_n)$  de cada uno de los vértices del polígono y las coordenadas del centro de gravedad  $(x_{cog}, y_{cog}, z_{cog})$  respecto al sistema local  $X_c Y_c Z_c$  del robot. Las fuerzas normales sobre cada punto de contacto

( $F_{nz}$ ) siempre estarán orientadas de manera paralela al eje  $Z_c$  del sistema local  $X_c Y_c Z_c$  (ver Figura 43). Para Lázaro, las coordenadas del centro de gravedad dependen de las variables articulares del brazo ( $\theta_1, d_2$ ). Estas coordenadas, medidas respecto del sistema de referencia local  $X_c Y_c Z_c$ , quedan definidas por:

$$\begin{bmatrix} x_{cog} \\ y_{cog} \\ z_{cog} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a + r \cos \theta_1 \\ b + r \sin \theta_1 \\ c d_2 + d \end{bmatrix} \quad (17)$$

donde  $a, b, c, d$  y  $r$  son constantes. La ecuación:

$$\begin{bmatrix} W_x \\ W_y \\ W_z \end{bmatrix} = W \begin{bmatrix} \sin \phi \\ \cos \phi \sin \alpha \\ \cos \phi \cos \alpha \end{bmatrix} \quad (18)$$

es la proyección del vector de peso ( $W_x, W_y, W_z$ ) ubicado en el centro de gravedad del robot medido respecto al sistema de referencia local  $X_c Y_c Z_c$ . Con esta base, se utilizó la formulación de Newton para obtener las sumas de reacciones para los cuatro ejes de vuelco:

$$\begin{aligned} F_{14} = F_{1z} + F_{4z} &= \frac{1}{398} [W_z(199 + y_{cog}) - F_{5z}(199 + 408 \sin \theta_1) - W_y z_{cog}] \\ F_{23} = F_{2z} + F_{3z} &= \frac{1}{398} [W_z(199 - y_{cog}) - F_{5z}(199 - 408 \sin \theta_1) + W_y z_{cog}] \\ F_{12} = F_{1z} + F_{2z} &= \frac{1}{400} [W_z(200 + x_{cog}) - F_{5z}(200 + 408 \cos \theta_1) + W_x z_{cog}] \\ F_{34} = F_{3z} + F_{4z} &= \frac{1}{400} [W_z(200 - x_{cog}) - F_{5z}(200 - 408 \cos \theta_1) + W_x z_{cog}] \end{aligned} \quad (19)$$

Finalmente, el índice de estabilidad normalizado ( $I_{est}$ ) se generó al dividir la mínima sumatoria de fuerzas de reacción que se produce en los ejes de vuelco entre la mínima sumatoria de las reacciones producida en los ejes de vuelco calculada cuando éste se encuentre en la posición más estable, la cual ocurre cuando el robot está sobre un plano horizontal ( $\alpha = \phi = 0^\circ$ ), con el brazo situado al frente ( $\theta_1 = 0^\circ$ ) y sin la acción de ninguna fuerza perturbadora ( $F_{5z} = 0 \text{ N}$ ). En este caso, si el robot posee un peso  $W$ , la mínima sumatoria de reacciones en un eje de vuelco equivale a  $W/2$ , por lo que el índice de estabilidad queda definido por:

$$I_{est} = \frac{\min(F_{14}, F_{23}, F_{12}, F_{34})}{W/2} \quad (20)$$

Si  $I_{est} \leq 0$ , Tomar  $I_{est} = 0$

## 2. Transición de cinco a tres puntos de contacto:

Esta transición ocurre cuando la suma de reacciones en el eje de vuelco más cercano al punto de contacto del brazo con el suelo calculadas de acuerdo a (19) es menor a la fuerza de reacción que ejerce el suelo sobre el brazo, es decir, cuando para un eje  $mn$ , se obtiene que  $F_{nm} < F_{5z}$ . En este caso, se efectúa el cálculo del índice *ZETUF* definido para un robot de cuatro ruedas, pero se sustituirá  $F_{nm}$  por  $F_{5z}$ .

Es importante destacar que la posición del quinto punto de contacto depende de la primera variable articular del brazo definida por  $\theta_1$ ; a partir de ello se detectaron 8 zonas en las que, dependiendo de la ubicación del quinto punto de contacto, se deberán estudiar uno o dos ejes de vuelco específicos para dicho punto.

En las zonas 1, 3, 5 y 7, solo se deberá estudiar un eje de vuelco (ver Figura 44) para calcular el índice de estabilidad:

Zona 1:  $-29.9^\circ < \theta_1 < 29.9^\circ$

$$\text{Si } F_{5z} > F_{12}, \quad \text{tomar } I_{est} = \frac{\min(F_{5z}, F_{23}, F_{34}, F_{14})}{W/2} \quad (21)$$

Zona 3:  $60.3^\circ < \theta_1 < 119.4^\circ$

$$\text{Si } F_{5z} > F_{14}, \quad \text{tomar } I_{est} = \frac{\min(F_{12}, F_{23}, F_{34}, F_{5z})}{W/2} \quad (22)$$

Zona 5:  $\theta_1 > 150.6^\circ$  o  $-150.6^\circ < \theta_1$

$$\text{Si } F_{5z} > F_{34}, \quad \text{tomar } I_{est} = \frac{\min(F_{12}, F_{23}, F_{5z}, F_{14})}{W/2} \quad (23)$$

Zona 7:  $-119.4^\circ < \theta_1 < -60.3^\circ$

$$\text{Si } F_{5z} > F_{23}, \quad \text{tomar } I_{est} = \frac{\min(F_{12}, F_{5z}, F_{34}, F_{14})}{W/2} \quad (24)$$

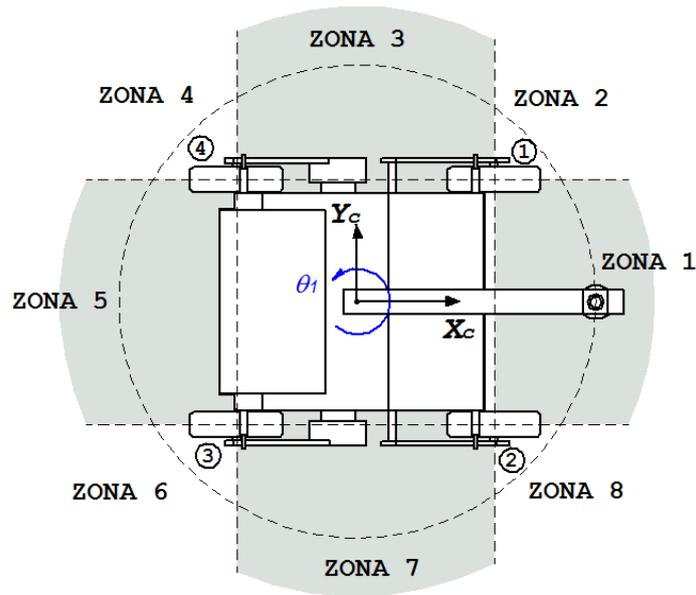


Figura 44. Vistas de planta de Lázar mostrando las posibles zonas de ubicación del quinto punto de contacto del efector final con el suelo.

Mientras que en las zonas 2, 4, 6 y 8 (ver Figura 44), se deberán estudiar dos ejes de vuelco, ya que en estas zonas no se sabe con precisión cuál de las sumas de reacciones en los dos ejes de vuelco tenderá primero a 0. Se sustituirá  $F_{5z}$  por la menor  $F_{nm}$  de entre las dos estudiadas:

Zona 2:  $29.9^\circ \leq \theta_1 < 60.3^\circ$

$$\text{Sea } F_{min} = \min(F_{12}, F_{14}) \quad \text{y} \quad F_{max} = \max(F_{12}, F_{14}) \quad (25)$$

$$\text{Si } F_{5z} > F_{min}, \quad \text{tomar } I_{est} = \frac{\min(F_{5z}, F_{max}, F_{23}, F_{34})}{W/2}$$

Zona 4:  $119.4^\circ \leq \theta_1 < 150.6^\circ$

$$\text{Sea } F_{min} = \min(F_{34}, F_{14}) \quad \text{y} \quad F_{max} = \max(F_{34}, F_{14}) \quad (26)$$

$$\text{Si } F_{5z} > F_{min}, \quad \text{tomar } I_{est} = \frac{\min(F_{5z}, F_{max}, F_{12}, F_{23})}{W/2}$$

Zona 6:  $-150.6^\circ \leq \theta_1 < -119.4^\circ$

$$\text{Sea } F_{min} = \min(F_{34}, F_{23}) \quad \text{y} \quad F_{max} = \max(F_{34}, F_{23}) \quad (27)$$

$$\text{Si } F_{5z} > F_{min}, \quad \text{tomar } I_{est} = \frac{\min(F_{5z}, F_{max}, F_{12}, F_{14})}{W/2}$$

Zona 8:  $-60.3^\circ \leq \theta_1 < -29.9^\circ$

$$\begin{aligned} \text{Sea } F_{min} &= \min(F_{12}, F_{23}) \quad \text{y} \quad F_{max} = \max(F_{12}, F_{23}) \\ \text{Si } F_{5z} > F_{min}, \quad \text{tomar } I_{est} &= \frac{\min(F_{5z}, F_{max}, F_{34}, F_{14})}{W/2} \end{aligned} \quad (28)$$

### 3. *El robot apoyado sobre tres puntos de contacto con el suelo:*

Esta condición ocurre cuando el brazo en contacto con el suelo levanta dos ruedas eliminando su situación de apoyo. En este caso, los tres puntos de contacto corresponderán a dos ruedas y el efector final del brazo ( $F_{5z} > 0$ ).

Ahora, dependiendo de la ubicación del brazo en esta situación, será la configuración de las dos ruedas que permanecen en contacto. Para determinar qué ruedas tocan el suelo, se toma en consideración el cálculo de las reacciones sobre los ejes de vuelco cuando las cuatro ruedas estén en contacto con el suelo (19). Si alguna de estas reacciones es menor o igual a cero, serán las dos ruedas restantes las que permanezcan en contacto con el suelo, por lo que posteriormente se podrá calcular su valor numérico de acuerdo con:

Si  $F_{14} \leq 0$

$$\begin{aligned} F_{2z} &= (1/400)[W_z(200 + x_{cog}) - F_{5z}(200 + 408 \cos \theta_1) + W_x z_{cog}] \\ F_{3z} &= (1/400)[W_z(200 - x_{cog}) - F_{5z}(200 - 408 \cos \theta_1) + W_x z_{cog}] \end{aligned} \quad (29)$$

Si  $F_{23} \leq 0$

$$\begin{aligned} F_{1z} &= (1/400)[W_z(200 + x_{cog}) - F_{5z}(200 + 408 \cos \theta_1) + W_x z_{cog}] \\ F_{4z} &= (1/400)[W_z(200 - x_{cog}) - F_{5z}(200 - 408 \cos \theta_1) + W_x z_{cog}] \end{aligned} \quad (30)$$

Si  $F_{12} \leq 0$

$$\begin{aligned} F_{4z} &= (1/398)[W_z(199 + y_{cog}) - F_{5z}(199 + 408 \sin \theta_1) - W_y z_{cog}] \\ F_{3z} &= (1/398)[W_z(199 - y_{cog}) - F_{5z}(199 - 408 \sin \theta_1) + W_y z_{cog}] \end{aligned} \quad (31)$$

Si  $F_{34} \leq 0$

$$F_{1z} = (1/398)[W_z(199 + y_{cog}) - F_{5z}(199 + 408 \sin \theta_1) - W_y z_{cog}] \quad (32)$$

$$F_{2z} = (1/398)[W_z(199 - y_{cog}) - F_{5z}(199 - 408 \sin \theta_1) + W_y z_{cog}]$$

Una vez definidas las reacciones de los tres puntos de contacto con el suelo (dos ruedas más el contacto del efector final del brazo), se define el índice de estabilidad normalizado:

$$I_{est} = \frac{\min(F_{nz}, F_{mz}, F_{5z})}{W/2} \quad (33)$$

$$\text{Si } I_{est} < 0, \quad I_{est} = 0$$

### 4.3 Índice de direccionamiento

Este índice estima la capacidad del robot para cambiar de orientación y seguir una trayectoria dada. En su definición se tomaron en consideración los siguientes aspectos:

*Axioma 3:* La fuerza de fricción ( $F_{nr}$ ) presente entre una rueda y el suelo es directamente proporcional a la fuerza de reacción normal ( $F_{nz}$ ) que también se produce entre la rueda y el suelo. Así, cuando la fuerza de reacción tienda a 0, la fricción también lo hará y se producirá deslizamiento [16,113].

*Axioma 4:* En un robot tipo *skid steer*, las ruedas u oruga(s) de un mismo lado funcionan a la misma velocidad. Además, la tracción y el direccionamiento se produce con un mecanismo diferencial combinado con deslizamiento, por lo que la tracción y direccionamiento serán posibles mientras exista fricción en por lo menos una rueda (u oruga) de cada lado con el suelo [114].

La definición de este índice se hace necesaria para Lázaro debido a la posibilidad presente cuando el robot navega sobre terreno inclinado y se pierde el contacto del suelo con dos ruedas del mismo lado. Este caso no necesariamente implica una ocasión de inestabilidad, ya que como se mencionó antes, el uso del brazo en contacto con el suelo puede ocasionar la inhabilitación de dos ruedas quedando, el robot

en una posición estable con tres puntos de contacto. Ahora, en la situación descrita se puede perder la capacidad del robot para seguir una trayectoria dada puesto que, de acuerdo al modelo cinemático, es necesario que exista contacto en, por lo menos, una rueda de cada lado del robot para lograr el direccionamiento del mismo.

Al igual que en el caso del índice de estabilidad, las fuerzas de reacción producidas por el contacto de las ruedas con el suelo pueden ser usadas para determinar un índice de direccionamiento [88] que se definió de acuerdo a las siguientes situaciones específicas:

**1. El robot apoyado sobre sus cuatro ruedas con o sin contacto del brazo con el suelo (cuatro o cinco puntos de contacto):**

Considerando el caso de las cuatro ruedas en contacto con el suelo, se define el índice de direccionamiento normalizado como la mínima sumatoria de las reacciones de los lados izquierdo ( $F_{14}$ ) y derecho ( $F_{23}$ ) del robot obtenidas a través de (19), dividida entre la mínima sumatoria de las reacciones de los lados izquierdo y derecho del robot calculada cuando éste se encuentre en la posición más estable, que equivale a  $W/2$ . Así, el índice de direccionamiento normalizado queda definido por:

$$I_{dir} = \frac{\min(F_{14}, F_{23})}{W/2} \quad (34)$$

$$\text{Si } I_{dir} < 0, \quad I_{dir} = 0$$

Si el índice normalizado tiende a 1, el robot podrá maniobrar para seguir la trayectoria especificada y si tiende a 0, no podrá ser direccionado para seguir ninguna trayectoria, a excepción de una trayectoria recta sin cambiar su orientación.

**2. El robot apoyado sobre tres puntos de contacto con el suelo:**

Esta situación puede presentarse cuando existe el contacto del brazo con el suelo ( $F_{5z} > 0$ ). En este caso, es necesario verificar cuáles son las ruedas que han perdido el contacto con el suelo (de manera análoga como se hizo para el cálculo del índice de estabilidad con tres puntos de contacto) utilizando (29) a (32). Posteriormente, se define el índice de direccionamiento normalizado como:

$$\text{Si } F_{14} \leq 0$$

$$I_{dir} = 0$$

Si  $F_{23} \leq 0$

$$I_{dir} = 0$$

Si  $F_{12} \leq 0$

$$I_{dir} = \frac{\min(F_{3z}, F_{4z})}{W/2} \quad (35)$$

Si  $F_{34} \leq 0$

$$I_{dir} = \frac{\min(F_{1z}, F_{2z})}{W/2} \quad (36)$$

Para cualquier caso, si  $I_{dir} < 0$ ,  $I_{dir} = 0$ .

#### 4.4 Índice de deslizamiento

Cuando un robot móvil transita sobre terrenos con gran inclinación, se puede producir un fenómeno de deslizamiento en todos los puntos de contacto con el suelo, trayendo como consecuencia que el robot se resbale hacia abajo, perdiendo su posición y orientación además de la posibilidad de seguir cualquier trayectoria definida previamente. Para estimar la probabilidad de que ocurra un deslizamiento de estas proporciones, se definió este índice, el cual utiliza el principio definido a continuación:

*Definición 3:* La fuerza de fricción ( $F_r$ ) a la que está sometido un elemento curvo en contacto con el suelo cuando exhibe un movimiento de rodadura pura, tendrá un valor máximo definido por el producto de la fuerza de reacción normal ( $F_z$ ) por el coeficiente de fricción estático ( $\mu_s$ ). Una vez que la fuerza de fricción llegue a este valor máximo, el elemento en contacto con el suelo dejará de tener rodadura pura y quedará sometido a un fenómeno de deslizamiento [115]:

$$F_r \leq \mu_s F_z \quad (37)$$

Para la definición de este índice se asumió que todos los puntos de contacto del robot con el suelo estarán situados sobre un mismo plano cuya inclinación dependerá de los ángulos *roll* y *pitch* del robot. Adicionalmente, se asumió que la dirección que toma la fuerza de fricción cuando un elemento curvo (rueda) con rodadura pura se mueve sobre un terreno inclinado es la dirección de la máxima pendiente que posee la inclinación de terreno (ver Figura 45) y su sentido será el contrario al movimiento de

rodadura (en el caso de ruedas motorizadas). Se tomó esta convención en lugar de la configuración tradicional donde la fuerza de fricción se descompone en dos direcciones  $X_c Y_c$  (ver Figura 43).

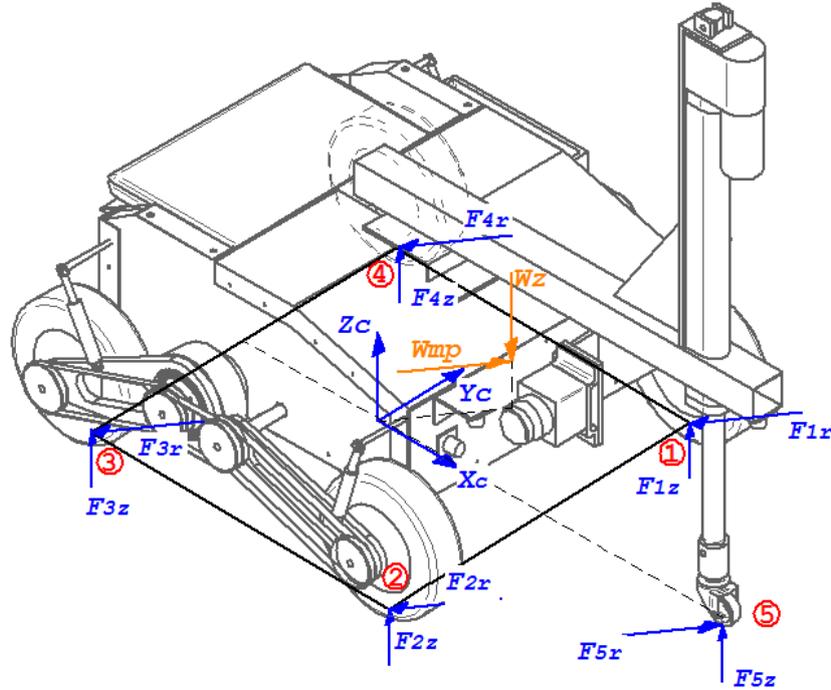


Figura 45. Lázarro mostrando las fuerzas de fricción y fuerzas normales sobre cada punto de contacto con el suelo.

Para deducir este índice, se definió, en primer lugar  $W_{mp}$ , que es la proyección del vector peso en el plano  $X_c Y_c$ , la cual coincide con la dirección de la máxima pendiente y es dependiente de los ángulos *roll* ( $\alpha$ ) y *pitch* ( $\phi$ ):

$$W_{mp} = W \cdot \sqrt{(\sin \phi)^2 + (\cos \phi)^2 (\sin \alpha)^2} \quad (38)$$

Posteriormente, se aplicó la segunda ley de Newton en dirección a la máxima pendiente, luego de asumir una condición de equilibrio cuasiestático (la cual es factible cuando el robot se mueve a bajas velocidades) y se obtuvo a:

$$F_{1r} + F_{2r} + F_{3r} + F_{4r} = W_{mp} + F_{5r} \quad (39)$$

Luego, asumiendo la condición crítica de la fricción descrita en la *Definición 3* y en (37), se obtuvo:

$$\mu_s(F_{1z} + F_{2z} + F_{3z} + F_{4z}) \geq W_{mp} + F_{5r} \quad (40)$$

Adicionalmente, se aplicó la formulación de Newton en dirección normal al plano  $X_c Y_c$ , asumiendo también la condición de equilibrio cuasiestático, con lo cual se obtuvo:

$$F_{1z} + F_{2z} + F_{3z} + F_{4z} = W_z - F_{5z} \quad (41)$$

Finalmente, sustituyendo (41) en (40), se consigue que:

$$\mu_s(W_z - F_{5z}) \geq W_{mp} + F_{5r} \quad (42)$$

La ecuación (42) constituye la condición máxima para evitar el deslizamiento del robot cuando transita sobre terrenos inclinados. A partir de esta condición, se define un índice de deslizamiento normalizado:

$$I_{desl} = \frac{|\mu_s(W_z - F_{5z})| - |W_{mp} + F_{5r}|}{|\mu_s(W_z - F_{5z})|} \quad (43)$$

el cual varía entre 0 y 1. Cuando este índice llegue a cero, el robot estará iniciando un fenómeno de deslizamiento en todos sus puntos de contacto con el suelo.

El índice de deslizamiento definido por (43) es independiente de la cantidad de puntos en contacto del robot con el suelo. Por último, se debe destacar que la fuerza de roce ejercida por el contacto del efector final del brazo con el suelo se aproximará a cero ( $F_{5r} \approx 0$ ), ya que el efector final del robot es una rueda que gira libre por lo que no presenta mayor oposición al desplazamiento del robot.

## 4.5 Estrategias para mejorar la navegabilidad de Lázaro

Una vez definidos los tres índices que se utilizarán para evaluar la navegabilidad de Lázaro cuando transita sobre terrenos inclinados, se procedió a desarrollar y evaluar cinco estrategias para conocer cual brinda mejores prestaciones de navegabilidad (aunque se hace mayor énfasis en la valoración de la estabilidad al vuelco). Cabe destacar que para el índice de deslizamiento se utilizó un coeficiente de fricción estático

entre el suelo y las ruedas de  $\mu_s = 1.0$  (coeficiente entre el caucho y hormigón). A continuación se describen estas estrategias.

**0. Brazo estático con  $\theta_1 = 0^\circ$  y sin contacto con el suelo ( $F_{5z} = 0 N$ ):**

Es la estrategia más básica de todas, ya que no requiere mover el brazo. Los índices de navegación que tendría el robot para ángulos *pitch* y *roll* entre  $\pm 45^\circ$  con esta estrategia se pueden ver en la Figura 46a.

**1. Reposicionamiento del COG ubicando el brazo en dirección contraria a la máxima pendiente:**

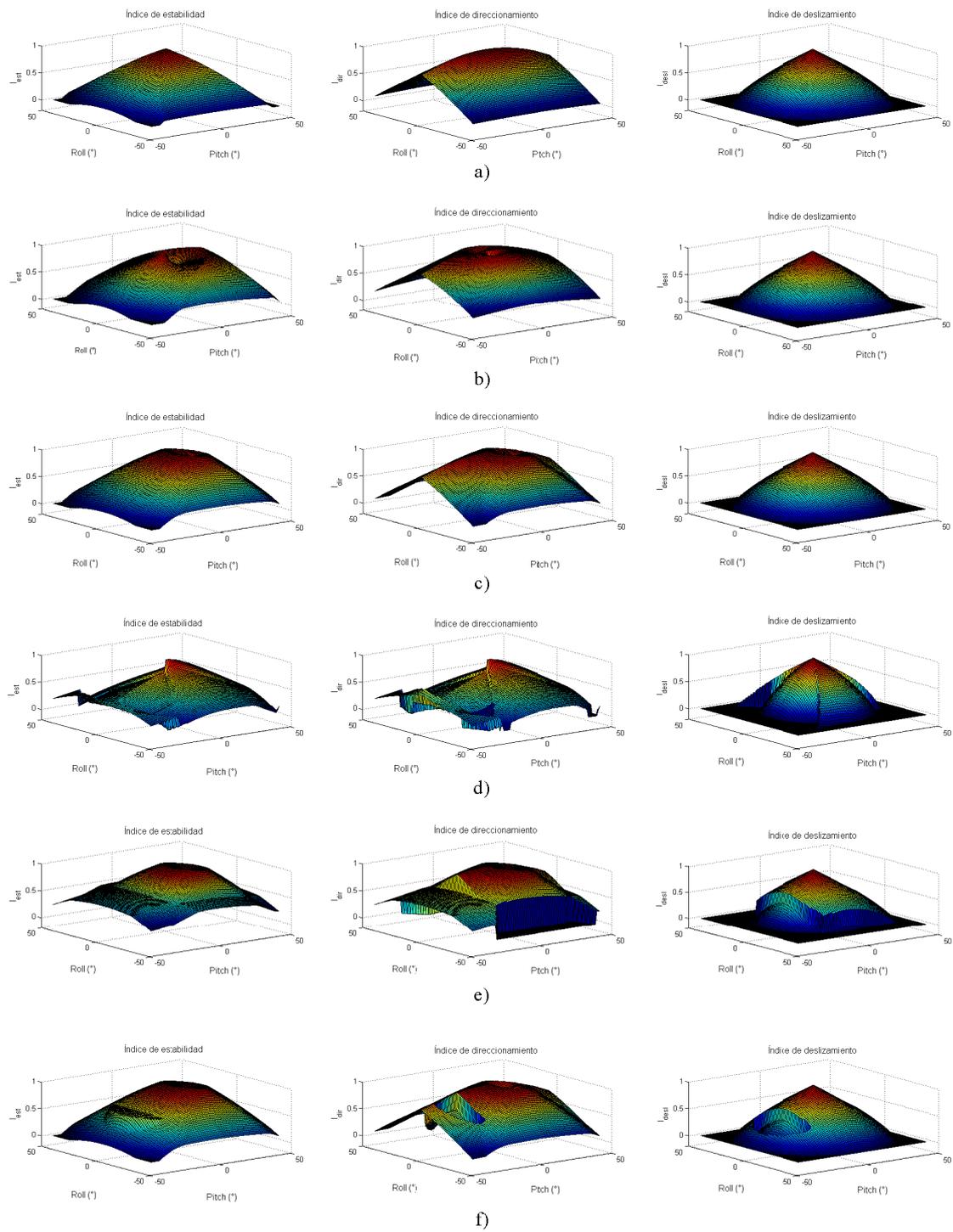
Esta estrategia se fundamenta en la siguiente hipótesis: si un robot se desplaza sobre una superficie inclinada y experimenta un fenómeno de volcamiento, quizás lo haga en la dirección de la máxima pendiente del terreno. En esta estrategia se utilizó el brazo orientando su primera articulación en la dirección contraria a la máxima pendiente exhibida por el terreno ( $\theta_{1\text{ cmp}}$ ), la cual está determinada por:

$$\theta_{1\text{ cmp}} = \tan^{-1} \left( \frac{\sin \alpha}{-\sin \phi \cos \alpha} \right) \quad (44)$$

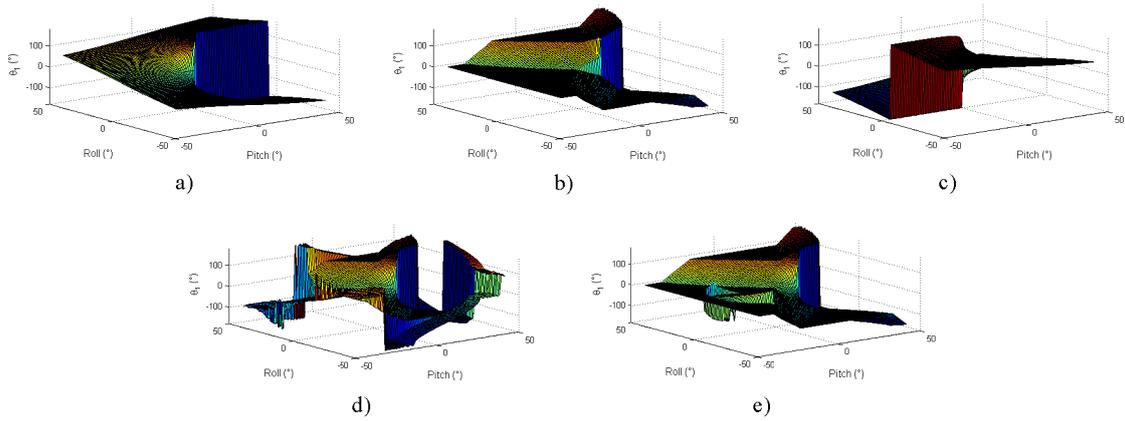
para reposicionar la proyección vertical del COG del robot dentro de su polígono de soporte y, así, evitar el vuelco. Con este enfoque el efector final del brazo no entra en contacto directo con el suelo. La Figura 47a muestra la ubicación de  $\theta_1$  óptima en función de los ángulos de inclinación *roll* y *pitch*, mientras que la Figura 46b muestra los índices de navegabilidad obtenidos para esta estrategia.

**2. Reposicionamiento del COG para la maximización de la estabilidad:**

En esta estrategia el brazo también se ubica sin que su efector final toque el suelo. La diferencia está en que la primera articulación del brazo ( $\theta_1$ ) se coloca en la dirección que maximiza el índice de estabilidad (ver Figura 47b). Esta orientación es obtenida a través de un estudio donde, para cada posible inclinación que pudiera enfrentar el robot (dada por la combinación de ángulos *roll* y *pitch*), se varía el valor de  $\theta_1$  desde  $180^\circ$  a  $-180^\circ$  para obtener el valor donde se logre dicha maximización. La Figura 46c muestra los índices de navegabilidad para este caso.



**Figura 46. Índices de estabilidad, direccionamiento y deslizamiento para las diferentes estrategias de navegación.**



**Figura 47. Posición óptima de la primera articulación del brazo ( $\theta_1$ ) de acuerdo a las estrategias de navegación.**

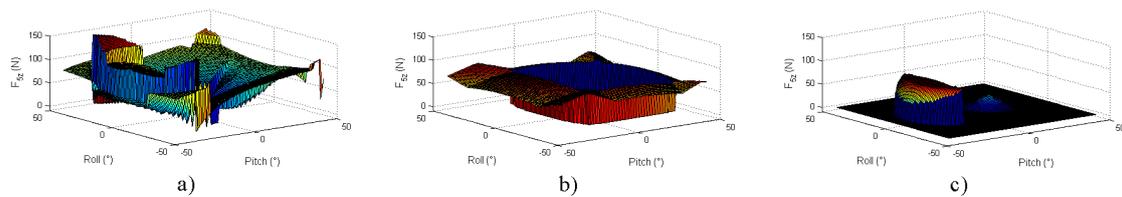
### **3. Contacto del brazo con el suelo estando ubicado en dirección a la máxima pendiente:**

Esta estrategia también se fundamenta en la hipótesis descrita en la estrategia 1. Pero en este caso, se utiliza el brazo orientando su primera articulación en la dirección de la máxima pendiente que posee el terreno  $\theta_{1mp}$  (ver Figura 47c), la cual está determinada por:

$$\theta_{1mp} = \tan^{-1} \left( \frac{-\sin \alpha}{\sin \phi \cos \alpha} \right) \quad (45)$$

para posteriormente apoyar el efector final del brazo contra el suelo, esperando que el punto de contacto adicional sirva como soporte y evite el vuelco en esa dirección.

En esta estrategia también se determinó la fuerza de reacción del efector final ( $F_{5z}$ ) necesaria para maximizar el índice de estabilidad del robot. Dicha fuerza se varió entre 0 y 147N (rango de fuerzas que puede producir el efector lineal en el brazo) y se encontró un patrón de fuerzas óptimo (en función de los ángulos de inclinación *roll* y *pitch*) mostrado en la Figura 48a. La implementación de esta fuerza en Lázaro estará garantizada por un sensor de presión que cierra el lazo de control. La Figura 46d muestra los índices de navegabilidad asociado a esta maniobra.



**Figura 48. Fuerza óptima  $F_{5z}$  ejercida por el actuador de la segunda articulación del brazo de acuerdo a la estrategia seleccionada.**

#### **4. Contacto del manipulador con el suelo para maximizar su estabilidad:**

Esta maniobra consiste en colocar el brazo en contacto con el suelo ejerciendo una fuerza de reacción con el efector final del brazo, pero procurando la maximización de su índice de estabilidad. Se hizo, para cada combinación posible de ángulos *roll* y *pitch*, una operación de búsqueda sistemática con dos parámetros ( $\theta_1$  y  $F_{5z}$ ), ya que se requirió buscar tanto el ángulo  $\theta_1$  (variable desde  $-180^\circ$  a  $180^\circ$ ) como la fuerza  $F_{5z}$  (variable entre 0 y 147 N) necesarios para maximizar el índice de estabilidad del robot. La Figura 47d y la Figura 48b muestran tanto el ángulo  $\theta_1$  como la fuerza  $F_{5z}$  en función de la inclinación del robot (*roll* y *pitch*) obtenidos después de la búsqueda. La Figura 46e muestra los índices de navegabilidad obtenidos para esta maniobra.

La Figura 48b muestra que en esta maniobra no es necesario que el brazo esté siempre en contacto con el suelo (hay zonas donde  $F_{5z} = 0$  N). Se requiere su uso cuando el robot experimenta grandes inclinaciones (ángulos *roll* y *pitch* grandes). Además, al estudiar la Figura 47d se muestra que el comportamiento del ángulo  $\theta_1$  en las zonas donde  $F_{5z} = 0$  N, es semejante al presentado en la estrategia 2 (ver Figura 47b). Este hecho muestra que la estrategia obtenida resulta ser combinación entre el contacto del brazo con el suelo (para inclinaciones grandes del terreno) y reposicionamiento del COG para la maximización de la estabilidad (utilizada en pequeñas inclinaciones del terreno).

Adicionalmente, es importante estudiar el índice de deslizamiento frente a grandes inclinaciones, ya que, al ejercer una gran fuerza  $F_{5z}$  con el brazo (ver Figura 48b), este índice tiende a 0 (ver Figura 46e). El hecho de aplicar una fuerza de reacción con el brazo disminuye las fuerzas de fricción de las ruedas con el suelo, lo que puede provocar deslizamiento sobre el terreno. Este segundo hecho, prácticamente invalida

esta estrategia ya que, aunque se consiguen índices de estabilidad elevados cuando se navega sobre superficies muy inclinadas, también se propicia el deslizamiento.

**5. Contacto del brazo con el suelo para maximizar su estabilidad, garantizando su direccionamiento y evitando el deslizamiento:**

Esta última maniobra también consiste en colocar el brazo en contacto con el suelo ejerciendo una fuerza de reacción con su efector final, pero se busca optimizar la orientación del brazo ( $\theta_{1\ opt}$ ) y la fuerza de contacto ( $F_{5z\ opt}$ ) de manera que los tres índices propuestos sean mayores que 0.1, junto a la maximización del índice de estabilidad.

El criterio descrito también contempla que en aquellas zonas donde, debido a la gran inclinación del terreno no se logre la primera condición (índices mayores a 0.1), se busca la optimización considerando la fuerza de reacción  $F_{5z} = 0\ N$  y maximizando el índice de estabilidad. Así, el criterio se resume en:

$$\begin{aligned}
 & \text{Si } I_{est} > 0.1 \wedge I_{dir} > 0.1 \wedge I_{desl} > 0.1 \\
 & \quad F_{5z\ opt}, \theta_{1\ opt} = F(\alpha, \phi, \max(I_{est})) \\
 & \text{Caso contrario} \tag{46} \\
 & \quad \theta_{1\ opt} = F(\alpha, \phi, (F_{5z} = 0), \max(I_{est}))
 \end{aligned}$$

Se tomó esta premisa ( $F_{5z} = 0\ N$ ) como parte de esta segunda condición, ya que la primera condición siempre fallará en terrenos con alta inclinación donde el índice de deslizamiento tiende a cero y, en estos casos, la aplicación de una fuerza de reacción  $F_{5z}$  acelera la disminución de este índice.

Al igual que la estrategia No. 4, se hizo una operación de optimización a través de una búsqueda sistemática para obtener tanto el ángulo  $\theta_1$  (variable desde  $-180^\circ$  a  $180^\circ$ ) como la fuerza  $F_{5z}$  (variable entre 0 y 147 N) necesarios para satisfacer el criterio de optimización descrito anteriormente. La Figura 47e y la Figura 48c, resumen los resultados obtenidos para este caso. Además, se debe destacar que esta estrategia también resulta ser una composición de la estrategia No. 2: *Reposicionamiento del COG para la maximización de la estabilidad* (casi en su mayoría), combinada con la estrategia No. 4. El contacto con el suelo se evidencia en dos zonas en la Figura 48c

donde  $F_{5z} > 0 \text{ N}$ . La Figura 46f muestra los índices de navegabilidad obtenidos para esta maniobra.

#### 4.5.1 Análisis y selección de la estrategia a implementar

El análisis para seleccionar la mejor estrategia que será implementada en Lázaro, se realizó evaluándolas en función de los tres índices definidos anteriormente, aunque se hizo mayor énfasis en el índice de estabilidad, ya que ante los tres fenómenos que pudieran dificultar la navegabilidad del robot (vuelco, deslizamiento y falta de direccionamiento), es la estabilidad al vuelco la que se considera más crítica.

Es importante considerar el comportamiento del índice de deslizamiento cuando se implementan las distintas estrategias de navegación que se diseñaron. Al observar este índice en la Figura 46, se puede comprobar que las estrategias donde el brazo nunca toca el suelo: brazo estático con  $\theta_1 = 0^\circ$  (ver Figura 46a), reposicionamiento del COG ubicando el brazo en dirección contraria a la máxima pendiente (ver Figura 46b) y reposicionamiento del COG para la maximización de la estabilidad (ver Figura 46c), exhiben el mismo índice de deslizamiento. Este comportamiento coincide con lo expresado en (43), ya que este índice depende fundamentalmente del coeficiente de fricción, peso, ángulos *roll* y *pitch*, y la fuerza  $F_{5z}$ . Para estas estrategias,  $F_{5z} = 0 \text{ N}$  y las demás variables son iguales, con lo que exhibirán el mismo índice. Además, se puede considerar que este índice es afectado negativamente por la implementación de una fuerza de perturbación como  $F_{5z}$ , ya que en aquellas estrategias donde se usa la fuerza de contacto del brazo con el suelo, el índice de deslizamiento decrece hasta llegar a cero en la medida que se incrementa  $F_{5z}$ .

La Tabla 3 muestra el índice de estabilidad medio y la desviación típica ( $\sigma$ ) para las seis estrategias diseñadas. Entre todas, es la estrategia No. 4 la que exhibe mayor índice de estabilidad con  $\sigma$  pequeño. Pero, como se mencionó anteriormente, el bajo índice de deslizamiento que esta estrategia genera al compararse con otras estrategias, y el descenso del mismo a cero cuando la inclinación del terreno es pronunciada (ver Figura 46e) prácticamente invalida esta estrategia.

**Tabla 3. Comparación de los índices de navegabilidad entre las estrategias diseñadas.**

	<b>Estrategia 0</b>	<b>Estrategia 1</b>	<b>Estrategia 2</b>	<b>Estrategia 3</b>	<b>Estrategia 4</b>	<b>Estrategia 5</b>
<b>Estabilidad</b>						
<b>Valor medio</b>	0.3917	0.4836	0.5241	0.4325	0.6028	0.5300
<b>Desviación típica</b>	0.2414	0.2314	0.2547	0.1693	0.1792	0.2561
<b>Deslizamiento</b>						
<b>Valor medio</b>	0.3111	0.3111	0.3111	0.1900	0.2511	0.2927
<b>Desviación típica</b>	0.2700	0.2700	0.2700	0.2708	0.2927	0.2686
<b>Direccionamiento</b>						
<b>Valor medio</b>	0.5159	0.6251	0.5954	0.4265	0.5186	0.5699
<b>Desviación típica</b>	0.2460	0.2226	0.2289	0.1883	0.3094	0.2296

La estrategia No. 5 presenta el índice de estabilidad medio más elevado después de la estrategia No. 4 (ver Tabla 3), por lo que, de acuerdo al criterio de selección establecido, debe ser la próxima opción a considerar. Al evaluar el índice de deslizamiento para esta estrategia, se consigue que su valor medio, no sea tan elevado como en otras estrategias. Pero de acuerdo a la Figura 46f, el área de la base donde este índice es mayor que cero, resulta igual que para otras estrategias con índice de deslizamiento promedio más elevado, por lo que, el robot no se verá afectado por deslizamiento más de lo que se vería afectado al utilizar otra de las estrategias estudiadas, especialmente las No. 1 y 2, que son las que poseen un índice de deslizamiento promedio más elevado.

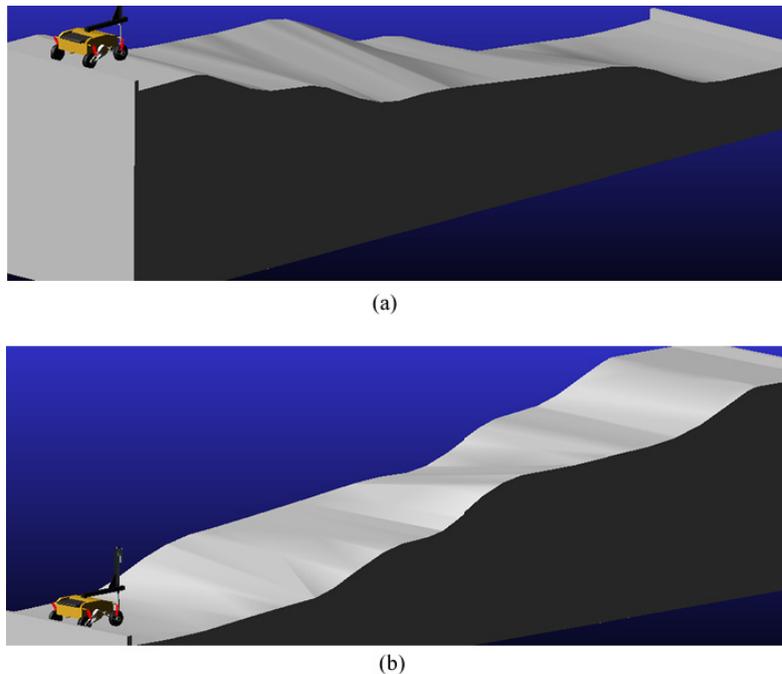
La estrategia No. 5 presenta este mismo comportamiento respecto al índice de direccionamiento. En este caso, aunque el índice de direccionamiento promedio no es tan alto, el robot podrá ser direccionado para casi cualquier inclinación de terreno, a excepción de inclinaciones pronunciadas donde los ángulos *roll* y *pitch* (ambos) se acerquen a  $\pm 45^\circ$  (ver Figura 46f). De acuerdo con ésto, y siguiendo el criterio establecido inicialmente, se seleccionó la estrategia No. 5 como la mejor estrategia para ser implementada en Lázaro.

Por último, es importante destacar que, aunque se seleccionó la estrategia No. 5 como aquella que provee las mejores prestaciones para el incremento de la estabilidad (después de descartar la estrategia No. 4), no se debe obviar la estrategia No. 2, ya que

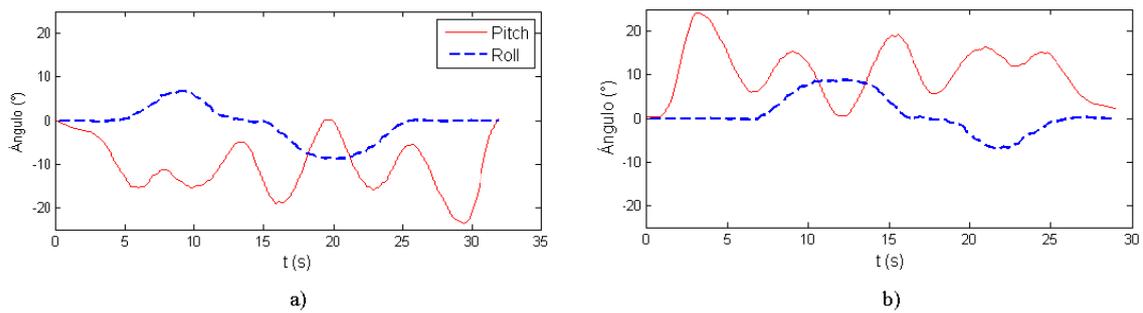
posee un índice de estabilidad medio un poco menor que el mostrado en la estrategia No. 5 (ver Tabla 3) pero con una desviación típica semejante; por lo que se puede considerar que también es apropiada para mejorar la estabilidad del robot mientras se desplaza sobre terrenos inclinados.

## 4.6 Validación de los índices propuestos

Para validar los índices de estabilidad, direccionamiento y deslizamiento, se simuló a Lázaro con el software *ADAMS*. El proceso de modelado del robot en este entorno se describe en el Apéndice B. Además, se colocó al robot sobre una plataforma virtual de pruebas que consistió en un terreno de superficies inclinadas en varias direcciones. El robot cumplió dos recorridos, uno subiendo sobre la plataforma y el otro bajando la misma plataforma (ver Figura 49). La inclinación del terreno para ambos casos (en función de los ángulos *roll* y *pitch*) está representada en la Figura 50. Posteriormente se hicieron cuatro simulaciones para cada recorrido, en cada una el robot se desplaza en línea recta ejecutando una estrategia distinta respecto al uso del brazo (estrategias 0, 1, 3 y 5). Los resultados obtenidos en las simulaciones (índices de estabilidad, direccionamiento y deslizamiento) se compararon con las ecuaciones teóricas descritas en las secciones anteriores.

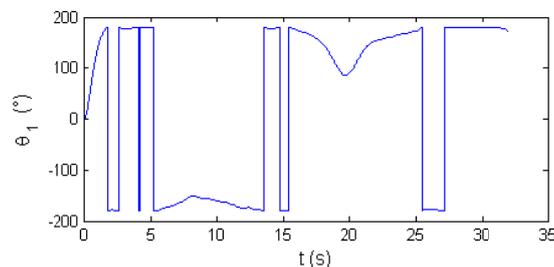


**Figura 49. Rampa para pruebas simuladas con Lázaro al comienzo del (a) descenso y (b) ascenso en línea recta.**



**Figura 50. Ángulos *roll* y *pitch* durante el desplazamiento para a) subir y b) bajar la plataforma de pruebas.**

A continuación se muestran los resultados de una simulación (de un total de ocho simulaciones realizadas) donde el robot asciende sobre el terreno con la estrategia No. 2. En la Figura 50a se muestra la inclinación del robot durante su desplazamiento (en función de los ángulos *roll* y *pitch*) y en la Figura 51, se muestra la ubicación de la primera articulación del brazo ( $\theta_1$ ) de acuerdo a esta estrategia. Se observan en esta gráfica aparentes discontinuidades entre los valores de  $-180^\circ$  y  $180^\circ$ , lo cual no implica un salto en el movimiento del brazo para llegar a estas posiciones, ya que los valores de  $-180^\circ$  y  $180^\circ$  corresponden a la misma posición de la primera articulación ubicada en la parte posterior del robot. Adicionalmente, se debe destacar que los valores de  $\theta_1$  fluctúan alrededor de los  $180^\circ$  puesto que la estrategia que siguió el brazo en esta simulación fue ubicarse con dirección hacia la máxima pendiente del suelo, la cual corresponde a posiciones cercanas a los  $180^\circ$  si el robot va ascendiendo con ángulos *roll* cercanos a cero.



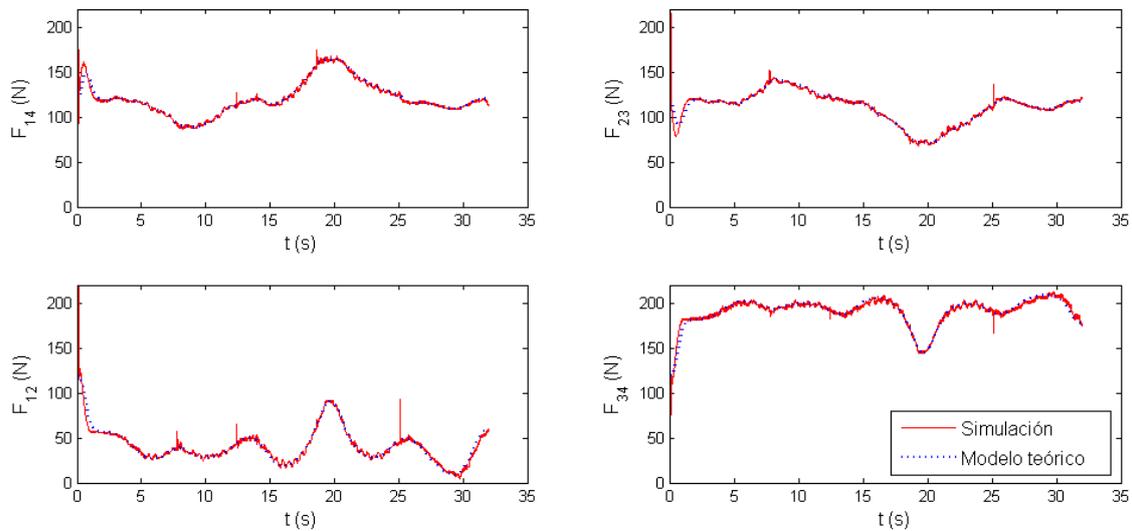
**Figura 51. Posición  $\theta_1$  de la primera articulación del brazo durante una simulación donde Lázaro asciende sobre una rampa de pruebas.**

En la Figura 52 se expone la comparación gráfica entre los valores teóricos de la suma de fuerzas de reacción sobre un eje de vuelco ( $F_{nm}$ ) obtenidos a través de las correspondientes ecuaciones y sus equivalentes obtenidos a partir de la simulación.

Asimismo, la Figura 53 muestra la comparación entre los índices propuestos para evaluar la navegabilidad obtenidos teóricamente y los mismos obtenidos a través de la simulación. En el caso del índice de deslizamiento era necesario comparar la ecuación teórica (43), con los resultados de simulación, por lo que se utilizó:

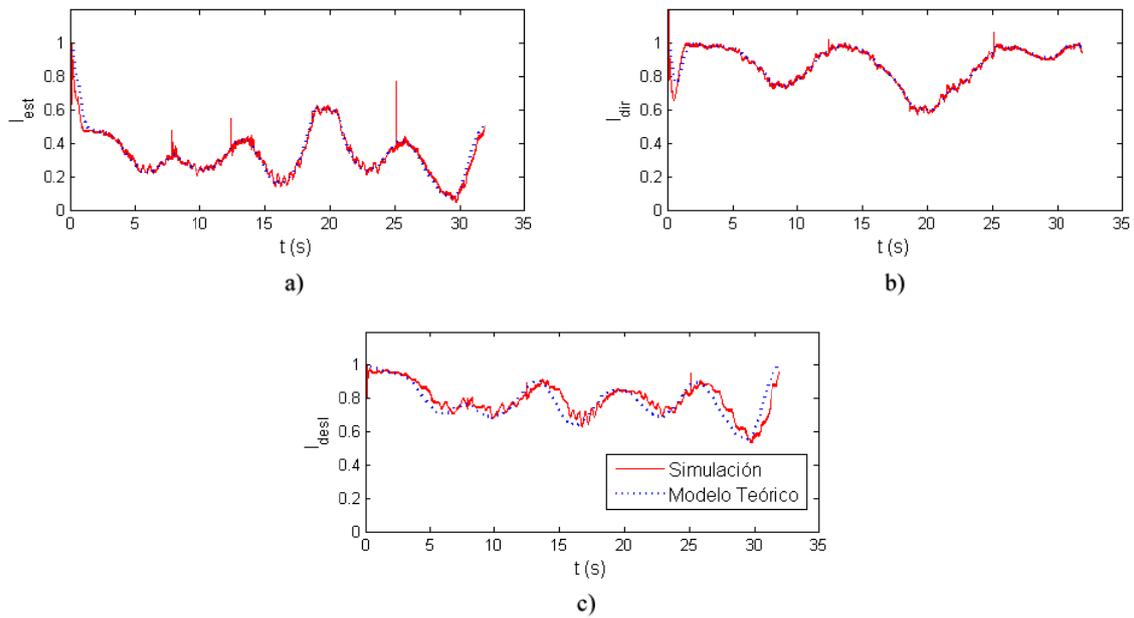
$$I_{desl} = \frac{|\mu_s \cdot \sum_{i=1}^4 F_{iz}| - |\sum_{i=1}^4 F_{ir}|}{|\mu_s \cdot \sum_{i=1}^4 F_{iz}|} \quad (47)$$

que toma en consideración las fuerzas de fricción ejercidas sobre los puntos de contacto del robot con el suelo, los cuales fueron obtenidos directamente de la simulación. Es importante recalcar que para estas simulaciones se definió un coeficiente de fricción estático entre las ruedas y el suelo con un valor de  $\mu_s = 1.0$  (coeficiente de fricción entre las ruedas fabricadas de caucho macizo ranurado y hormigón, obtenido experimentalmente).



**Figura 52. Reacciones en los ejes de vuelco obtenidos durante una simulación donde Lázaro asciende sobre la rampa de pruebas.**

Una vez obtenidos los resultados de las ocho simulaciones se hizo un análisis de validación para conocer cómo se corresponden los modelos teóricos respecto a las simulaciones realizadas. Para ello, se midió el error medio y el error cuadrático medio (ECM) para los índices de estabilidad, direccionamiento y deslizamiento en las ocho simulaciones. La Tabla 4 muestra los errores al analizar los índices de estabilidad, direccionamiento y deslizamiento.



**Figura 53. Índices de navegabilidad: a) estabilidad, b) direccionamiento y c) deslizamiento, obtenidos durante una simulación donde Lázaro asciende sobre la rampa de pruebas.**

**Tabla 4. Errores obtenidos al comparar resultados teóricos con simulaciones.**

Estrategia	Descenso				Ascenso			
	0	1	3	5	0	1	3	5
<b>Estabilidad</b>								
Error medio (%)	1.74	1.63	3.30	2.79	1.61	1.81	2.22	1.68
ECM (%)	4.97	4.39	6.19	8.84	4.68	5.02	6.38	5.64
<b>Direccionamiento</b>								
Error medio (%)	1.03	1.25	2.02	2.46	0.79	1.07	1.42	1.19
ECM (%)	3.71	3.29	3.67	6.61	4.19	6.02	6.63	5.30
<b>Deslizamiento</b>								
Error medio (%)	2.68	2.31	3.19	2.66	2.45	2.52	4.21	2.81
ECM (%)	4.76	3.95	9.71	3.50	4.00	3.55	5.68	4.52

Una vez recopilados todos los errores porcentuales de las ocho simulaciones para todos los índices propuestos, se encontró que el error en todos los casos resultó ser menor al 10% (el error máximo fue del 9.71%); por lo que se concluye de este análisis que los índices propuestos presentan una certeza de hasta el 90%. En función de ello, se

tomará como criterio en los algoritmos de control del robot que, cuando alguno de los índices calculados llegue a un valor mínimo de 0.1, se considerará en situación crítica.

#### 4.6.1 Efectividad del índice de deslizamiento

En las simulaciones descritas anteriormente se validaron las ecuaciones teóricas deducidas respecto a los valores obtenidos en simulación. En este apartado, lo que se busca validar es la efectividad del índice propuesto. Para ello se hicieron un conjunto de simulaciones donde Lázaro navega sobre terrenos con inclinación que se incrementa con el avance del mismo. Se busca encontrar el instante de tiempo en el que el robot comience a experimentar deslizamiento. En dicho punto se quiere establecer comparaciones con el índice de deslizamiento propuesto, que en esos momentos debe tener valores entre 0 y 0.1 (de acuerdo al rango de confiabilidad obtenida en las validaciones anteriores).

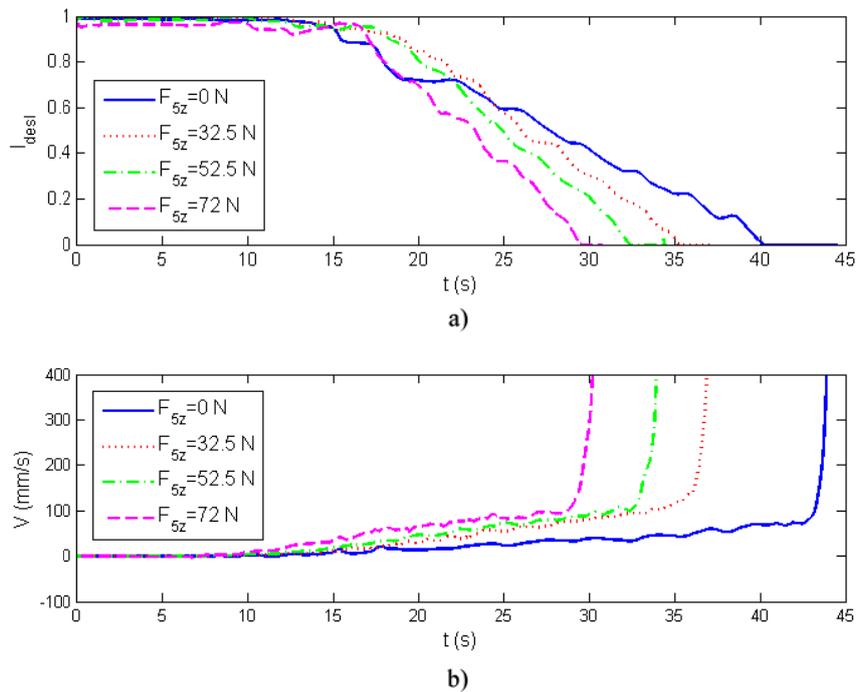
Se realizaron las simulaciones sobre tres superficies de prueba las cuales son: 1) robot subiendo sobre una superficie con *pitch* variable, 2) robot bajando sobre una superficie con *pitch* variable y 3) robot desplazándose sobre una superficie con *roll* variable. En cada situación, se simuló el robot con el efector final del brazo en contacto con el suelo y ejerciendo una fuerza de reacción variable. Es importante recalcar que para observar el deslizamiento del robot se definió un coeficiente de fricción estático entre las ruedas y el suelo con un valor de  $\mu_s = 0.5$ .

Se muestran los resultados del último caso (para los dos primeros se consiguen resultados parecidos), donde el robot se desplaza sobre una plataforma con *roll* variable (ver Figura 54) cuya inclinación haría deslizar al robot transversalmente respecto a su avance. Se hicieron cuatro experiencias, la primera con el brazo situado al frente pero sin ejercer ninguna fuerza de contacto con el suelo y, en las demás, con el brazo ejerciendo una fuerza constante de 32.5 N, 52.5 N y 72 N.



**Figura 54.** Robot Lázaro desplazándose sobre una superficie de pruebas con ángulo *roll* variable.

Los resultados de esta prueba se encuentran en la Figura 55a donde se muestra el índice de deslizamiento en las cuatro simulaciones hechas. Se observa que el  $I_{desl} = 0$  a los  $40.26\text{ s}$  cuando  $F_{5z} = 0\text{ N}$ ; a los  $35.23\text{ s}$  cuando  $F_{5z} = 32.5\text{ N}$ ; a los  $32.42\text{ s}$  cuando  $F_{5z} = 52.5\text{ N}$ , y a los  $29.56\text{ s}$  cuando  $F_{5z} = 72\text{ N}$ . Se debe comparar esta información con la Figura 55b, donde se muestra la velocidad del robot en dirección transversal al desplazamiento. Se presume que, cuando el robot comience a deslizar, la velocidad transversal cambie abruptamente su magnitud producto del descenso lateral sobre la superficie a causa del deslizamiento.



**Figura 55.** Resultados de la simulación cuando Lázaro se desplaza sobre una superficie con *roll* variable: a) índice de deslizamiento, b) velocidad transversal de deslizamiento.

Comparando las Figura 55a y Figura 55b, se vislumbra que, efectivamente, para cada simulación, la velocidad sufre un cambio importante de pendiente cuando el  $I_{desl}$  correspondiente a cada experiencia tiende a valores entre 0 y 0.1, lo cual permite concluir que, efectivamente, el robot comienza a deslizar cuando el  $I_{desl} \approx 0$ . Solo en el caso cuando  $F_{5z} = 0 N$ , el índice predice de manera prematura el inicio del deslizamiento con un adelanto de 3 s. Este pronóstico aunque no es óptimo, permite tomar acciones de control en la navegación antes de que se inicie el deslizamiento.

#### 4.6.2 Validación experimental del índice de deslizamiento

Previamente, se evaluó la efectividad del índice de deslizamiento utilizando herramientas de simulación. A continuación, se describe el mismo proceso realizado a través de pruebas experimentales. Para ello, se utilizó una pista de patinaje tipo *Halfpipe* (medio tubo) fabricada de hormigón pulido como área de pruebas. Ante la presencia de esta superficie con coeficiente de fricción desconocido, se utilizó:

$$\mu_s = \tan \phi_{lim} \quad si \quad \alpha = 0^\circ \quad (48)$$

para obtener el coeficiente de fricción estático ( $\mu_s$ ), donde  $\phi_{lim}$  es el ángulo *pitch* que puede soportar el contacto entre el robot (estando en una posición estática) y el suelo antes de que se inicie el deslizamiento. Utilizando esta ecuación se encontró un coeficiente de fricción estático  $\mu_s = 0.65$  para esta superficie de pruebas.

Un primer conjunto de experimentos realizados consistieron en colocar al robot frente al área de pruebas en posición de ascenso de manera que se lograra una variación de su ángulo *pitch* ( $\phi$ ) mientras que el ángulo *roll* ( $\alpha$ ) debía permanecer cercano a cero. Bajo esta premisa se hicieron dos pruebas: una sin el contacto del efector final del brazo con el suelo y la otra, manteniendo el contacto del efector final del brazo de manera que  $F_{5z} > 0$ . La Figura 56 muestra la secuencia del ascenso del robot en el caso del contacto del efector final con el suelo. En ambas pruebas, el robot comenzó a ascender hasta una posición donde el deslizamiento se hizo evidente: las ruedas comenzaron a deslizar sobre el terreno quedando el robot en posición estática sin lograr ningún avance adicional.

La Figura 57 muestra los resultados de ambas pruebas. En el caso de la prueba donde el efector final del brazo no tocaba el suelo (ver Figura 57a), el  $I_{dest}$  descendió al valor 0 por primera vez a los 13 s de la prueba; en este mismo instante se observa que el ángulo *pitch* que describe el ascenso del robot sobre la rampa comenzó a experimentar pequeños ascensos y descensos para luego estabilizarse en un valor de  $\phi = -32^\circ$ , lo cual es evidencia del inicio del fenómeno de deslizamiento precisamente en el instante cuando  $I_{dest} = 0$ .

En la segunda prueba ( $F_{5z} > 0$ ) se evidenció un comportamiento similar (ver Figura 57b), pero en esta oportunidad a los 8.5 s de la prueba; cabe destacar que la presencia de una  $F_{5z} \approx 76\text{ N}$  aceleró el fenómeno de deslizamiento, el cual ocurrió incluso frente una menor pendiente del terreno ( $\phi = -27^\circ$ ), demostrándose entonces la influencia que ejerce la fuerza de reacción ejercida sobre el punto de contacto adicional ( $F_{5z}$ ) sobre el  $I_{dest}$ : a mayor  $F_{5z}$ , menor  $I_{dest}$ , lo cual se traduce en un incremento en la posibilidad de deslizamiento.

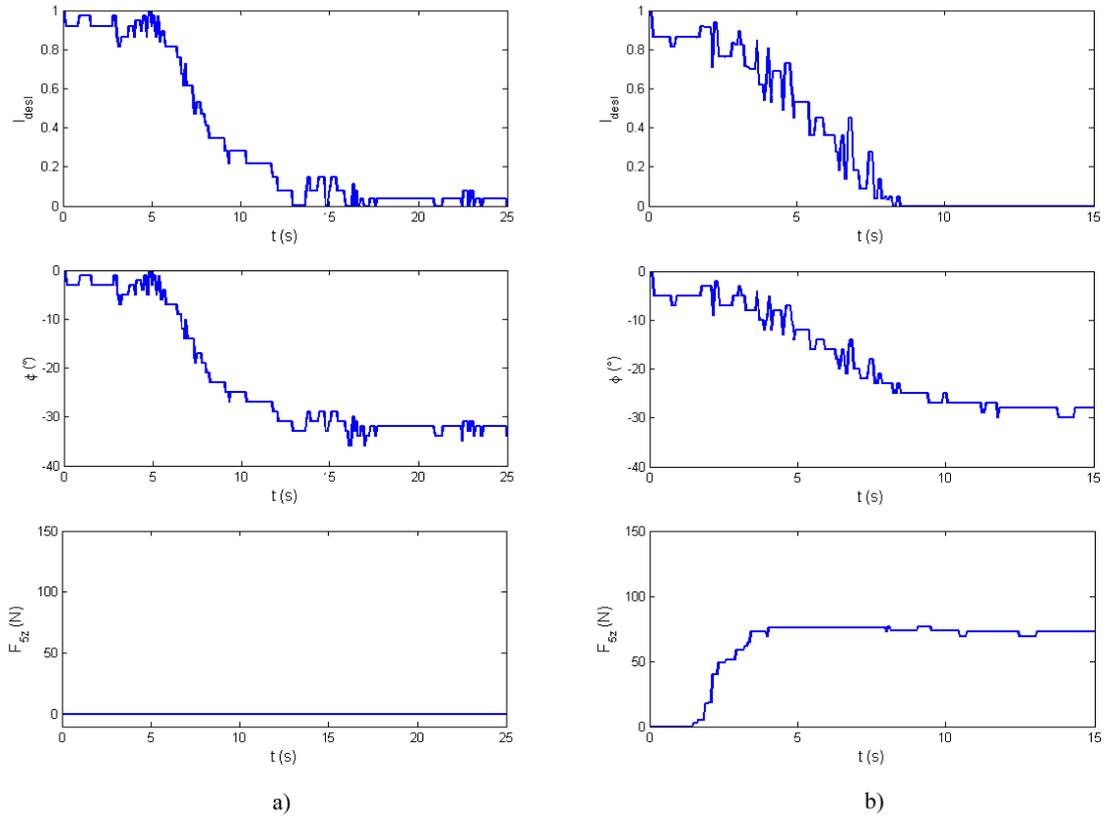


**Figura 56. Secuencia seguida por el robot Lázaro durante un ascenso con *pitch* variable y  $\alpha = 0$ .**

El segundo conjunto de experimentos realizados consistieron en colocar nuevamente al robot frente a la superficie de pruebas en posición de ascenso, pero en esta oportunidad se ubicó el robot de manera que los ángulos *roll* y *pitch* variaran con el ascenso (ver Figura 58). También se hicieron dos pruebas: una sin el contacto adicional del brazo con el suelo y otra donde se evidencia el contacto del efector final de manera que  $F_{5z} > 0$ .

Al realizar las pruebas se encontró que el robot comenzó a ascender hasta un instante donde el deslizamiento se hizo tangible en dos etapas: primeramente las ruedas comenzaron a deslizar sobre el terreno sin un avance adicional del robot y, posteriormente, se produjo una desviación de la trayectoria seguida por el robot (ver Figura 58, tercera y cuarta imagen) con un deslizamiento del robot hacia abajo hasta una

posición donde la inclinación del terreno fuese baja. Allí, nuevamente, se produjo el agarre entre las ruedas y el suelo.



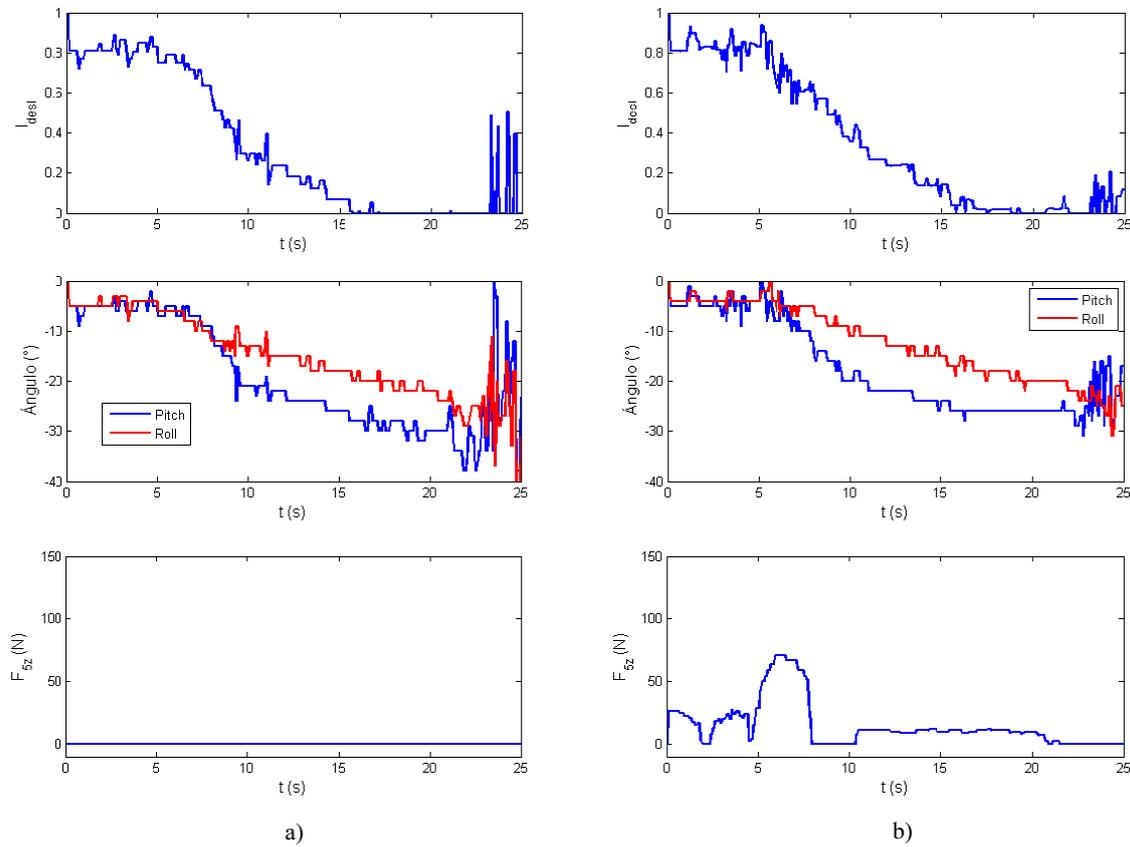
**Figura 57.** Respuesta del índice de deslizamiento en pruebas realizadas por Lázaro durante un ascenso con *pitch* variable y  $\alpha = 0$ . a)  $F_{5z} > 0$ . b)  $F_{5z} < 0$ .



**Figura 58.** Secuencia seguida por Lázaro durante un ascenso con *roll* y *pitch* variables.

En el caso donde el efector final del brazo no tocaba el suelo (ver Figura 59a), el  $I_{desl}$  descendió al valor 0 por primera vez a los 16 s de la prueba. Nótese que, antes de ese instante, los ángulos *roll* y *pitch* exhibieron un descenso progresivo (sinónimo del ascenso del robot), pero a partir de los 16 s comenzaron a mostrar ascensos y descensos intermitentes, lo cual es sinónimo del inicio del proceso del deslizamiento. Cabe destacar que a partir de los 21 s, se visualizan variaciones bruscas de estos ángulos: en

este instante se inició la segunda etapa del deslizamiento cuando el robot pierde su trayectoria y comienza a resbalar hacia abajo, por lo que las lecturas de los ángulos *roll* y *pitch* son afectadas grandemente.



**Figura 59. Respuesta del índice de deslizamiento en pruebas realizadas por Lázaro durante un ascenso con *roll* y *pitch* variables. a)  $F_{5z} > 0$ . b)  $F_{5z} < 0$ .**

En la segunda prueba ( $F_{5z} < 0$ ) se evidenció un comportamiento similar (ver Figura 59b) aun cuando en este caso es más tangible el inicio del deslizamiento. Se observa que  $I_{desl}$  descendió al valor 0 por primera vez a los 16 s de la prueba. En ese mismo instante se observa una completa estabilización del ángulo *pitch* y una disminución mínima del ángulo *roll* (evidencia del inicio del deslizamiento). Después, comienza la segunda etapa del deslizamiento a los 22 s cuando el robot pierde su trayectoria y comienza a deslizarse hacia abajo (evidenciado por variaciones bruscas de los ángulos *roll* y *pitch*). Por último, se quiere resaltar nuevamente la influencia de la fuerza  $F_{5z}$  sobre el  $I_{desl}$ : cuando  $F_{5z} = 0$ , el robot ascendió sin deslizamiento hasta que  $\alpha \approx -20^\circ$  y  $\phi \approx -28^\circ$ , pero cuando  $F_{5z}$  se incrementó a 10 N, el ascenso sin

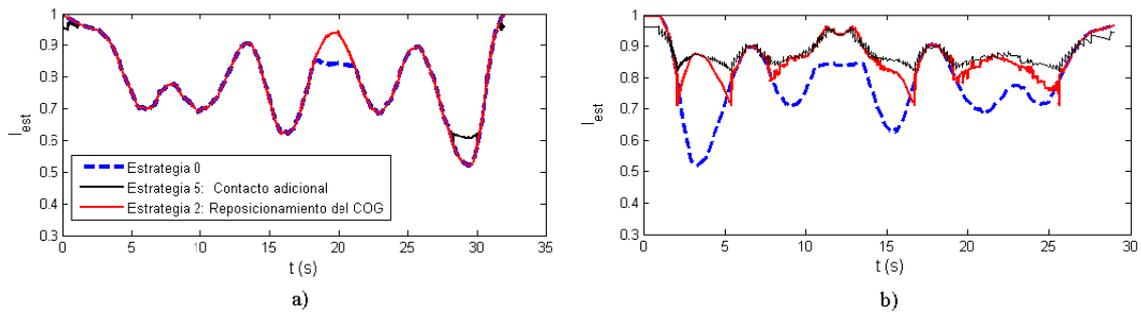
deslizamiento fue menor, ya que en teste caso,  $\alpha \approx -18^\circ$  y  $\phi \approx -26^\circ$ , lo cual evidencia el efecto negativo que posee la presencia de  $F_{5z}$  sobre  $I_{dest}$ .

## 4.7 Pruebas simuladas sobre superficies inclinadas

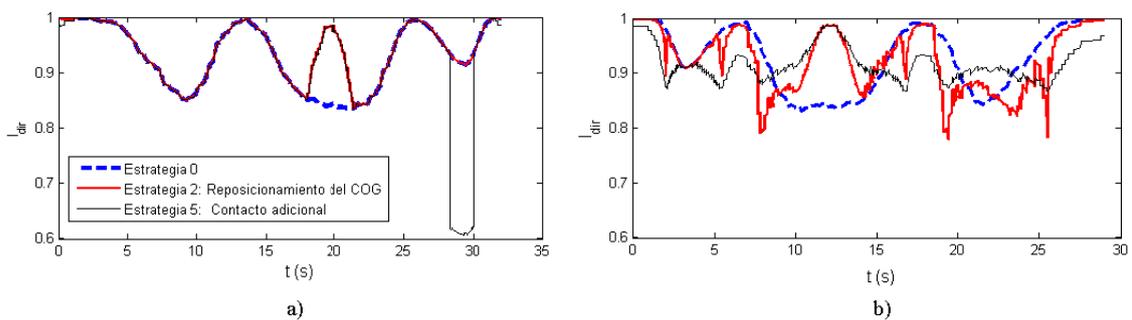
Una vez validadas las ecuaciones teóricas correspondientes al cálculo de las fuerzas de reacción e índices de navegabilidad a través de las simulaciones, se compararon los índices de navegabilidad teóricos para las dos estrategias más promisorias (estrategias No. 5 y No. 2), utilizando los dos recorridos en línea recta en los que se simuló el robot de acuerdo con la Figura 49. También se incluyó la estrategia más básica, la No. 0, en la comparativa.

Al observar los índices de estabilidad para todas las estrategias (ver Figura 60), se comprobó que con la estrategia No. 5 este índice se mantiene casi siempre en una posición más elevada. Adicionalmente, respecto a los índices de direccionamiento y deslizamiento (ver Figuras 61 y 62), se encontró que con esta estrategia no siempre son los más elevados. Este comportamiento concuerda con el criterio que se utilizó para el diseño y selección de la estrategia apropiada, ya que se esperaba obtener el mayor índice de estabilidad a pesar de una disminución aceptable en los demás índices de navegabilidad.

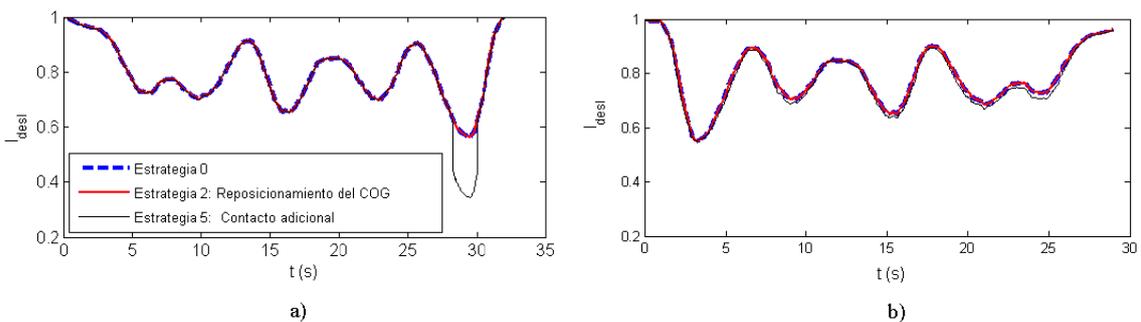
Un ejemplo de este comportamiento está representado en los resultados de la simulación donde el robot sube sobre la rampa de pruebas. Desde el segundo 28 hasta el 30, los índices de deslizamiento y direccionamiento para la estrategia No. 5 sufren una disminución abrupta (ver Figuras 61a y 62a). Esta disminución ocurre en un momento cuando el robot está transitando sobre un terreno con gran inclinación (ver Figura 50a). En ese instante, el brazo toca el suelo con una fuerza de contacto  $F_{5z}$  grande (ver Figura 63a), lo cual produce una disminución de los índices de deslizamiento y direccionamiento, pero evita una mayor caída en el índice de estabilidad (ver Figura 60a).



**Figura 60. Índice de estabilidad durante desplazamiento para a) subir y b) bajar la rampa de pruebas.**



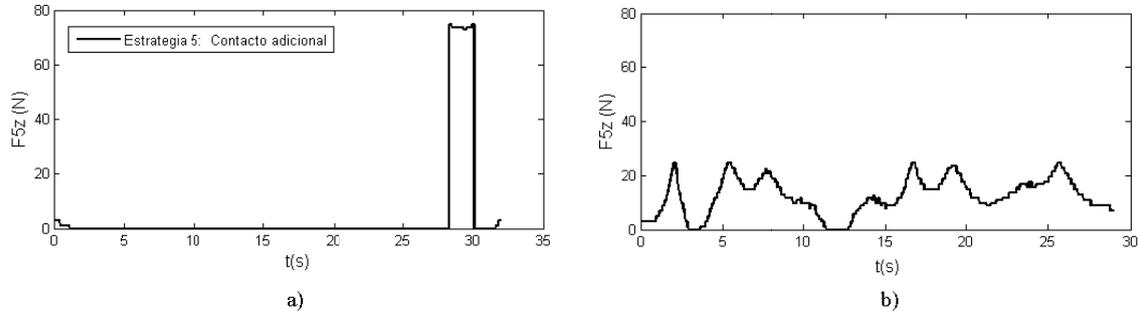
**Figura 61. Índice de direccionamiento durante desplazamiento para a) subir y b) bajar la rampa de pruebas.**



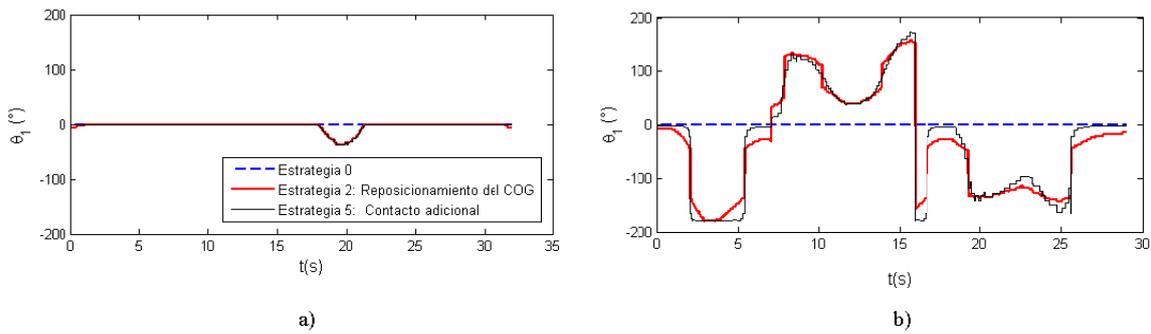
**Figura 62. Índice de deslizamiento durante desplazamiento para a) subir y b) bajar la rampa de pruebas.**

Durante el tiempo restante de la prueba de ascenso, no se percibe un comportamiento distinto entre los índices de navegabilidad mostrados en las estrategias No. 5 y No. 2. Este comportamiento similar es producto del parecido que existe entre estas estrategias para algunas inclinaciones y, en la prueba de ascenso coincide mayormente con el brazo hacia delante sin contacto con el suelo como en la estrategia No. 0. Ésto se demuestra en la Figura 64a, donde la primera articulación del brazo se

mueve de igual manera para ambas estrategias en la mayoría del tiempo; y respecto al contacto del efector final del brazo con el suelo, solo existe desde el segundo 28 hasta el 30.



**Figura 63. Fuerza de reacción  $F_{5z}$  con el cual el efector final del brazo toca el suelo durante su desplazamiento para a) subir y b) bajar la rampa de pruebas.**



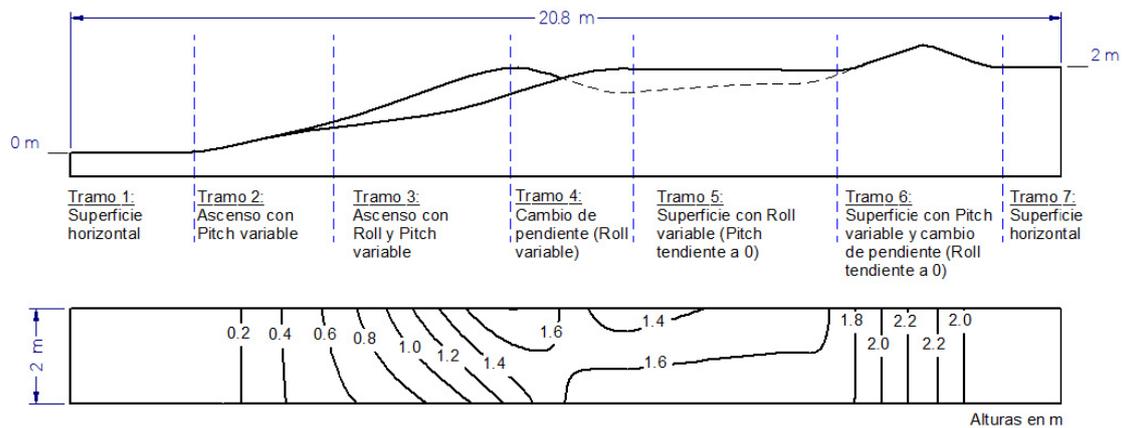
**Figura 64. Ángulo de rotación de la primera articulación del brazo ( $\theta_1$ ) durante el desplazamiento del robot para a) subir y b) bajar la rampa de pruebas.**

Este comportamiento no se repite durante la prueba de descenso. En este caso, la primera articulación del brazo (ver Figura 64b) posee un accionamiento distinto para las tres estrategias estudiadas y se presenta para la estrategia No. 5, un contacto casi constante entre el efector final del brazo y el suelo (ver Figura 63b). Por lo cual, se obtienen índices de navegabilidad totalmente distintos entre las estrategias estudiadas; pero cabe resaltar que en la estrategia No. 5, el índice de estabilidad siempre es superior si se compara con las otras estrategias (ver Figura 60b). Respecto a los demás índices de navegabilidad (ver Figuras 61b y 62b) no son siempre los más altos, pero se mantienen en valores considerados aceptables, por lo cual se confirma el criterio de selección de la estrategia para el mejoramiento de la navegabilidad. Por último, cabe destacar que el índice de deslizamiento para la estrategia No. 5 (ver Figura 62b) siempre fue un poco

menor en esta prueba, debido a la presencia de una pequeña fuerza de contacto  $F_{5z}$  (ver Figura 63b).

## 4.8 Pruebas experimentales sobre superficies inclinadas

Posteriormente a las pruebas realizadas a través de las simulaciones, se efectuaron pruebas experimentales donde Lázaro se desplazó en línea recta sobre una superficie de inclinación variable mientras ejecutaba la estrategia No. 5. La superficie que se utilizó consistió en una pista de hormigón con una longitud horizontal de 20.8 m fabricada para tal fin en Venezuela (ver Figura 65). Dicha pista posee 7 tramos donde se producen variaciones en las dos direcciones posibles (*roll* y *pitch*) para probar el funcionamiento del robot sobre distintas pendientes.



a)

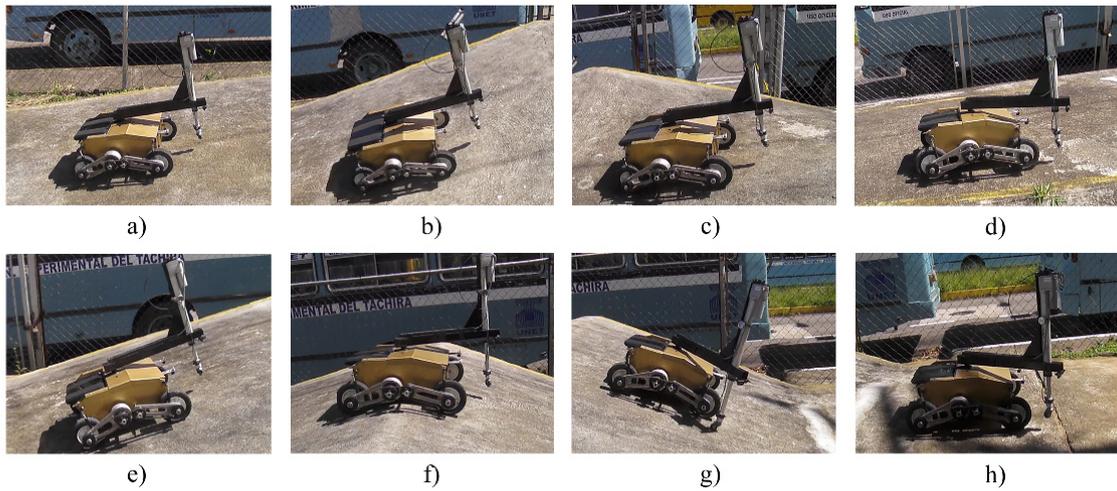


b)

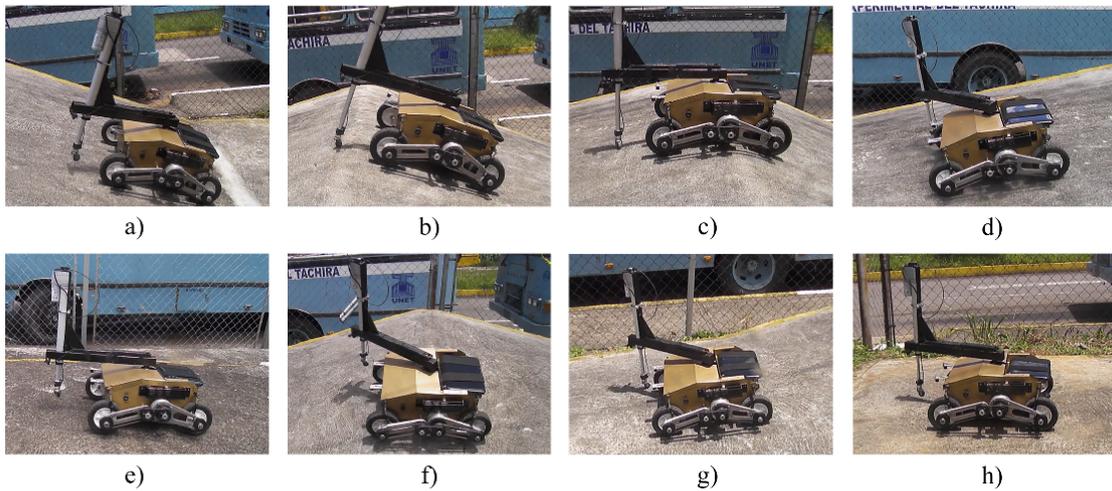
**Figura 65. Pista de hormigón con inclinación variable. a) Vista frontal y planta topográfica. b) Vistas panorámicas de la pista.**

La Figura 66 muestra la secuencia seguida por Lázaro cuando asciende sobre la pista de hormigón (recorrido de izquierda a derecha de acuerdo con la Figura 65a); se observan los distintos cambios de pendiente ocurridos durante el proceso de ascenso

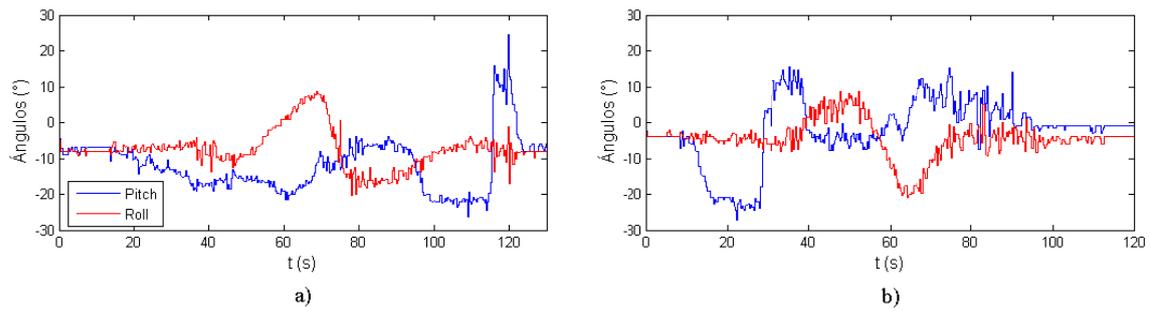
mayoritario (a excepción del tramo 6 donde se presenta un descenso). De manera análoga, la Figura 67 exhibe a Lázaro realizando el recorrido inverso (recorrido de derecha a izquierda). En este caso predomina el descenso con diferentes cambios de pendiente. La Figura 68 muestra los ángulos *roll* y *pitch* medidos por el robot durante su recorrido en el ascenso (ver Figura 68a) y descenso (ver Figura 68b).



**Figura 66.** Secuencia seguida por Lázaro al ascender sobre la pista de hormigón. a) y e) ascenso con *pitch* variable. b) ascenso con *roll* y *pitch* variable. c) Cambio de pendiente (*roll* variable). d) avance con *roll* variable ( $\phi \approx 0$ ). f) cambio de pendiente (*pitch* variable). g) descenso con *pitch* variable. h) posición final.

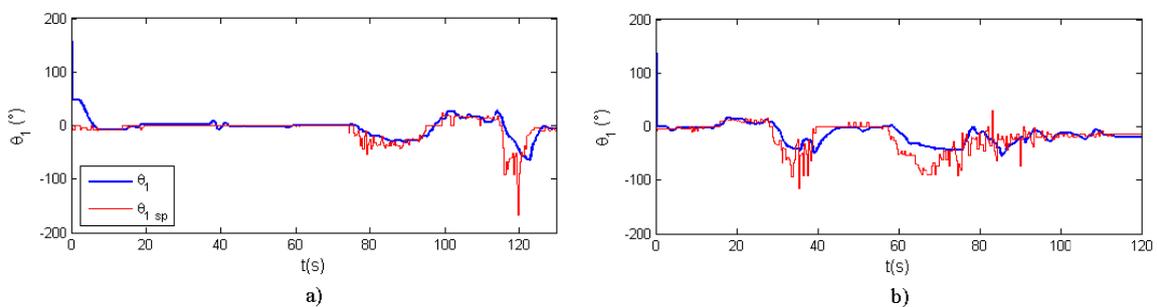


**Figura 67.** Secuencia seguida por Lázaro durante su descenso sobre la pista de hormigón. a) y b) ascenso con *pitch* variable. c) cambio de pendiente (*pitch* variable). d) y g) descenso con *pitch* variable. e) avance con *roll* variable ( $\phi \approx 0$ ). f) descenso con *roll* y *pitch* variable. h) Final.



**Figura 68. Ángulos roll y pitch adquiridos por la unidad de medición inercial durante el desplazamiento para a) subir y b) bajar la pista de hormigón.**

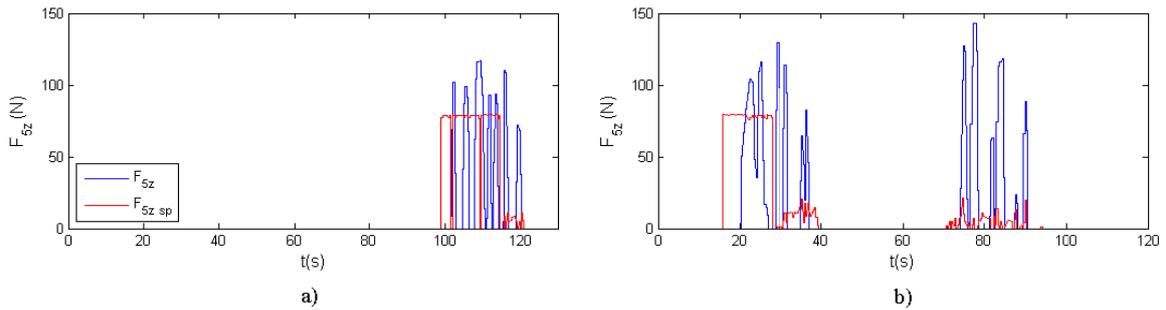
Durante los dos recorridos realizados se estableció una estrategia de control compartida, ya que el desplazamiento del robot fue teleoperado para garantizar que este pudiera realizar el recorrido manteniendo una trayectoria recta; mientras tanto, las dos articulaciones del brazo funcionaron de manera autónoma para ejecutar la estrategia No. 5. La Figura 69 muestra el comportamiento de la primera variable articular del brazo ( $\theta_1$ ) durante las dos pruebas, mientras que la Figura 70 exhibe la segunda variable a controlar para la ejecución óptima de la estrategia seleccionada: la fuerza de contacto del efector final del brazo con el suelo ( $F_{5z}$ ).



**Figura 69. Ángulo de rotación de la primera articulación del brazo ( $\theta_1$ ) durante el desplazamiento del robot para a) subir y b) bajar la pista de hormigón.**

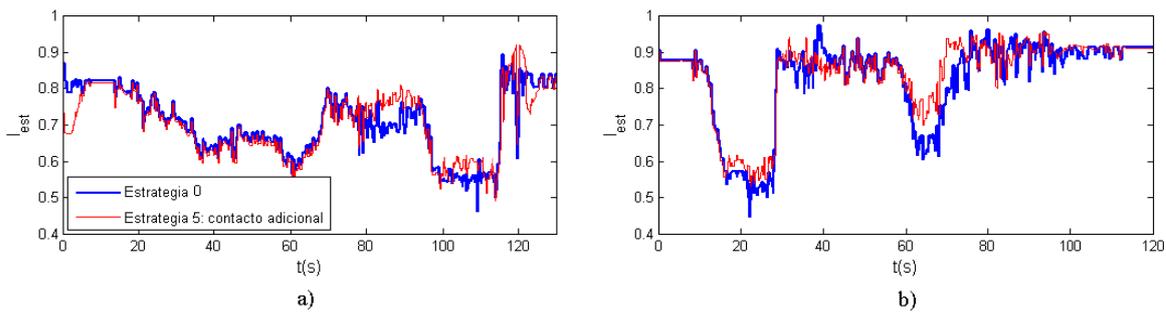
Respecto a la exactitud de los sistemas que controlan las articulaciones del brazo se puede observar que el algoritmo que controla la variable  $\theta_1$  posee un desempeño eficiente (ver Figura 69); pero no sucede de igual manera respecto al sistema que controla la variable  $F_{5z}$  (ver Figura 70), ya que no se logró estabilizar la magnitud de la fuerza de contacto respecto al valor deseado ( $F_{5z\ sp}$ ). Al respecto, se encontró que la textura rugosa del hormigón no permitió obtener un contacto constante lo cual facilitara al sistema de control estabilizar la magnitud de la fuerza  $F_{5z}$ . Por el contrario, los

sucesivos impactos existentes cuando el efector final del brazo tocaba el suelo rugoso mientras el robot se desplazaba, produjeron picos de fuerza instantáneos y desproporcionados que afectaron la efectividad de este sistema de control. No obstante, se logró mantener un contacto (aunque interrumpido) en los instantes donde éste se requería garantizando que se produjera el punto de apoyo adicional necesario para disminuir el riesgo de vuelco.



**Figura 70. Fuerza de reacción  $F_{5z}$  con el cual el efector final del brazo toca el suelo durante desplazamiento para a) subir y b) bajar la pista de hormigón.**

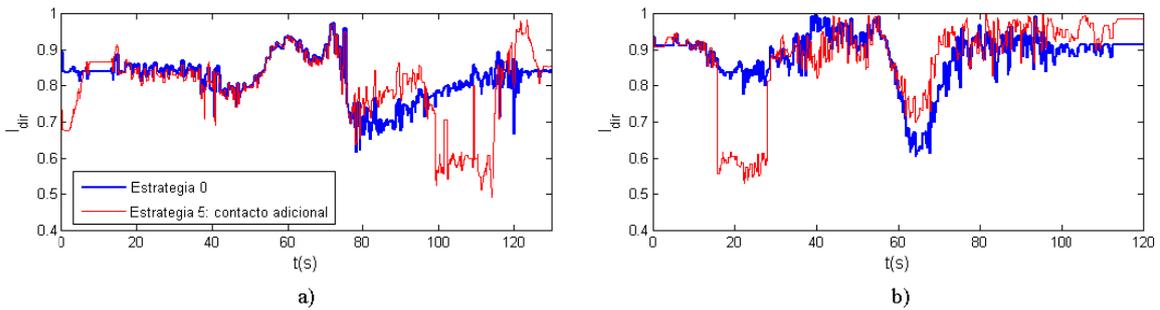
Finalmente, se presentan los índices de estabilidad (ver Figura 71), direccionamiento (ver Figura 72) y deslizamiento (ver Figura 73) evaluados para las dos pruebas realizadas (ascenso y descenso), los cuales se comparan con los índices análogos que se obtendrían si el robot realizara el mismo recorrido con la estrategia No. 0.



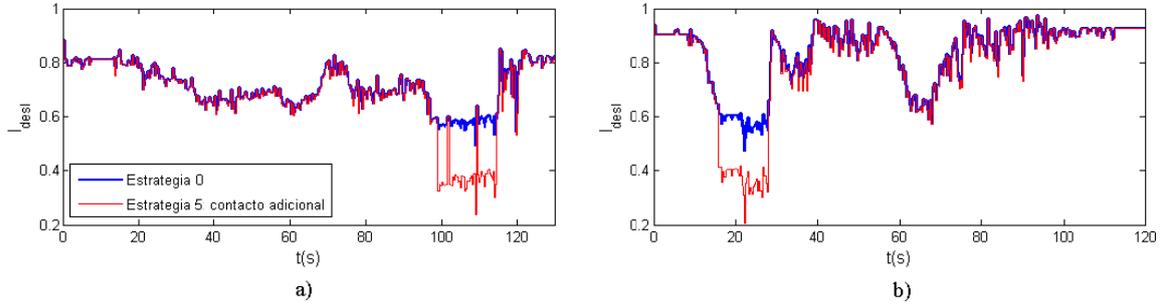
**Figura 71. Índice de estabilidad durante desplazamiento para a) subir y b) bajar la pista de hormigón.**

Al analizar los resultados obtenidos durante la prueba de ascenso, se obtiene para la estrategia seleccionada, una mejora en el índice de estabilidad entre los 85 y 90 s (ver Figura 71a) producto de la posición de la primera articulación del brazo que

efectúa un movimiento compensatorio en este período (ver Figura 69a). Posteriormente existe una segunda mejora visible en este índice entre los 100 y 115 s (ver Figura 71a). En este caso, producto del contacto adicional del efector final con el suelo (ver Figura 70a), pero a expensas de los índices de direccionamiento (ver Figura 72a) y deslizamiento (ver Figura 73a), los cuales descienden drásticamente en este período. En el resto de la prueba no existen otras mejoras evidentes ya que durante este tiempo  $F_{5z} = 0 \text{ N}$  y  $\theta_1$  tiende a estabilizarse en valores cercanos a  $0^\circ$ .



**Figura 72. Índice de direccionamiento durante desplazamiento para a) subir y b) bajar la pista de hormigón.**



**Figura 73. Índice de deslizamiento durante desplazamiento para a) subir y b) bajar la pista de hormigón.**

Durante la prueba de descenso también se evidencian mejoras en el índice de estabilidad cuando se utiliza la estrategia seleccionada. Entre los 18 y 28 s existe un incremento de este índice (ver Figura 71b) producto del contacto adicional del efector final con el suelo (ver Figura 70b), aunque esta mejora en la estabilidad coincide con una desmejora en los índices de direccionamiento (ver Figura 72b) y deslizamiento (ver Figura 73b) por la acción de la fuerza  $F_{5z}$ . Posteriormente entre los 62 y 75 s ocurre otro incremento en los índices de estabilidad (ver Figura 71b) y direccionamiento (ver Figura 72b) coadyuvado principalmente por la acción de la primera articulación del

brazo (ver Figura 69b) que actúa realizando movimientos compensatorios. Se debe resaltar que, en este caso, no hay una disminución notable del índice de deslizamiento (ver Figura 73) ya que la fuerza de contacto  $F_{5z}$  es nula.

## 4.9 Conclusiones

Se definieron tres índices para evaluar la navegabilidad de un robot móvil cuando se desplaza sobre terreno inclinado. Éstos son: el índice de estabilidad al vuelco basado en el criterio  $ZETUF_{comp}$ , el índice de direccionamiento y de deslizamiento, los cuales fueron validados mediante simulación computacional encontrando para ellos una confiabilidad del 90%.

En función de estos tres índices se definió una estrategia que fue implementada en el robot Lázaro para mejorar su navegabilidad haciendo énfasis en la mejora de su estabilidad al vuelco. Dicha estrategia se fundamenta en el uso del brazo que posee este robot, el cual realiza movimientos para reposicionar el COG combinados con operaciones que permiten el contacto del brazo con el suelo. Esta estrategia fue evaluada a través de simulación computacional utilizando software *ADAMS* y por medio de pruebas experimentales, demostrándose su eficacia respecto a otras posibles estrategias diseñadas para disminuir el riesgo de vuelco.

Adicionalmente, se demostró durante el estudio de esta estrategia que, aunque el punto de contacto adicional del brazo con el suelo mejora la estabilidad del robot ante el vuelco, también ocasiona una pérdida de direccionamiento y estimula el deslizamiento en el robot, por lo que su uso está limitado y dirigido a situaciones críticas donde se requiera mejorar la estabilidad del robot. Además, se presenta el reposicionamiento del COG como una estrategia complementaria que no requiere el uso del efector final en contacto con el suelo y provee una mejora apreciable en los índices de navegabilidad del robot.

## Capítulo 5

# MANIOBRAS PARA LA SUPERACIÓN DE OBSTÁCULOS

---

### 5.1 Introducción

Cuando un robot móvil se desplaza sobre terreno irregular, no solo atraviesa pendientes variadas, también encontrará obstáculos tales como: escombros, rampas, zanjas, huecos, depresiones y escalones (entre otros). Por tanto, un robot móvil debe disponer de herramientas y estrategias adecuadas no solo para desplazarse sobre superficies inclinadas sino también para superar estos obstáculos. En este capítulo se describirán un conjunto de estrategias que utiliza el robot Lázaro para superar algunos tipos de obstáculos comunes.

Es de resaltar que, cada estrategia utilizada para superar un obstáculo, se puede subdividir en aquellas etapas o movimientos sucesivos que el robot deberá efectuar, lo cual permite realizar un análisis específico de la navegabilidad del robot mientras ejecuta cada etapa de la estrategia [116]. En este capítulo se seguirá esta metodología para la descripción de las estrategias desarrolladas para Lázaro.

Adicionalmente, el estudio de la navegabilidad de un robot mientras sobrepasa un obstáculo se ha fundamentado comúnmente en la evaluación de dos parámetros: propensión al deslizamiento mientras se sobrepasa el obstáculo y estabilidad al vuelco [117]. La estabilidad se predice en la mayoría de los casos utilizando un análisis de las fuerzas de reacción del robot con el suelo (*ZETUF*) [118], aunque también se han utilizado otros criterios tales como: *Medida de estabilidad fuerza-ángulo (FASM)* [119] y *Margen de estabilidad energética (ESM)* [120].

En este capítulo se desarrollará el análisis de navegabilidad de las estrategias diseñadas para que Lázaro pueda sobrepasar obstáculos utilizando los índices de estabilidad y direccionamiento propuestos en el Capítulo 4. No se utilizará el índice de deslizamiento, ya que las estrategias desarrolladas fueron diseñadas de tal manera que se garantiza en todo momento una posibilidad de deslizamiento casi nula. Se podrá considerar que  $I_{desl} \approx 1$  en todas las estrategias descritas a continuación, puesto que todas las ruedas siempre tendrán contacto con una superficie horizontal.

## 5.2 Ascenso sobre escalones y rampas de gran inclinación

Para comenzar el análisis de esta estrategia es importante delimitar, en primer lugar, el tamaño de los obstáculos que el robot Lázaro está en capacidad de superar. El ascenso sobre escalones y rampas de pendiente elevada utilizando la estrategia diseñada, está confinado a una altura del obstáculo  $h = 140 \text{ mm}$ . Esta limitante depende de la carrera que posee el efector final del brazo ( $300 \text{ mm}$ ) la cual está distribuida a partes iguales para ejecutar operaciones de ascenso y descenso sobre este tipo de obstáculos (ver Apartado 3.4.1).

Respecto a la inclinación de las rampas se encontró que, si su ángulo de inclinación respecto a la horizontal  $\beta \geq 43^\circ$ , se debe utilizar esta estrategia para superar la rampa (se considera rampa de gran inclinación). En caso contrario, podrá ser superada utilizando la estrategia diseñada para la navegación sobre superficies inclinadas descrita en el Capítulo 4, sin importar la altura de la rampa. La delimitación del ángulo  $\beta$  mínimo requerido para activar la estrategia de ascenso sobre escalones y rampas que se describirá posteriormente, se realizó analizando tres criterios:

- La propensión al deslizamiento cuando el robot asciende sobre superficies inclinadas: Lázaro comenzará a deslizarse cuando el ángulo de inclinación de la rampa sea  $\beta \geq 45^\circ$  (tomando un coeficiente de fricción entre el suelo de hormigón y la rueda de caucho  $\mu_s = 1.0$ ).
- La posibilidad de choque entre la estructura del robot y la superficie de la rampa, especialmente en el vértice superior de la rampa (suponiendo que la rampa posea vértices no amolados). En este caso se encontró a través de un análisis geométrico, que la interferencia ocurre cuando  $\beta \geq 56^\circ$ .
- Se garantiza que el alcance horizontal del brazo es suficiente para sobrepasar una rampa con la altura máxima permitida ( $h = 140 \text{ mm}$ ) utilizando la estrategia diseñada, si  $\beta \geq 43^\circ$ .

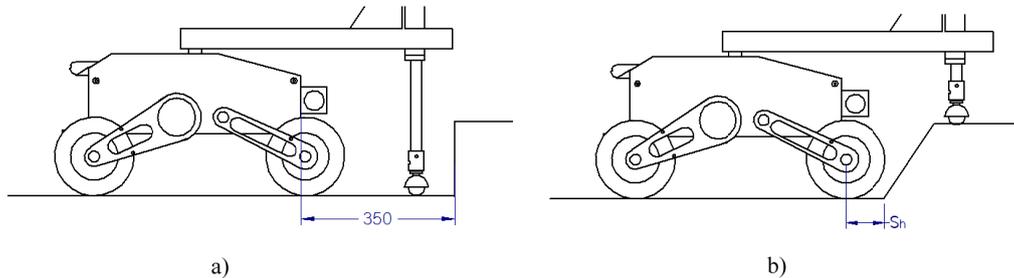
Una vez delimitadas las condiciones geométricas de los obstáculos que podrá superar Lázaro utilizando esta estrategia, se describe el conjunto de etapas o movimientos sucesivos que debe ejecutar el robot para superar el obstáculo:

- Posicionamiento frente al desnivel:* Dado que el robot Lázaro posee dos sónicas y un telémetro 2D apuntando hacia adelante, se podrá detectar el tipo de obstáculo, su altura y ángulo de inclinación (en el caso de las rampas), por lo que una vez detectado el obstáculo, el robot se posicionará a  $350 \text{ mm}$  del escalón, medidos desde el frente del chasis del robot hasta el vértice inferior del obstáculo (ver Figuras 74a y 75a).
- Despliegue del brazo sobre el desnivel:* Esta etapa incluye tres movimientos sucesivos del robot: 1) retracción del actuador lineal del brazo en toda su carrera. 2) Avance del robot hacia el frente, con un desplazamiento de  $200 \text{ mm}$  en el caso de escalones (ver Figura 75b). En el caso de las rampas, el desplazamiento debe ser suficiente para obtener finalmente una distancia de separación horizontal  $S_h$ :

$$R_r \tan\left(\frac{\beta}{2}\right) \leq S_h \leq 192 - \frac{h}{\tan\beta} \quad (49)$$

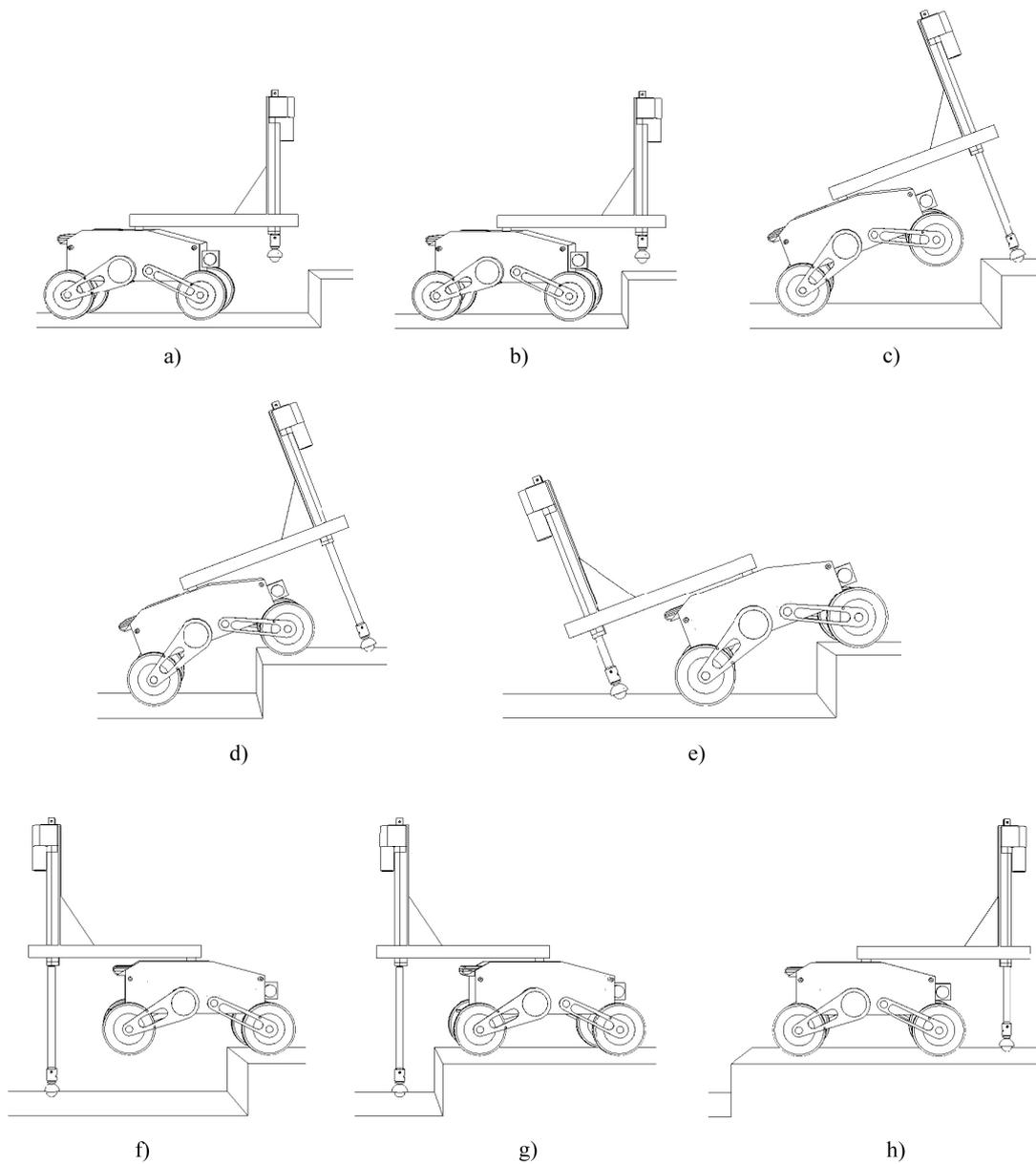
medida desde el centro de la rueda frontal del robot (con radio  $R_r$ ) hasta el vértice inferior de la rampa. Con ello se garantiza que el efector final del brazo quede

situado sobre la superficie superior del obstáculo (ver Figura 74b). 3) Despliegue del actuador lineal del brazo hasta que el efector final toque el suelo (detectado utilizando el sensor de presión situado en el efector final).



**Figura 74. Posicionamiento del robot frente al a) escalón y b) rampa de gran inclinación.**

- c. *Elevación del robot con apoyo del brazo:* En esta etapa el actuador lineal continúa desplegándose mientras mantiene el contacto con la superficie superior del obstáculo. Esta acción producirá el levantamiento de las ruedas frontales del robot, las cuales subirán hasta que su borde inferior esté posicionado por encima de la altura del obstáculo (ver Figura 75c).
- d. *Avance del robot para que su parte delantera se posicione sobre el desnivel:* A continuación el robot debe avanzar hacia adelante con un desplazamiento de 350 mm, los cuales son suficientes para garantizar que las ruedas delanteras queden posicionadas sobre la superficie superior del desnivel (ver Figura 75d).
- e. *Posicionamiento del brazo en la parte posterior del robot:* Esta etapa también incluye tres movimientos sucesivos del robot: 1) retracción del actuador lineal en toda su carrera. Una vez ejecutada esta acción, las ruedas delanteras del robot quedarán apoyadas sobre la superficie superior del escalón. 2) Girar la primera articulación del brazo 180° quedando éste posicionado en la parte posterior del robot. 3) Desplegar nuevamente el actuador lineal hasta que el sensor de presión detecte el contacto del efector final del brazo con el suelo (ver Figura 75e).



**Figura 75. Etapas seguidas por Lázaro para subir un escalón o rampa de gran inclinación.**

*f. Elevación de la parte posterior del robot con apoyo del brazo:* En esta etapa, el actuador lineal continúa desplegándose logrando separar las ruedas traseras del suelo. El despliegue continuará hasta que el robot quede en una posición horizontal apoyado solo con las ruedas delanteras y el efector final del brazo. En este instante, el ángulo  $pitch$  debiera ser  $\phi \geq 0$  (ver Figura 75f).

- g. *Avance del robot*: A continuación el robot comienza a moverse hacia delante con un desplazamiento horizontal de 300 mm logrando posicionar las ruedas traseras del robot sobre el escalón (ver Figura 75g).
- h. *Aterrizaje*: Finalmente, se ejecuta esta etapa con dos movimientos sucesivos: 1) retracción del actuador lineal en toda su carrera. En este instante las ruedas traseras entrarán en contacto con el suelo (si no había sucedido en el paso anterior). 2) Giro de la primera articulación del brazo 180° para posicionar el brazo nuevamente al frente del robot (ver Figura 75h).

### 5.2.1 Análisis de la estabilidad al vuelco y direccionamiento

Para el análisis de estabilidad y direccionamiento durante la ejecución de esta estrategia, se utilizaron los índices propuestos en el Capítulo 4 ( $I_{est}$  e  $I_{dir}$ ) fundamentados en las fuerzas de reacción. Estos índices deben ser evaluados específicamente en cada etapa. Para su obtención en las etapas: *a* (Posicionamiento frente al desnivel), *b* (Despliegue del brazo sobre el desnivel) y *h* (Aterrizaje), se puede utilizar la ecuación (19) para el cálculo de las fuerzas de reacción entre las ruedas y el suelo cuando existen cuatro o cinco puntos de contacto del robot con el suelo; o las ecuaciones (29) a la (32) cuando existen tres puntos de contacto. En el resto de las etapas (*c*, *d*, *e*, *f* y *g*), se deben calcular las fuerzas de reacción de manera específica, puesto que, en estos casos, el robot posee una inclinación respecto al suelo, por lo que las ecuaciones (19) y (29) a la (32), no son válidas. A continuación se presenta el análisis para el cálculo de reacciones en las etapas donde se requiere.

***Etapa c (Elevación del robot con apoyo del brazo)***. Esta etapa se inicia cuando el efector final del brazo toca la superficie superior del escalón y continúa hasta que las ruedas delanteras del robot se elevan por encima de la altura del escalón (ver Figura 75c). Durante esta etapa existen dos períodos bien diferenciados: durante el primero, el robot mantendrá cinco de puntos de contacto con el suelo, pero la fuerza de reacción del quinto punto de contacto irá incrementándose hasta:

$$F_{5z\ eq} = \frac{W(191 + x_{cog})}{191 + a_1} \quad (50)$$

instante en el cual las fuerzas de reacción de las ruedas delanteras del robot habrán decrecido hasta llegar a cero. La sumatoria de las fuerzas de reacción para los ejes de vuelco durante este primer período se calcula de acuerdo con (19).

En el segundo período, el robot se eleva mientras está apoyado sobre sus ruedas traseras y efector final del brazo hasta que las ruedas delanteras del robot se levantan, por lo menos, hasta la altura del escalón (ver Figura 76). En este instante, el ángulo de inclinación  $\Phi$  exhibido por el robot está determinado por:

$$\Phi = \sin^{-1} \left( \frac{h}{400} \right) \quad (51)$$

y la extensión del actuador lineal está determinada por:

$$|d_2| = \frac{282.5 \cos \Phi + (191 + a_1) \sin \Phi - h}{\cos \Phi} \quad (52)$$

Para el cálculo de las fuerzas de reacción durante este segundo período, se hizo necesario definir un nuevo sistema de referencia fijo llamado *Sistema de referencia mundo* ( $X_M Y_M Z_M$ ), cuyo plano  $X_M Y_M$ , es paralelo al plano horizontal (ver Figura 76). Utilizando este sistema de referencia y la formulación correspondiente a la segunda ley de Newton en estado cuasiestático, se determinaron las fuerzas de reacción ( $F_{3z}^M$ ,  $F_{4z}^M$  y  $F_{5z}^M$ ) durante todo el segundo período:

$$F_{3z}^M = F_{4z}^M = \frac{W/2 [(429 - x_{cog}) \cos \Phi + (|d_2| + z_{cog} - 282.5 - R_r) \sin \Phi]}{620 \cos \Phi + (|d_2| - 282.5) \sin \Phi} \quad (53)$$

$$F_{5z}^M = \frac{W [(191 + x_{cog}) \cos \Phi - (z_{cog} - R_r) \sin \Phi]}{620 \cos \Phi + (|d_2| - 282.5) \sin \Phi} \quad (54)$$

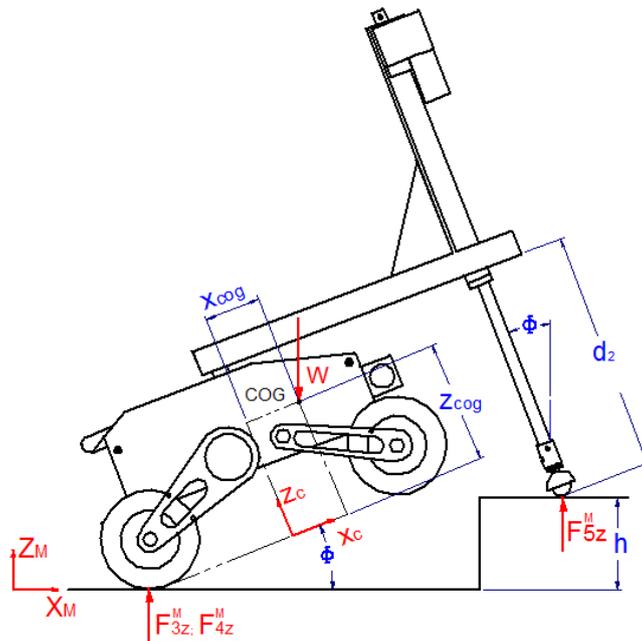


Figura 76. Lázarο apoyándose con su brazo para levantar sus ruedas delanteras.

**Etapa d (Avance del robot para que su parte delantera se posicione sobre el desnivel).** Durante esta etapa el robot avanza hacia delante sin cambiar su inclinación, manteniéndose apoyado en tres puntos de contacto con el suelo (ver Figura 75d), por lo que en esta etapa se generan las mismas tres fuerzas de reacción ( $F_{3z}^M$ ,  $F_{4z}^M$  y  $F_{5z}^M$ ) obtenidas en la etapa anterior, las cuales se calculan a partir de (53) y (54).

**Etapa e (Posicionamiento del brazo en la parte posterior del robot).** Durante esta etapa existen también dos períodos bien definidos. El primero ocurre momentáneamente al inicio de la etapa cuando aún existe contacto del efector final del brazo con el suelo. En este momento el robot se mantiene apoyado sobre tres puntos de contacto con el suelo ( $F_{3z}^M$ ,  $F_{4z}^M$  y  $F_{5z}^M$ ), por lo que las fuerzas de reacción en este caso se calculan también a partir de (53) y (54).

Posteriormente, se produce el segundo período cuando el robot queda apoyado sobre sus cuatro ruedas y se produce el movimiento del brazo en tres pasos: retracción del actuador lineal, giro de la primera articulación del brazo hasta que  $\theta_1 = 180^\circ$  y, por último, despliegue del actuador lineal hasta que el efector final toque el suelo. Como existen cuatro puntos de contacto, existen también cuatro fuerzas de reacción (ver Figura 77), las cuales no se pueden calcular individualmente, por lo tanto, se calcula la suma de reacciones en los cuatro ejes de vuelco ( $F_{12}^M$ ,  $F_{23}^M$ ,  $F_{34}^M$  y  $F_{14}^M$ ):

$$F_{12}^M = \frac{W[(191 + x_{cog}) \cos \Phi - (z_{cog} - R_r) \sin \Phi]}{400 \cos \Phi} \quad (55)$$

$$F_{34}^M = \frac{W[(209 - x_{cog}) \cos \Phi + (z_{cog} - R_r) \sin \Phi]}{400 \cos \Phi} \quad (56)$$

$$F_{14}^M = \frac{W(199 + y_{cog})}{398} \quad (57)$$

$$F_{23}^M = \frac{W(199 - y_{cog})}{398} \quad (58)$$

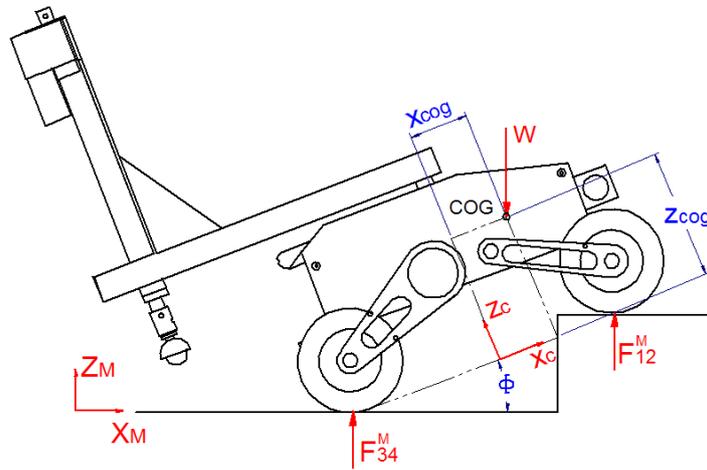


Figura 77. LázarO girando su brazo para posicionarlo en su parte posterior.

*Etapa f (Elevación de la parte posterior del robot con apoyo del brazo).* En esta etapa también existen dos períodos bien definidos. El primero (bastante breve) ocurre cuando el efector final del brazo comienza a ejercer una fuerza de contacto con el suelo ( $F_{5z}^M$ ), por lo que existirán cinco puntos de contacto correspondientes a las cuatro ruedas más el efector final (ver Figura 78). Las sumas de reacciones en los cuatro ejes de vuelco en este período se calculan como:

$$F_{14}^M = \frac{W(199 + y_{cog}) - 199F_{5z}^M}{398} \quad (59)$$

$$F_{23}^M = \frac{W(199 - y_{cog}) - 199F_{5z}^M}{398} \quad (60)$$

$$F_{12}^M = \{W[(191 + x_{cog}) \cos \Phi - (z_{cog} - R_r) \sin \Phi] + F_{5z}^M[220 \cos \Phi + (282.5 - |d_2|) \sin \Phi]\} / (400 \cos \Phi) \quad (61)$$

$$F_{34}^M = \{W[(209 - x_{cog}) \cos \Phi + (z_{cog} - R_r) \sin \Phi] - F_{5z}^M[620 \cos \Phi + (282.5 - |d_2|) \sin \Phi]\} / (400 \cos \Phi) \quad (62)$$

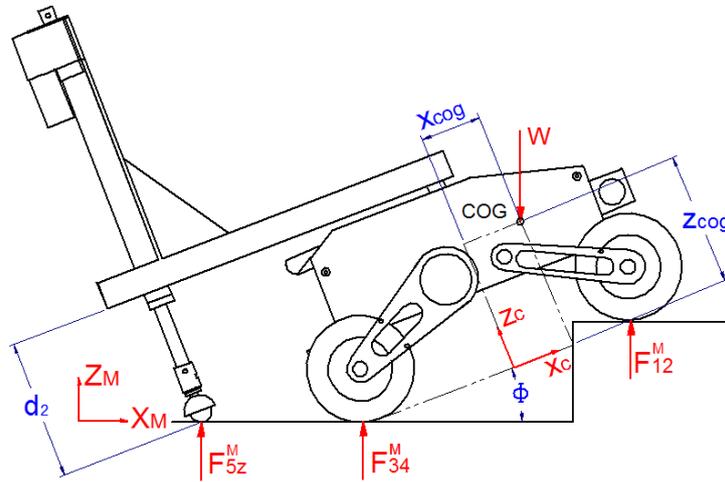
donde:

$$|d_2| = \frac{282.5 \cos \Phi - 220 \sin \Phi}{\cos \Phi} \quad (63)$$

Este primer lapso culmina cuando la fuerza de contacto del efector final alcanza el valor de  $F_{5z}^M$ :

$$F_{5z}^M = \frac{W[(209 + x_{cog}) \cos \Phi + (z_{cog} - R_r) \sin \Phi]}{620 \cos \Phi + (282.5 - |d_2|) \sin \Phi} \quad (64)$$

En este momento las dos ruedas traseras del robot se habrán separado del suelo.



**Figura 78. Robot apoyándose con su brazo para comenzar la elevación de sus ruedas traseras.**

En el segundo período de esta etapa, el robot se levanta apoyado solo con las ruedas delanteras y el efector final del brazo (ver Figura 79) hasta que  $\Phi = 0^\circ$ , por lo que existirán tres fuerzas de reacción las cuales se obtienen a través de:

$$F_{1z}^M = F_{2z}^M = \frac{W/2 [(420 + x_{cog}) \cos \Phi + (282.5 - |d_2| - z_{cog} + R_r) \sin \Phi]}{620 \cos \Phi + (282.5 - |d_2|) \sin \Phi} \quad (65)$$

$$F_{5z}^M = \frac{W[(209 - x_{cog}) \cos \Phi + (z_{cog} - R_r) \sin \Phi]}{620 \cos \Phi + (282.5 - |d_2|) \sin \Phi} \quad (66)$$

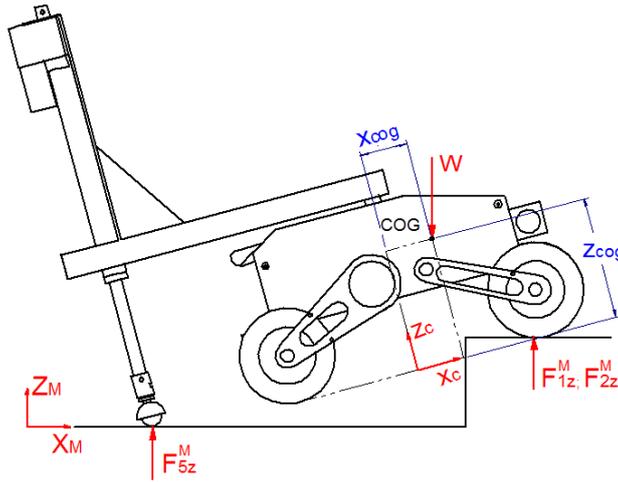


Figura 79. LázarO elevándose apoyado en sus ruedas delanteras y brazo.

**Etapa g (Avance del robot).** En esta penúltima etapa, el robot avanza hacia adelante mientras está apoyado con las ruedas delanteras y el efector final del brazo, mientras que  $\Phi = 0^\circ$ . Por lo tanto, existen solo tres fuerzas de contacto cuya magnitud también se puede obtener a través de (65) y (66).

Una vez obtenidas las fuerzas de reacción en cada etapa de la estrategia diseñada, se pueden calcular los índices de estabilidad y direccionamiento utilizando (20) y (34) cuando el robot está apoyado con cuatro o cinco puntos, o a través de (33), (35) y (36) cuando el robot esté apoyado sobre tres puntos.

### 5.2.2 Pruebas simuladas

Para verificar la validez de las ecuaciones obtenidas en el cálculo de las fuerzas de reacción e índices de estabilidad y direccionamiento, se simuló el robot mientras subía un escalón y una rampa de gran inclinación utilizando el software *ADAMS*. La Figura 80 muestra el ascenso de un escalón durante la simulación y la Figura 81 muestra un conjunto de variables tomadas de la simulación, las cuales pueden ser medidas en el robot real utilizando los sensores instalados ( $\theta_1$ ,  $|d_2|$ ,  $\Phi$  y  $F_{5z}^M$ ). Es importante, en este

punto, diferenciar entre  $F_{5z}^M$  y  $F_{5z}$ , ya que esta última es la fuerza que puede ser percibida por el sensor de presión ubicado en el efector final del robot real, mientras que en la simulación, se obtiene el valor de  $F_{5z}^M$ . Para obtener  $F_{5z}$  a partir de  $F_{5z}^M$ , se puede utilizar:

$$F_{5z} = F_{5z}^M \cos \Phi \quad (67)$$

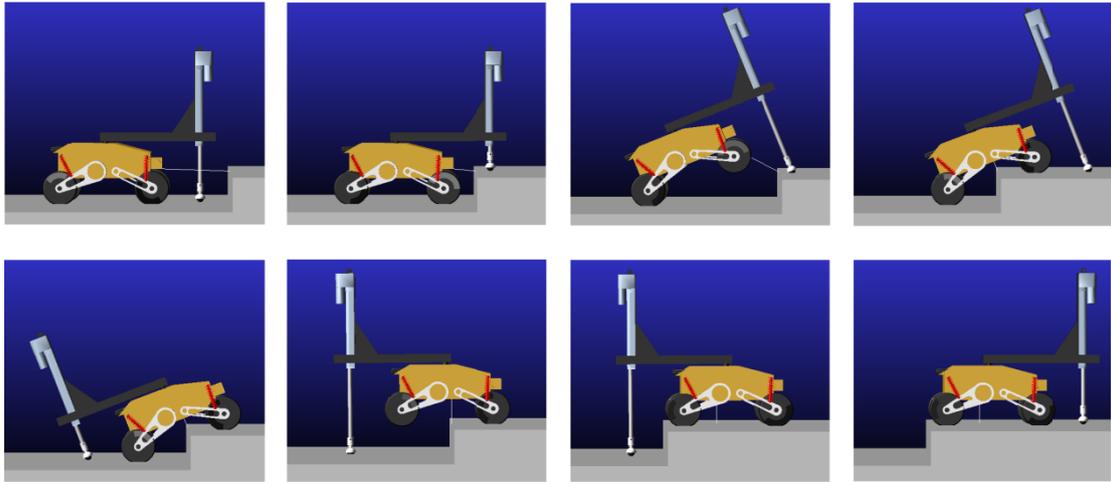


Figura 80. Secuencia para el ascenso de un escalón. Simulación con *ADAMS*.

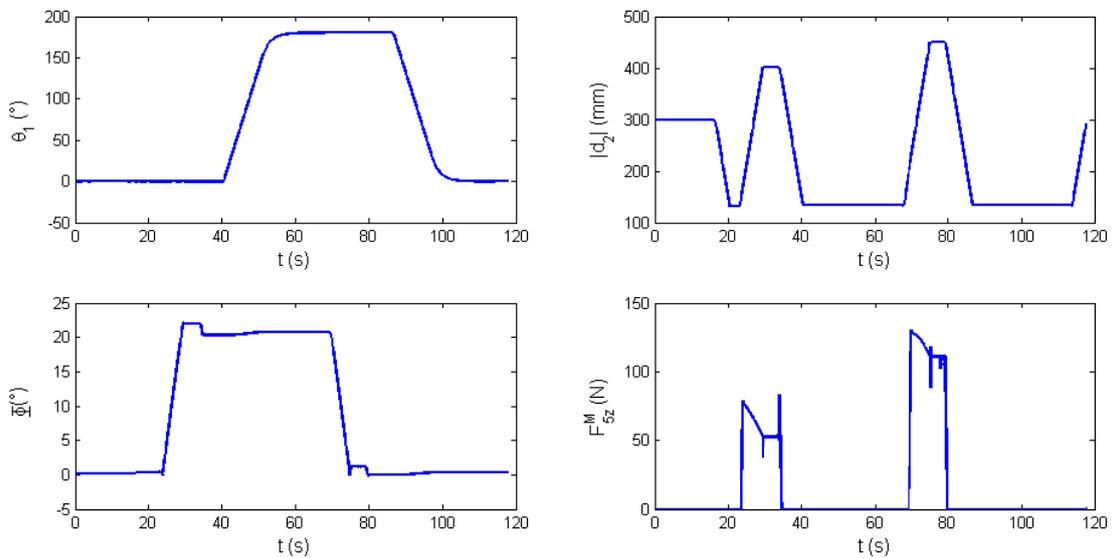
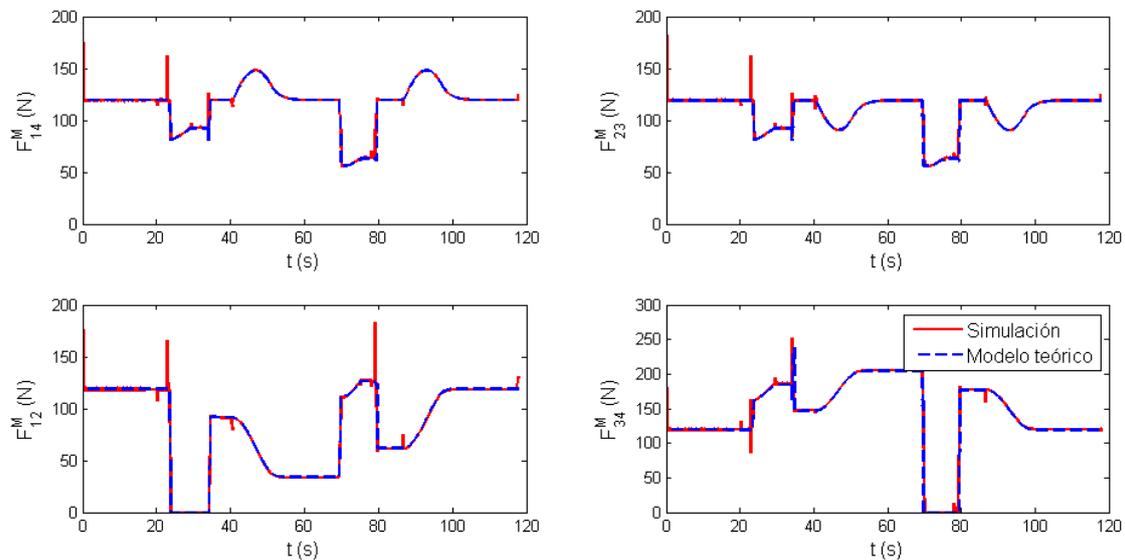


Figura 81. Variables obtenidas de la simulación, equivalentes a las obtenidas por los sensores de Lázaro ( $\theta_1$ ,  $|d_2|$ ,  $\Phi$  y  $F_{5z}^M$ ).

Así mismo, la Figura 82 muestra las sumas de fuerzas de reacción para los cuatro ejes de vuelco del robot, obtenidas como datos de la simulación y comparadas con los valores obtenidos utilizando el modelo teórico provisto por las ecuaciones descritas en el Apartado 5.2.1. Para ello, se utilizaron las variables registradas en la Figura 81 en el cálculo de las fuerzas de reacción teóricas (las cuales están también disponibles en el robot real).

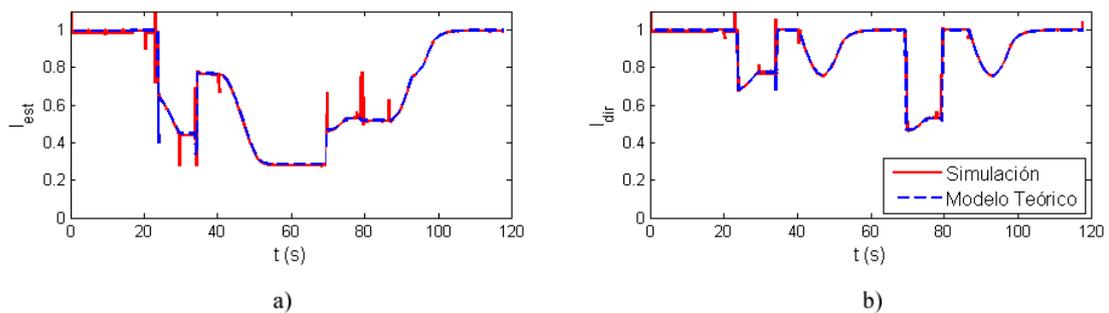
Posteriormente, se presentan los índices de estabilidad (ver Figura 83a) y direccionamiento (ver Figura 83b) obtenidos durante la ejecución de la simulación. A continuación, se comparan los valores obtenidos con las ecuaciones teóricas respecto a los valores obtenidos a través de la simulación. Es importante destacar el error existente entre los índices teóricos y de simulación: en el caso del índice de estabilidad, el error medio fue 0.66% y el error cuadrático medio fue 2.18%. Por otro lado, en el índice de direccionamiento, el error medio correspondió a 0.34% y el error cuadrático medio fue 2.17%. Estos valores bajos constatan la fiabilidad de los modelos teóricos para predecir el comportamiento de la navegabilidad del robot cuando supera este tipo de obstáculos.



**Figura 82. Reacciones en los ejes de vuelco obtenidos durante una simulación donde Lázaro asciende sobre un escalón.**

Finalmente, hay que resaltar cuáles son los momentos donde el robot presenta mayor posibilidad a volcarse o a perder su capacidad de direccionarse cuando supera este tipo de obstáculos. Respecto a la estabilidad al vuelco, se encontró durante la simulación que el momento con menor índice de estabilidad ( $I_{est} = 0.28$ ) corresponde

al período comprendido entre los 56 y 69 s (ver Figura 83a). Al detallar las variables medibles del robot durante ese período (ver Figura 81) se obtiene que:  $\theta_1 = 180^\circ$ ,  $\Phi = 20.3^\circ$  y  $F_{5z}^M = 0 N$ . Este estado coincide con la etapa *e* (*Posicionamiento del brazo en la parte posterior del robot*), específicamente en el instante donde el robot está inclinado, con las ruedas delanteras sobre el escalón y el brazo posicionado en la parte posterior del robot sin que su efector final toque el suelo. En este punto la propensión del robot sería volcar hacia atrás (aunque no se llega a esta situación crítica). Pero esta posibilidad se elimina a los 69 s cuando el brazo toca el suelo obteniéndose una  $F_{5z}^M > 0$ , lo cual incrementa el índice de estabilidad.



**Figura 83. Índices de estabilidad (a) y direccionamiento (b) durante el ascenso de un escalón.**

Respecto del direccionamiento, el momento crítico se presenta alrededor de los 70 s, donde el  $I_{dir} = 0.46$  (valor mínimo). En este instante el robot todavía está ejecutando la etapa *e* de la estrategia (*Posicionamiento del brazo en la parte posterior del robot*) por lo que  $\theta_1 = 180^\circ$  pero  $F_{5z}^M$  se eleva a su valor máximo (ver Figura 81). Ésto ocurre cuando las ruedas traseras del robot se despegan del suelo producto del contacto del efector final del brazo con el suelo.

En ese instante, la mayor fuerza de reacción es ejercida sobre el efector final, mientras que en las ruedas delanteras (las únicas que están en contacto con el suelo), la fuerza es menor (ambas con un valor de 55 N cada una), lo cual incide en un índice de direccionamiento bajo, pero lejos de llegar a un estado crítico. Con este análisis, se comprueba que Lázaros es capaz de superar obstáculos como escalones y rampas de gran inclinación con altura de hasta 140 mm sin riesgo de vuelco o pérdida de direccionamiento.

### 5.2.3 Pruebas experimentales

Posterior al análisis realizado a través de la simulación, se ejecutó la estrategia desarrollada en Lázaró. Para ello, se utilizaron dos tipos de obstáculos: un escalón con altura  $h = 140 \text{ mm}$  y una rampa de gran inclinación con  $h = 140 \text{ mm}$  y  $\beta = 45^\circ$ . La secuencia de fotografías para el escalón se muestra en la Figura 84, mientras que para la rampa, se exhibe en la Figura 85. En ambos casos, el robot ejecutó la estrategia de manera exitosa en aproximadamente 80 s, comprobándose la efectividad en el diseño de la estrategia y la capacidad del robot para llevarla a cabo.



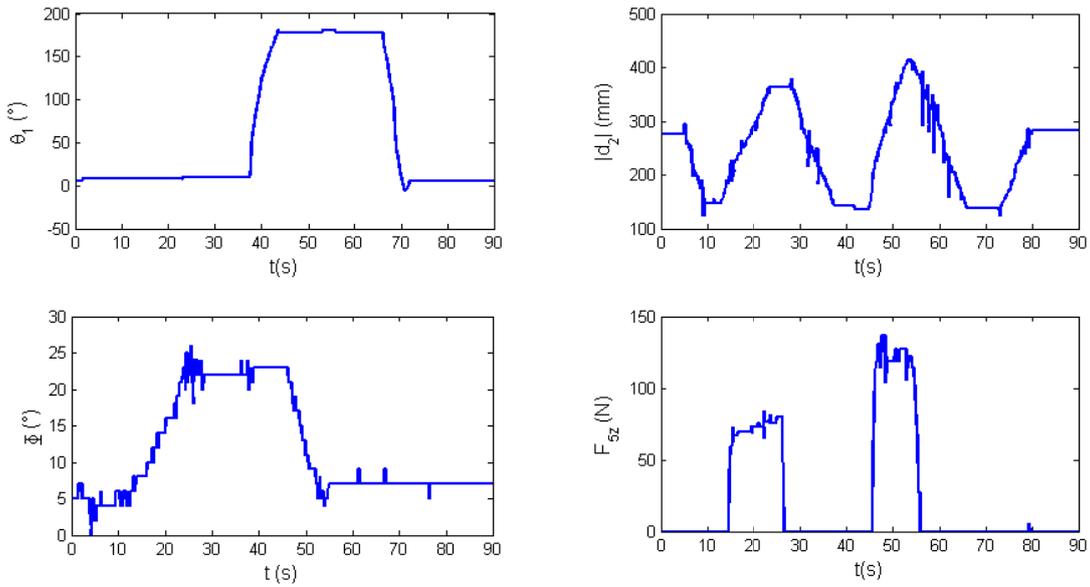
Figura 84. Secuencia seguida por Lázaró para el ascenso sobre un escalón.



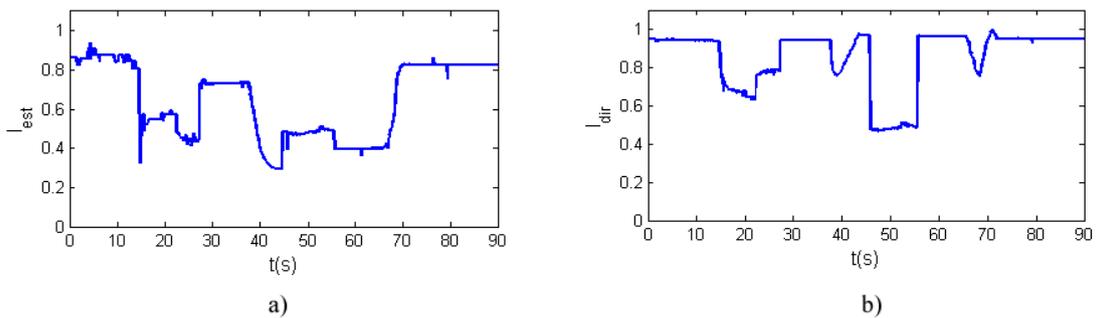
Figura 85. Secuencia seguida por Lázaró para el ascenso sobre una rampa.

Adicionalmente, se muestra en la Figura 86 un conjunto de variables que fueron adquiridas utilizando los sensores instalados en Lázaró ( $\theta_1$ ,  $|d_2|$ ,  $\Phi$  y  $F_{5z}$ ) cuando éste ascendió sobre el escalón de prueba. A partir de estas medidas y utilizando las

ecuaciones teóricas descritas en el Apartado 5.2.1, se calcularon las fuerzas de reacción y, posteriormente, los índices de estabilidad y direccionamiento, los cuales se muestran en la Figura 87. Cabe resaltar que solo se exhiben los resultados del ascenso sobre el escalón, ya que son similares respecto a los obtenidos cuando Lázaro sube sobre una rampa de gran inclinación utilizando esta estrategia.



**Figura 86. Variables obtenidas por los sensores del robot ( $\theta_1$ ,  $|d_2|$ ,  $\Phi$  y  $F_{5z}$ ) cuando éste sube un escalón.**



**Figura 87. Índices de estabilidad (a) y direccionamiento (b) obtenidos durante el ascenso a un escalón.**

Una vez obtenidos estos resultados, se procedió a comparar los índices de estabilidad y direccionamiento derivados de las pruebas experimentales respecto a aquellos obtenidos en la simulación. Respecto al índice de estabilidad, se encontró que el menor valor obtenido en las pruebas fue  $I_{est} = 0.29$ , el cual se registró a los 44 s de

la prueba (ver Figura 87a). En ese instante:  $\theta_1 = 178^\circ$ ,  $\Phi = 23^\circ$  y  $F_{5z} = 0 \text{ N}$ , los cuales corresponden exactamente a la misma fase (Etapa *e*) donde se registró el mínimo índice de estabilidad durante la simulación ( $I_{est} = 0.28$ ). Una diferencia de solo 0.01 entre el valor real y el valor de simulación permite corroborar los resultados obtenidos en la simulación y, adicionalmente, garantizar que el robot podrá ejecutar esta estrategia sin correr riesgo de vuelco.

De igual manera se analizó el índice de direccionamiento. En este caso, el valor mínimo se obtuvo a los 47 s de la prueba (ver Figura 87b) cuando se registró un  $I_{dir} = 0.47$  mientras que  $\theta_1 = 178^\circ$  y  $F_{5z} = 130 \text{ N}$  (valor máximo). Este instante también corresponde a la misma fase (Etapa *e*) donde se registra el mínimo índice de direccionamiento durante la simulación ( $I_{dir} = 0.46$ ), obteniéndose nuevamente una diferencia de 0.01 entre el valor real y el valor de simulación, con lo cual se pueden validar los resultados obtenidos en la simulación.

### 5.3 Descenso de escalones y rampas de gran inclinación

Antes del desarrollo de esta estrategia es necesario delimitar los requerimientos que deben existir para que Lázaro pueda sobrepasar este tipo de obstáculos. En primer lugar, se requiere que la altura del escalón o rampa sea menor a  $h = 140 \text{ mm}$  debido a las limitaciones físicas del actuador lineal. Adicionalmente se espera que, en el caso de las rampas, su inclinación con respecto a la horizontal sea  $\beta \geq 43^\circ$  como requisito para utilizar esta estrategia. Este ángulo mínimo se obtuvo a partir de las tres premisas expuestas en el Apartado 5.2.

Para ángulos menores el robot puede descender sobre la rampa sin utilizar esta estrategia o podría utilizarla siempre que la altura de la rampa sea menor. En todo caso, para utilizar esta estrategia en el descenso sobre rampas es necesario que el ángulo de inclinación de la rampa supere al ángulo mínimo ( $\beta_{min}$ ) el cual, está definido por:

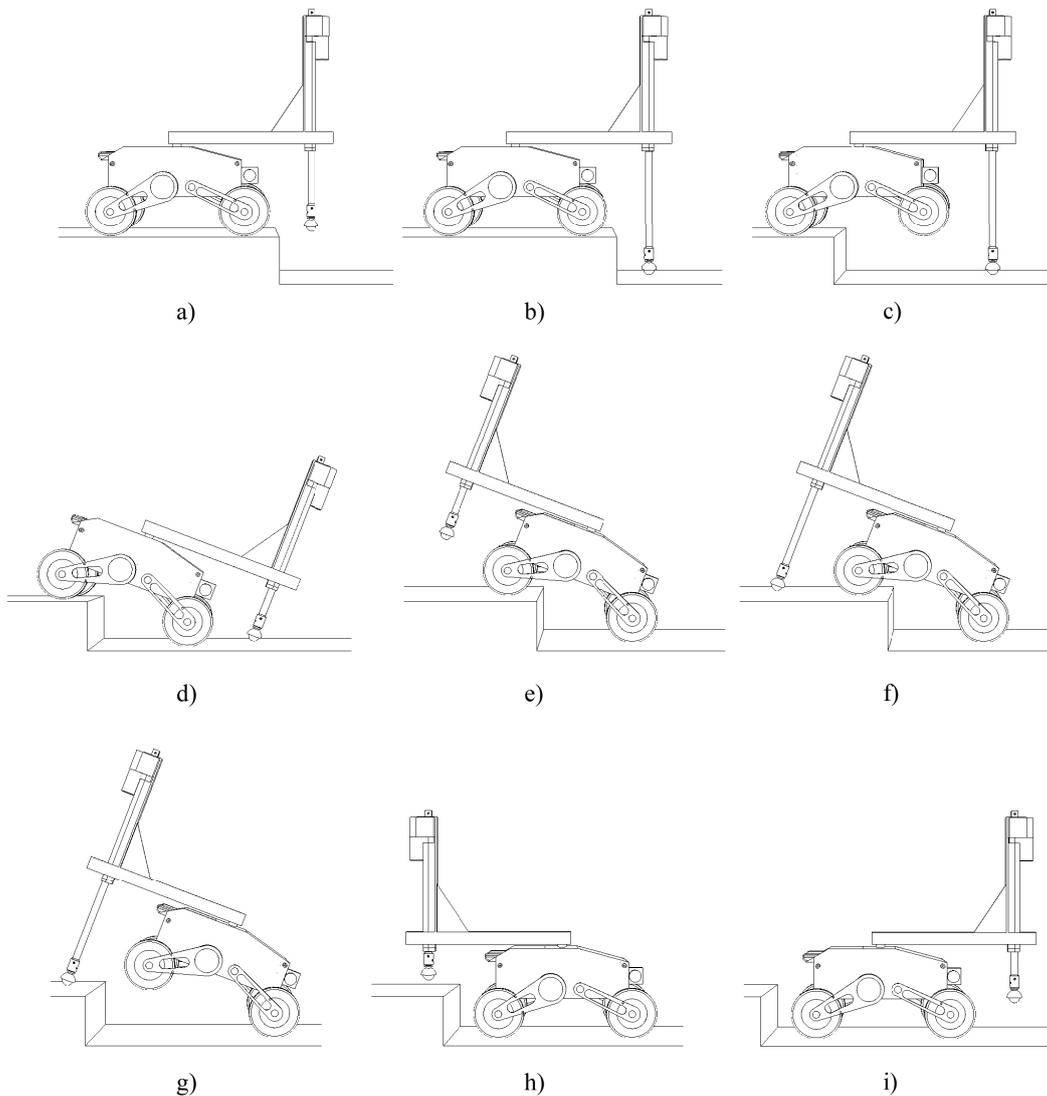
$$\beta_{min} = \tan^{-1}\left(\frac{h}{147}\right) \quad (68)$$

con ello se garantiza que el alcance horizontal del brazo es suficiente para ejecutar exitosamente la estrategia.

Una vez delimitadas las variables geométricas que deben poseer tanto los escalones como las rampas que podrán ser superadas por el robot utilizando esta estrategia, se describe, a continuación, el conjunto de etapas o movimientos sucesivos que debe efectuar el robot durante la ejecución de esta maniobra:

- a. *Posicionamiento frente al desnivel:* Como se mencionó, Lázaro posee dos sónares y un telémetro 2D apuntando hacia adelante. Con estos sensores se podrá determinar el tipo de obstáculo, su altura y ángulo de inclinación (en el caso de las rampas). Una vez detectado el obstáculo, el robot se posicionará a 45 mm del vértice superior del escalón, medidos desde este vértice hasta el frente del chasis del robot. Con ello se garantiza que el efector final del brazo quede posicionado de tal manera que cuando se despliegue, toque la superficie inferior del obstáculo (ver Figura 88a).
- b. *Despliegue del brazo sobre el desnivel:* Una vez posicionado el robot frente al desnivel, el actuador lineal del brazo se despliega hasta que el efector final toque el suelo con una fuerza cuya magnitud sea suficiente para eliminar el contacto de las dos ruedas delanteras del robot con el suelo, de manera que el robot queda apoyado sobre tres puntos (dos ruedas traseras y el efector final del brazo, ver Figura 88b). La magnitud de esta fuerza está definida por (50).
- c. *Avance del robot para que su parte delantera sobresalga del desnivel:* A continuación el robot avanza hacia adelante traccionado por sus ruedas traseras, desplazándose una distancia de 300 mm, los cuales son suficientes para garantizar que las ruedas delanteras queden posicionadas fuera del desnivel (ver Figura 88c).
- d. *Descenso de la parte delantera del robot:* Posteriormente, se procede a retraer completamente el actuador lineal del brazo. A medida que éste se retrae, la parte frontal del robot irá descendiendo hasta que las ruedas delanteras toquen el suelo en la superficie inferior del obstáculo (ver Figura 88d).
- e. *Posicionamiento del brazo en la parte posterior del robot:* Esta etapa incluye dos movimientos sucesivos del robot: 1) Girar la primera articulación del brazo 180°, quedando éste posicionado en la parte posterior del robot (ver Figura 88e). 2) Desplegar nuevamente el actuador lineal hasta que el sensor de presión detecte el contacto del efector final con el suelo.

f. *Elevación de la parte posterior del robot con apoyo del brazo:* En esta etapa el actuador lineal continúa desplegándose mientras el efector final del brazo sigue tocando el suelo. El despliegue del actuador continuará hasta que las ruedas traseras pierdan su contacto con el suelo, por lo que el robot quedará apoyado nuevamente sobre tres puntos (dos ruedas traseras y el efector final del brazo, ver Figura 88f).



**Figura 88. Estrategia seguida por Lázaros para bajar un escalón o rampa de gran inclinación.**

g. *Avance del robot:* A continuación, el robot se desplazará hacia adelante avanzando una distancia de  $275\text{ mm}$  mientras sigue apoyado sobre tres puntos. Con ello se garantiza que las dos ruedas traseras sobresalgan del desnivel (ver Figura 88g).

h. *Aterrizaje:* Finalmente se ejecuta esta etapa que consta de dos movimientos: 1) Retracción total del actuador lineal del brazo; a medida que ésto ocurre, la parte

posterior del robot irá descendiendo hasta que las ruedas traseras toquen el suelo (ver Figura 88h). 2) Giro de la primera articulación del brazo  $180^\circ$  para posicionar nuevamente el brazo al frente del robot (ver Figura 88i).

### 5.3.1 Análisis de estabilidad al vuelco y direccionamiento

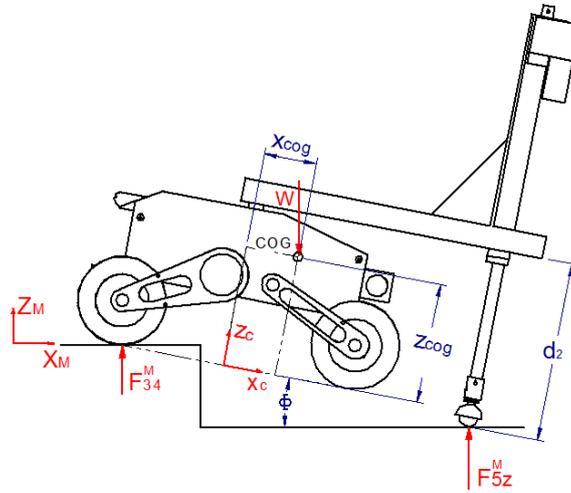
Al igual que en la estrategia anterior (ascenso sobre escalones), se realizó un análisis de la navegabilidad para esta estrategia utilizando los índices de estabilidad y direccionamiento propuestos en el Capítulo 4. Estos índices se evaluaron específicamente en cada etapa de esta estrategia. Es de resaltar, que para las etapas *a* (Posicionamiento frente al desnivel), *b* (Despliegue del brazo sobre el desnivel) y *c* (Avance del robot para que su parte delantera sobresalga del desnivel), se utilizó la ecuación (19) para el cálculo de las fuerzas de reacción cuando existen cuatro o cinco puntos de contacto del robot con el suelo, y las ecuaciones (29) a (32) cuando existen tres puntos de contacto. En el resto de las etapas (*d*, *e*, *f*, *g* y *h*) se deben calcular las fuerzas de reacción de manera específica, ya que, como se mencionó anteriormente, el robot posee una inclinación respecto al suelo. A continuación se presenta el análisis para el cálculo de las fuerzas de reacción en las etapas donde se requiere.

**Etapa d (Descenso de la parte delantera del robot).** Al comienzo de esta etapa el robot se encuentra apoyado sobre tres puntos de contacto con el suelo (dos ruedas traseras y el efector final del brazo), mientras que las ruedas delanteras sobresalen del desnivel (ver Figura 88c). A partir de este instante se desarrollan tres períodos bien diferenciados durante esta etapa: el primero ocurre cuando el actuador lineal del brazo se retrae, produciendo el descenso del robot en su parte frontal incluyendo sus ruedas delanteras, las cuales aún no tocan el suelo (ver Figura 89). Durante este período, las fuerzas de reacción de los tres puntos de contacto del robot con el suelo ( $F_{3z}^M$ ,  $F_{4z}^M$  y  $F_{5z}^M$ ) están determinadas por:

$$F_{3z}^M = F_{4z}^M = \frac{W/2 [(420 - x_{cog}) \cos \Phi + (282.5 - |d_2| - z_{cog} + R_r) \sin \Phi]}{620 \cos \Phi + (282.5 - |d_2|) \sin \Phi} \quad (69)$$

$$F_{5z}^M = \frac{W[(191 + x_{cog}) \cos \Phi + (z_{cog} - R_r) \sin \Phi]}{620 \cos \Phi + (282.5 - |d_2|) \sin \Phi} \quad (70)$$

que se obtuvieron utilizando el sistema de referencia  $(X_M Y_M Z_M)$  y la formulación correspondiente a la segunda ley de Newton en estado cuasiestático.



**Figura 89. Lázaro descendiendo un escalón apoyado en sus ruedas traseras y brazo.**

El segundo período, el cual posee una corta duración, se inicia cuando las ruedas delanteras tocan el suelo mientras que el efector final del brazo también lo toca, por lo que existen cinco puntos de contacto entre el robot y el suelo (ver Figura 90). En este caso, las fuerzas de reacción no se pueden obtener individualmente, por lo que se calcularon las sumas de reacciones en los cuatro ejes de vuelco ( $F_{12}^M$ ,  $F_{23}^M$ ,  $F_{34}^M$  y  $F_{14}^M$ ), las cuales quedaron definidas a través:

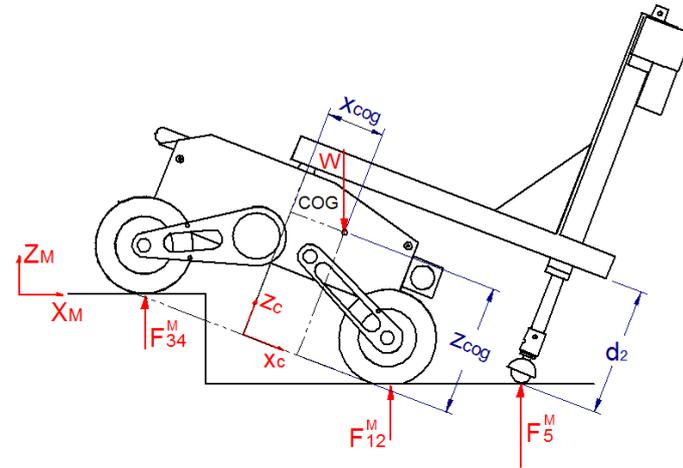
$$F_{14}^M = \frac{W(199 + y_{cog}) - 199F_{5z}^M}{398} \quad (71)$$

$$F_{23}^M = \frac{W(199 - y_{cog}) - 199F_{5z}^M}{398} \quad (72)$$

$$F_{12}^M = \{W[(191 + x_{cog}) \cos \Phi + (z_{cog} - R_r) \sin \Phi] - F_{5z}^M[620 \cos \Phi + (282.5 - |d_2|) \sin \Phi]\} / (400 \cos \Phi) \quad (73)$$

$$F_{34}^M = \{W[(209 - x_{cog}) \cos \Phi - (z_{cog} - R_r) \sin \Phi] + F_{5z}^M[220 \cos \Phi + (282.5 - |d_2|) \sin \Phi]\} / (400 \cos \Phi) \quad (74)$$

Durante este período, la fuerza de contacto del efector final decrece rápidamente hasta llegar a cero.



**Figura 90. LázarO descendiendo un escalón apoyado en sus cuatro ruedas y brazo.**

Finalmente, se inicia el tercer período cuando, producto de la retracción del actuador lineal del brazo, el efector final termina su contacto con el suelo, por lo que existen cuatro puntos de contacto entre el robot y el suelo. Al igual que en el período anterior, se calcularon las sumas de reacciones en los cuatro ejes de vuelco ( $F_{12}^M$ ,  $F_{23}^M$ ,  $F_{34}^M$  y  $F_{14}^M$ ), quedando especificadas a través de (71) a la (74), pero considerando que  $F_{5z}^M = 0 \text{ N}$ .

**Etapa e (Posicionamiento del brazo en la parte posterior del robot).** En esta etapa la primera articulación del brazo gira  $180^\circ$  para ubicarse en la parte posterior del robot (ver Figura 88e) y, luego, se despliega el actuador lineal del brazo hasta que el efector final toque el suelo. Así, el robot mantiene cuatro puntos de contacto con el terreno, por lo que también se obtuvieron las sumas de reacciones en los cuatro ejes de vuelco ( $F_{12}^M$ ,  $F_{23}^M$ ,  $F_{34}^M$  y  $F_{14}^M$ ), las cuales también quedaron definidas por las ecuaciones (71) a la (74), considerando adicionalmente que  $F_{5z}^M = 0 \text{ N}$ .

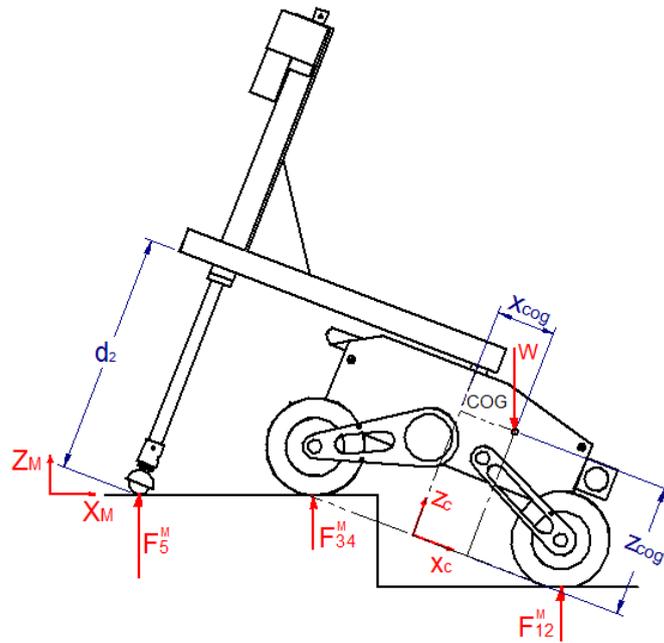
**Etapa f (Elevación de la parte posterior del robot con apoyo del brazo).** En esta etapa se identificaron dos períodos bien definidos. En el primero, el efector final del brazo toca el suelo mientras que el robot está apoyado sobre sus cuatro ruedas, por lo cual existen cinco puntos de contacto entre el robot y el suelo (ver Figura 91). En este caso se determinaron las sumas de reacciones en los ejes de vuelco ( $F_{12}^M$ ,  $F_{23}^M$ ,  $F_{34}^M$  y  $F_{14}^M$ ) a través de:

$$F_{14}^M = \frac{W(199 + y_{cog}) - 199F_{5z}^M}{398} \quad (75)$$

$$F_{23}^M = \frac{W(199 - y_{cog}) - 199F_{5z}^M}{398} \quad (76)$$

$$F_{12}^M = \{W[(191 + x_{cog}) \cos \Phi + (z_{cog} - R_r) \sin \Phi] + F_{5z}^M[220 \cos \Phi + (|d_2| - 282.5) \sin \Phi]\} / (400 \cos \Phi) \quad (77)$$

$$F_{34}^M = \{W[(209 - x_{cog}) \cos \Phi - (z_{cog} - R_r) \sin \Phi] - F_{5z}^M[620 \cos \Phi + (|d_2| - 282.5) \sin \Phi]\} / (400 \cos \Phi) \quad (78)$$



**Figura 91. Lázarο descendiendo apoyando su brazo en su parte posterior para levantar las ruedas traseras.**

Durante este período, la fuerza de contacto del efector final del brazo con el suelo se incrementará hasta alcanzar la magnitud definida por:

$$F_{5z}^M eq = \frac{W[(209 - x_{cog}) \cos \Phi - (z_{cog} - R_r) \sin \Phi]}{620 \cos \Phi + (|d_2| - 282.5) \sin \Phi} \quad (79)$$

produciéndose, en ese instante, la pérdida de contacto entre las ruedas traseras y el suelo.

Durante el segundo período el robot queda apoyado solo sobre tres puntos (ruedas delanteras y efector final del brazo; ver Figura 92). En este caso, se determinaron las fuerzas de reacción de los tres puntos de contacto del robot con el suelo ( $F_{1z}^M$ ,  $F_{2z}^M$  y  $F_{5z}^M$ ) como:

$$F_{1z}^M = F_{2z}^M = \frac{W/2 [(420 + x_{cog}) \cos \Phi + (|d_2| + z_{cog} - 282.5 - R_r) \sin \Phi]}{620 \cos \Phi + (|d_2| - 282.5) \sin \Phi} \quad (80)$$

$$F_{5z}^M = \frac{W[(209 - x_{cog}) \cos \Phi - (z_{cog} - R_r) \sin \Phi]}{620 \cos \Phi + (|d_2| - 282.5) \sin \Phi} \quad (81)$$

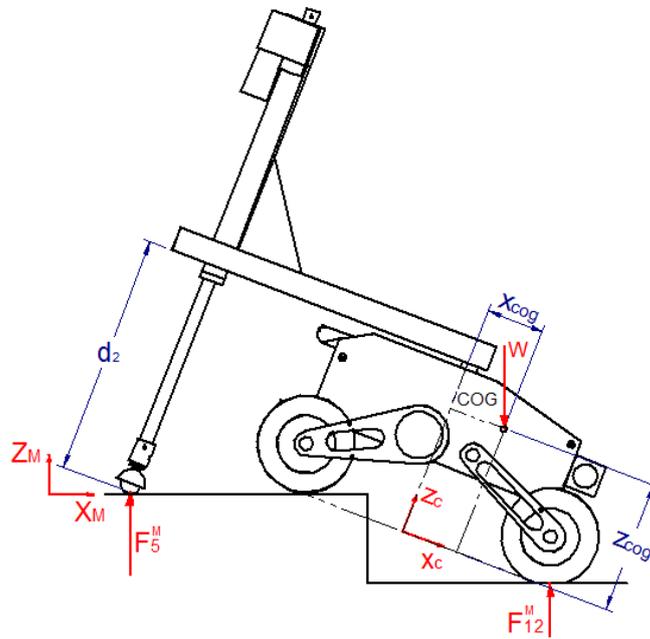


Figura 92. Lázaroo descendiendo un escalón apoyado sobre su brazo y ruedas delanteras.

**Etapa g (Avance del robot):** Durante esta etapa el robot se desplaza hacia delante apoyado sobre tres puntos (ruedas delanteras y efector final del brazo; ver Figura 88g), por lo que las fuerzas de reacción de estos tres puntos de contacto del robot con el suelo ( $F_{1z}^M$ ,  $F_{2z}^M$  y  $F_{5z}^M$ ) también quedan determinadas por (80) y (81).

**Etapa h (Aterrizaje).** En esta última etapa se evidenciaron tres períodos. Durante el primero, el actuador lineal del brazo se retrae produciendo el descenso de las ruedas traseras hasta tocar el suelo, por lo que el robot estará apoyado sobre tres puntos de contacto con el terreno (ruedas delanteras y brazo). Las fuerzas de reacción individuales

para cada punto de contacto en este caso ( $F_{1z}^M$ ,  $F_{2z}^M$  y  $F_{5z}^M$ ), pueden ser determinadas a través de (80) y (81).

El segundo período ocurre mientras el actuador lineal del brazo continúa su retracción: durante este corto instante, el robot queda apoyado sobre cinco puntos de contacto con el suelo (cuatro ruedas más el efector final del brazo), aunque la fuerza de reacción ejercida sobre el efector lineal del brazo irá decreciendo hasta llegar a cero. Posteriormente comienza el tercer período donde se continúa la retracción del actuador lineal del brazo (ver Figura 88h) y se gira la primera articulación del brazo  $180^\circ$  para llevar el brazo nuevamente al frente del robot (ver Figura 88i). Durante este tercer período, el robot permanece apoyado sobre cuatro puntos de contacto con el suelo. En el segundo y tercer período, se calculan las sumas de reacciones en los ejes de vuelco ( $F_{12}^M$ ,  $F_{23}^M$ ,  $F_{34}^M$  y  $F_{14}^M$ ) utilizando (19).

Ahora que se conocen las fuerzas de reacción en cada etapa de la estrategia diseñada, se pueden calcular los índices de estabilidad y direccionamiento utilizando (20) y (34) cuando el robot está apoyado con cuatro o cinco puntos, o a través de (33), (35) y (36) y cuando el robot esté apoyado sobre tres puntos.

### 5.3.2 Pruebas simuladas

Se hizo la validación de las ecuaciones obtenidas en el cálculo de la fuerzas de reacción e índices de estabilidad y direccionamiento simulando el robot mientras desciende sobre un escalón y una rampa de gran inclinación utilizando el software *ADAMS*. En la Figura 93 se muestra el descenso del robot sobre un escalón durante la simulación y en la Figura 94 se exhibe el conjunto de variables tomadas de la simulación ( $\theta_1$ ,  $|d_2|$ ,  $\Phi$  y  $F_{5z}^M$ ), las cuales, también estarían disponibles en el robot real a través de sus sensores.

Adicionalmente, en la Figura 95 se muestran las sumas de reacciones para los ejes de vuelco obtenidas a través de las ecuaciones teóricas y también la misma información obtenida de acuerdo a la simulación en *ADAMS*. Cabe destacar que, para la obtención de las reacciones utilizando las ecuaciones teóricas, fue necesario utilizar las variables presentadas en la Figura 94. A continuación, se presentan los índices de estabilidad (ver Figura 96a) y direccionamiento (ver Figura 96b) obtenidos tanto

teóricamente como a través de simulación. Al comparar los datos se evidenció para el caso de índice de estabilidad, un error medio de 0.61% y un error cuadrático medio de 1.67%.

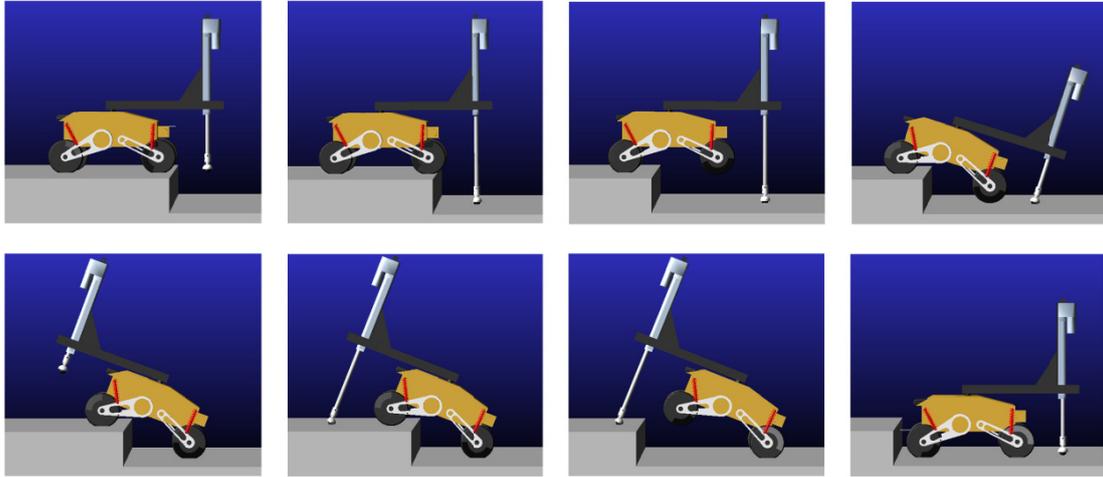


Figura 93. Secuencia para el descenso de un escalón. Simulación con *ADAMS*.

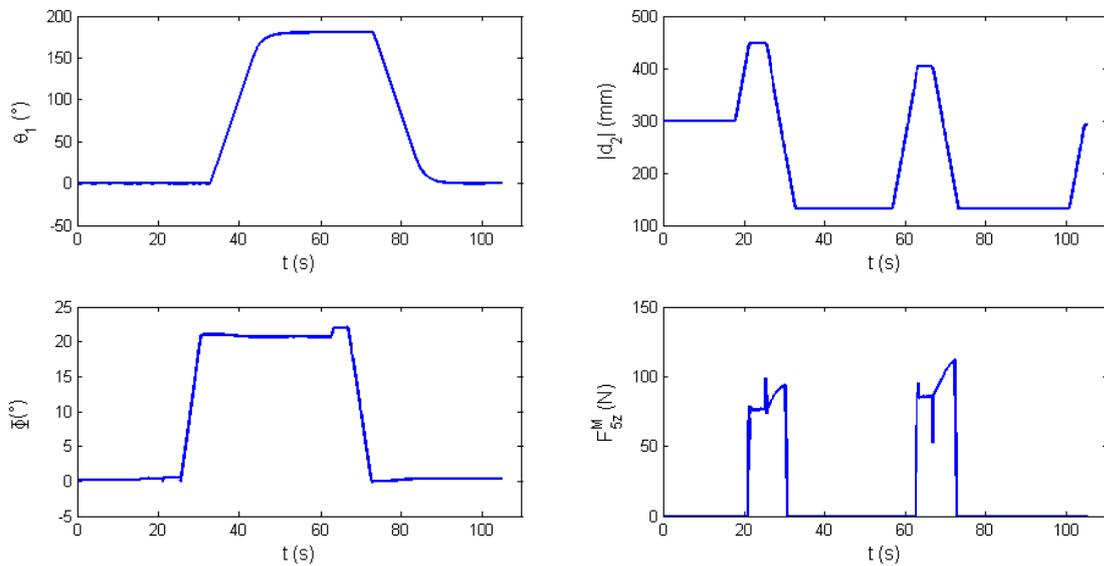
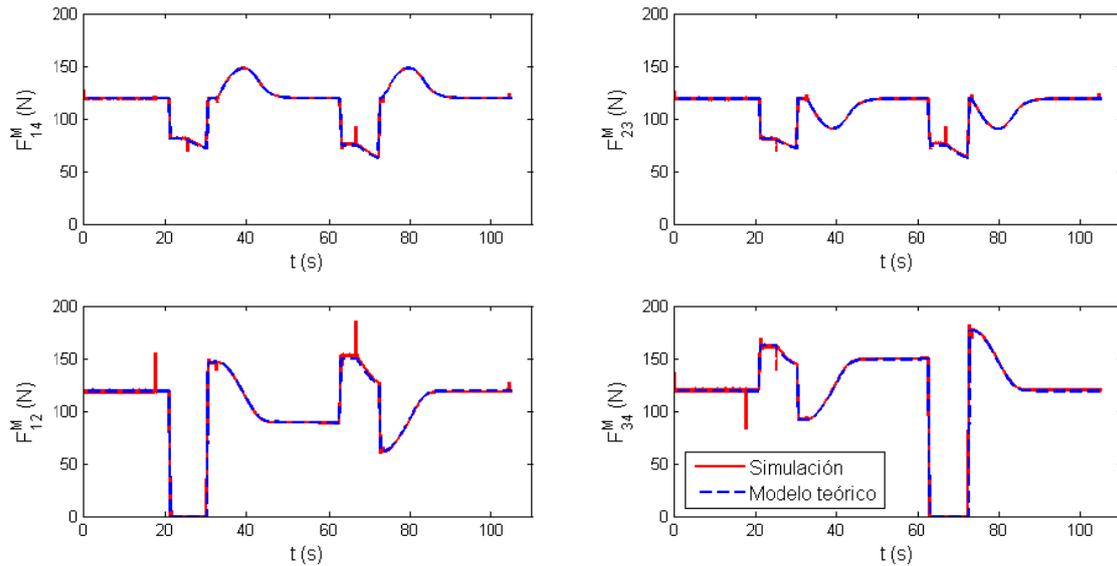
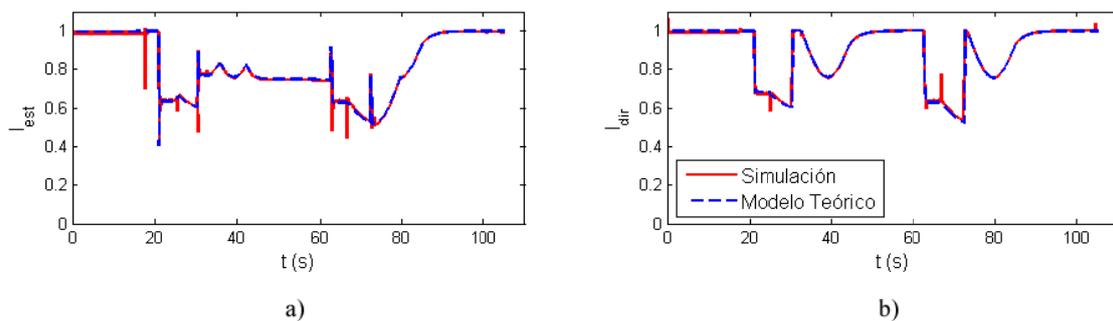


Figura 94. Variables  $\theta_1$ ,  $|d_2|$ ,  $\Phi$  y  $F_{5z}^M$  obtenidas de la simulación en *ADAMS* cuando el robot desciende de un escalón.



**Figura 95. Reacciones en los ejes de vuelco obtenidos durante una simulación donde Lázaro desciende un escalón.**

De igual manera se hizo la comparación respecto al índice de direccionamiento. En este caso se encontró un error medio de 0.33% y un error cuadrático medio de 1.50%. Al analizar las magnitudes de estos porcentajes, se evidencia la fiabilidad de los modelos teóricos deducidos para predecir el comportamiento de la navegabilidad del robot cuando desciende escalones o rampas de gran inclinación.



**Figura 96. Índices de estabilidad y direccionamiento durante el descenso de un escalón.**

Por último, es importante comprobar si existe la posibilidad de vuelco o pérdida de direccionamiento cuando Lázaro desciende sobre este tipo de obstáculos. En el caso de la estabilidad al vuelco, se debe revisar la Figura 96a, allí se encontró que el robot en ningún momento está en riesgo de vuelco puesto que el menor índice de estabilidad es  $I_{est} = 0.51$ , el cual ocurre a los 73 s de la simulación.

Al verificar las variables medibles por los sensores en ese instante (ver Figura 94), se encontró que  $\theta_1 = 180^\circ$ ,  $\Phi = 0^\circ$  y  $F_{5z}^M = 0 \text{ N}$ . Este estado se corresponde con la Etapa *h* (*Aterrizaje*), específicamente en el instante en el que el efector final del brazo, ubicado en la parte trasera del robot, deja de tocar el suelo quedando el robot apoyado sobre sus cuatro ruedas (ver Figura 88h). Aunque este estado es estable, tienen un índice menor ya que Lázaró posee su centro de gravedad situado un poco más atrás del centro geométrico del robot y si el brazo está posicionado hacia atrás, contribuye para que el centro de gravedad se desplace aún más hacia atrás, por lo que, se genera un pequeño desequilibrio (con tendencia a volcar hacia atrás) que se manifiesta en un índice de estabilidad menor, aunque seguro.

En el caso del índice de direccionamiento, la situación es similar, ya que el menor índice es  $I_{est} = 0.53$ , el cual se produce a los 72.5 s de la simulación (ver Figura 96b). En ese momento se encontró que  $\theta_1 = 180^\circ$ ,  $\Phi \approx 0^\circ$  y  $F_{5z}^M = 112 \text{ N}$ , lo cual ocurre en la Etapa *h* (*Aterrizaje*), pero en el instante previo al contacto de las ruedas traseras del robot con el suelo, por lo que existe una gran fuerza de reacción sobre el efector final del brazo (máxima  $F_{5z}^M$ ). Ésto incide sobre las demás fuerzas de reacción ( $F_{1z}^M$  y  $F_{2z}^M$ ), las cuales tendrán una menor magnitud, aunque esta disminución no es suficiente para afectar el direccionamiento, ya que el índice está lejos del valor crítico. Con este análisis se puede deducir que Lázaró podrá descender escalones y rampas de gran inclinación con alturas de hasta 140 mm sin correr riesgos de vuelco o pérdida de direccionamiento.

### 5.3.3 Pruebas experimentales

También se realizaron pruebas donde Lázaró ejecutó la estrategia diseñada para descender sobre escalones y rampas de gran inclinación. Las dimensiones de los obstáculos utilizados fueron: altura  $h = 140 \text{ mm}$  y ángulo de inclinación  $\beta = 45^\circ$  (en el caso de la rampa de gran inclinación). La secuencia de ejecución para el escalón se muestra en la Figura 97, mientras que para la rampa, se exhibe en la Figura 98. En ambos casos, el robot ejecutó la estrategia en aproximadamente 85 s, comprobándose la capacidad de Lázaró para ejecutarla.

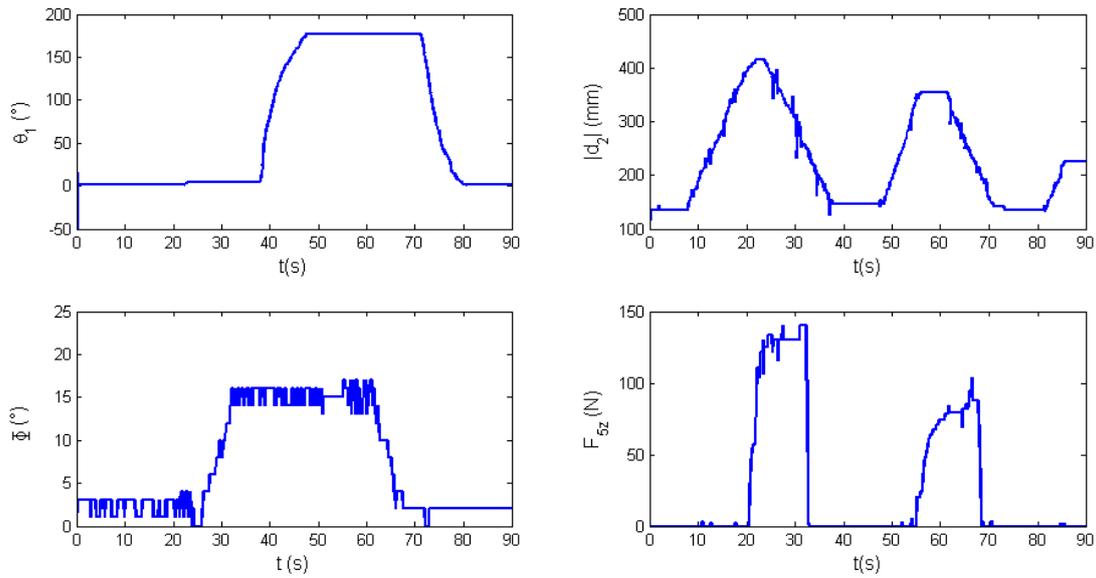


**Figura 97. Secuencia seguida por Lázaró para el descenso sobre un escalón.**

En ambas pruebas, se utilizaron los sensores instalados en el robot para adquirir el conjunto de variables  $\theta_1$ ,  $|d_2|$ ,  $\Phi$  y  $F_{5z}$ . En el caso del descenso sobre el escalón, la información recopilada se muestra en la Figura 99 con la que se calcularon las fuerzas de reacción y, posteriormente, los índices de estabilidad y direccionamiento, los cuales se exhiben en la Figura 100. Los resultados obtenidos en el caso del descenso sobre rampas de gran inclinación se omiten, ya que son muy parecidos a los obtenidos en la prueba de descenso sobre escalón.

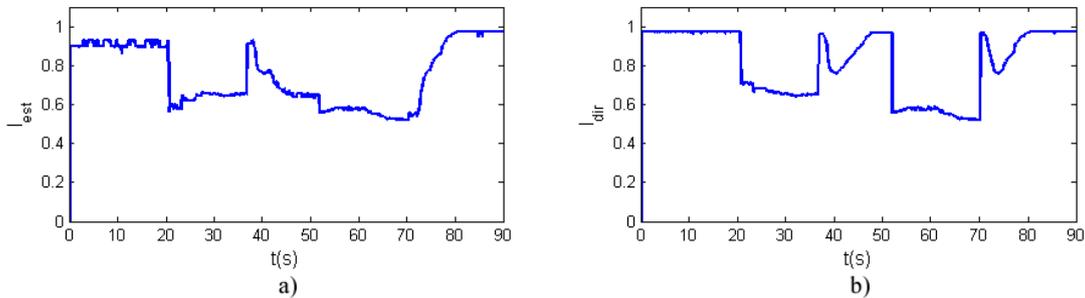


**Figura 98. Secuencia seguida por Lázaró para el descenso sobre una rampa.**



**Figura 99. Variables obtenidas por los sensores de Lázaro ( $\theta_1$ ,  $|d_2|$ ,  $\Phi$  y  $F_{5z}$ ) cuando éste desciende de un escalón.**

Posteriormente, se hizo la comparación correspondiente entre los índices de estabilidad y direccionamiento obtenidos en las pruebas experimentales contra aquellos obtenidos en la simulación. En el caso del índice de estabilidad, se encontró su valor mínimo ( $I_{est} = 0.52$ ) a los 70 s de la prueba (ver Figura 100a), cuando  $\theta_1 = 177^\circ$ ,  $\Phi = 2^\circ$  y  $F_{5z} = 0\text{ N}$ , momento que corresponde exactamente a la misma fase (Etapa  $h$ ), donde se registró el mínimo índice de estabilidad durante la simulación ( $I_{est} = 0.51$ ), obteniéndose una diferencia de solo 0.01 entre el valor real y el valor de simulación. Estos resultados nuevamente corroboran la exactitud de la simulación; además, se confirma la capacidad del robot para ejecutar esta estrategia sin correr riesgo de vuelco.



**Figura 100. Índices de estabilidad y direccionamiento obtenidos durante el descenso de un escalón.**

En el caso del índice de direccionamiento, se encontró que su valor mínimo se obtuvo a los 69 s de la prueba (ver Figura 100b) cuando se registró un  $I_{dir} = 0.52$  mientras que  $\theta_1 = 177^\circ$ ,  $\Phi \approx 2^\circ$  y  $F_{5z}^M = 88 N$ . De igual manera, como se ha indicado en los casos anteriores, se revela que este instante también corresponde a la misma fase (Etapa *h*), donde se registra el mínimo índice de direccionamiento durante la simulación ( $I_{dir} = 0.53$ ), obteniéndose nuevamente una diferencia de 0.01 entre el valor real y el valor de simulación, con lo cual se validan los resultados de la simulación.

## 5.4 Desplazamiento sobre una zanja

Lázaro puede sobrepasar zanjas de distintos tamaños. Cuando éstas son bastante anchas ( $57 < a_z < 150 mm$ ) y profundas ( $h_z > 21 mm$ ), requerirá apoyarse con su brazo para lograr tal objetivo. Pero, cuando las dimensiones son menores a las especificadas ( $a_z \leq 57 mm$  ó  $h_z \leq 21 mm$ ) podrá sobrepasar las zanjas sin ayuda de su brazo, considerando que el tamaño de las ruedas y la tracción provista por los motores del robot es suficiente para tal fin. La capacidad de los motores de tracción para sobrepasar las zanjas con las dimensiones límites fue definida utilizando el software *ADAMS* con un par máximo en cada motor de 12.5 *N.m* y un coeficiente de fricción estático  $\mu_s = 1.0$ . Adicionalmente, es importante destacar que el ancho máximo (150 *mm*) que podrá sobrepasar Lázaro utilizando su brazo fue establecido de acuerdo con el alcance horizontal del brazo.

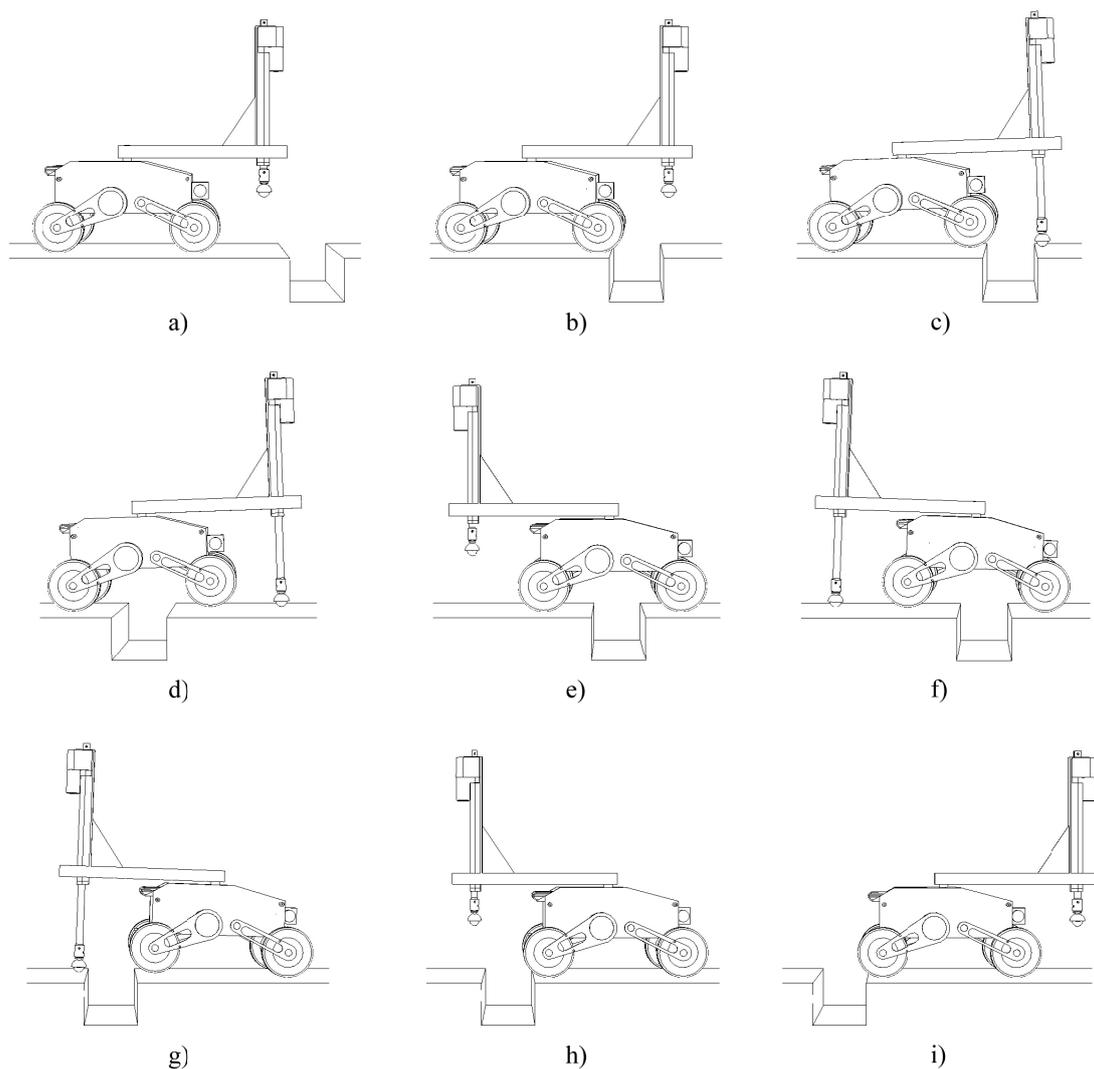
Una vez delimitadas las variables geométricas que deben poseer las zanjas para que Lázaro las pueda sobrepasar utilizando su brazo, a continuación se describe el conjunto de etapas o movimientos sucesivos que debe efectuar el robot para ejecutar esta estrategia:

- a. *Preparación para sobrepasar la zanja:* Como se ha mencionado previamente, Lázaro podrá detectar obstáculos utilizando los sónares y telémetro láser que están instalados al frente del robot. Por tanto, cuando se detecte una zanja a 250 *mm* de distancia (medidos desde el frente de la estructura del robot hasta el primer vértice en la zanja), se procede a preparar el brazo para la estrategia, orientándolo hacia el frente ( $\theta_1 = 0^\circ$ ) y eliminando el contacto de su efector final con el suelo ( $F_{5z} = 0 N$ ) si éste existe (ver Figura 101a).

- b. *Posicionamiento frente a la zanja:* Una vez que el brazo esté preparado correctamente, el robot continúa su avance 210 mm hacia adelante y luego se detiene. Con ello se garantiza que el efector final quede ubicado detrás de la zanja (ver Figura 101b).
- c. *Elevación del robot con apoyo del brazo:* A continuación se despliega el actuador lineal del brazo provocando el contacto del efector final con el suelo. Este despliegue continua hasta que el sensor de fuerza (ubicado en el efector final) detecte que se ha alcanzado una fuerza de contacto  $F_{5z\ eq}$  cuya magnitud está definida por (50). En este momento, las ruedas delanteras del robot pierden el contacto con el suelo, por lo que el robot queda apoyado sobre tres puntos (dos ruedas traseras y el efector final, ver Figura 101c).
- d. *Avance del robot para que su parte delantera se posicione después de la zanja:* Nuevamente se inicia el avance del robot, en esta oportunidad éste se desplaza 300 mm logrando que las ruedas delanteras sobrepasen la zanja (ver Figura 101d). Durante esta etapa el robot también está apoyado sobre tres puntos de contacto con el suelo (efector final del brazo y ruedas traseras).
- e. *Posicionamiento del brazo en la parte posterior del robot:* En esta etapa se realizan dos acciones: inicialmente se retrae el actuador lineal del brazo para eliminar el contacto del efector final con el suelo quedando el robot apoyado sobre sus cuatro ruedas. Posteriormente, se gira la primera articulación del brazo 180° para que quede orientado hacia la cara posterior del robot (ver Figura 101e).
- f. *Elevación de la parte posterior del robot con apoyo del brazo:* A continuación se despliega nuevamente el actuador lineal del brazo hasta que el efector final toque el suelo. Posteriormente, el despliegue continúa hasta que el sensor de fuerza detecte que se ha alcanzado una fuerza de contacto  $F_{5z\ eq}$  cuya magnitud está definida por:

$$F_{5z\ eq} = \frac{W(209 - x_{cog})}{a_1 + 209} \quad (82)$$

En este momento, las ruedas traseras del robot pierden el contacto con el suelo por lo que el robot queda nuevamente apoyado sobre tres puntos (dos ruedas delanteras y efector final del brazo; ver Figura 101f).



**Figura 101. Estrategia seguida por Lázaro para sobrepasar una zanja ancha y profunda.**

- g. Avance del robot para que su parte posterior se posicione detrás de la zanja:* Se produce el último avance del robot 300 mm hacia delante, logrando que las ruedas traseras sobrepasen la zanja mientras el robot sigue apoyado sobre tres puntos (dos ruedas delanteras y el efector final del brazo; ver Figura 101g).
- h. Aterrizaje:* Finalmente, el robot ejecuta dos movimientos con su brazo. En primer lugar, el actuador lineal se retrae completamente produciendo que cese el contacto del efector final con el suelo quedando el robot apoyado sobre sus cuatro ruedas (ver Figura 101h). Posteriormente, la primera articulación del brazo gira 180° nuevamente para posicionar este dispositivo al frente del robot (ver Figura 101i).

### 5.4.1 Análisis de estabilidad al vuelco y direccionamiento

Durante el desarrollo de esta estrategia, Lázaró no posee en ningún momento ninguna inclinación importante respecto al suelo, por lo que no se requiere calcular las fuerzas de reacción de manera específica para ninguna etapa. Por tanto, se puede utilizar la ecuación (19) para el cálculo de las fuerzas de reacción entre las ruedas y el suelo cuando existen cuatro o cinco puntos de contacto del robot con el terreno, y las ecuaciones (29) a la (32) cuando existen tres puntos de contacto.

Partiendo de esta premisa, se realizó el análisis de estabilidad y direccionamiento durante la ejecución de esta estrategia utilizando los índices propuestos en el Capítulo 4 ( $I_{est}$  e  $I_{dir}$ ), los cuales están fundamentados en las fuerzas de reacción; estos índices fueron evaluados específicamente en cada etapa utilizando (20) y (34) cuando el robot está apoyado sobre cuatro o cinco puntos, o a través de (33), (35) y (36) cuando el robot está apoyado sobre tres puntos.

### 5.4.2 Pruebas simuladas

Se simuló el robot mientras sobrepasaba una zanja utilizando el software *ADAMS* para verificar la validez de las ecuaciones obtenidas en el cálculo de las fuerzas de reacción e índices de estabilidad y direccionamiento. La Figura 102 muestra la secuencia de ejecución cuando el robot sobrepasa la zanja durante la simulación y la Figura 103 muestra el conjunto de variables tomadas de la simulación, las cuales podrían ser medidas en el robot real utilizando sus sensores ( $\theta_1$ ,  $|d_2|$ ,  $\phi$  y  $F_{5z}$ ).

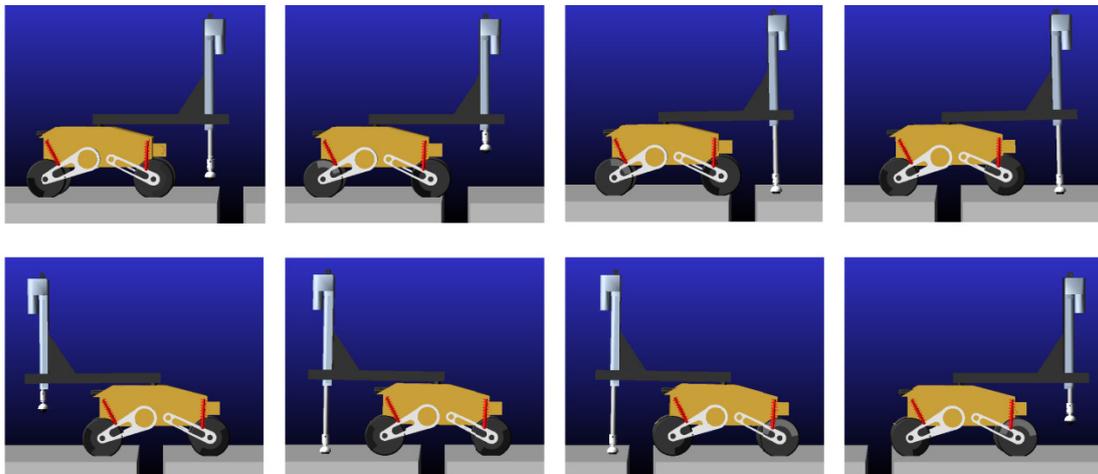
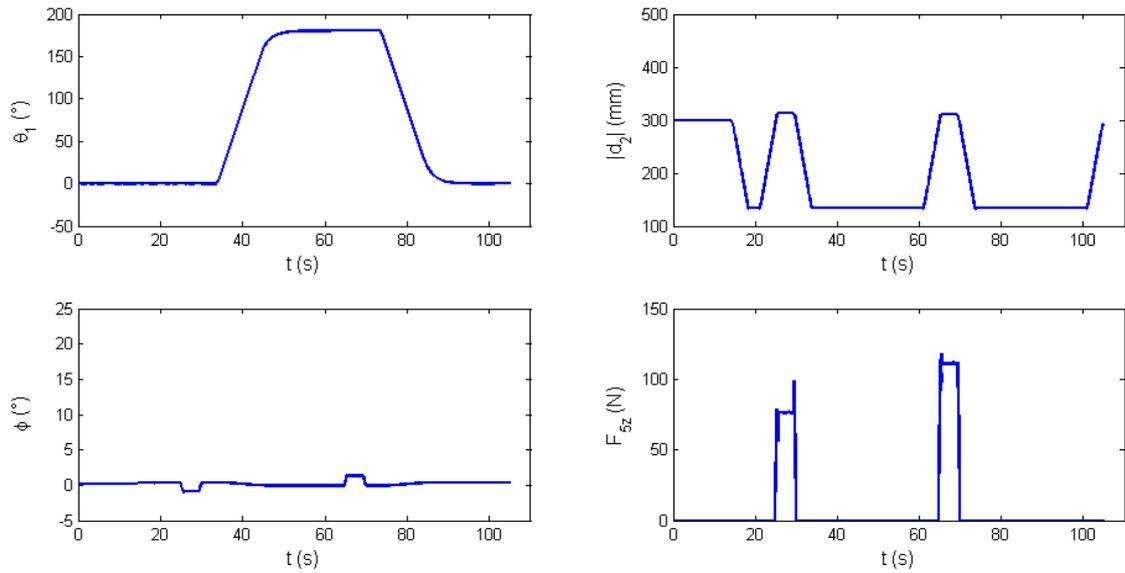
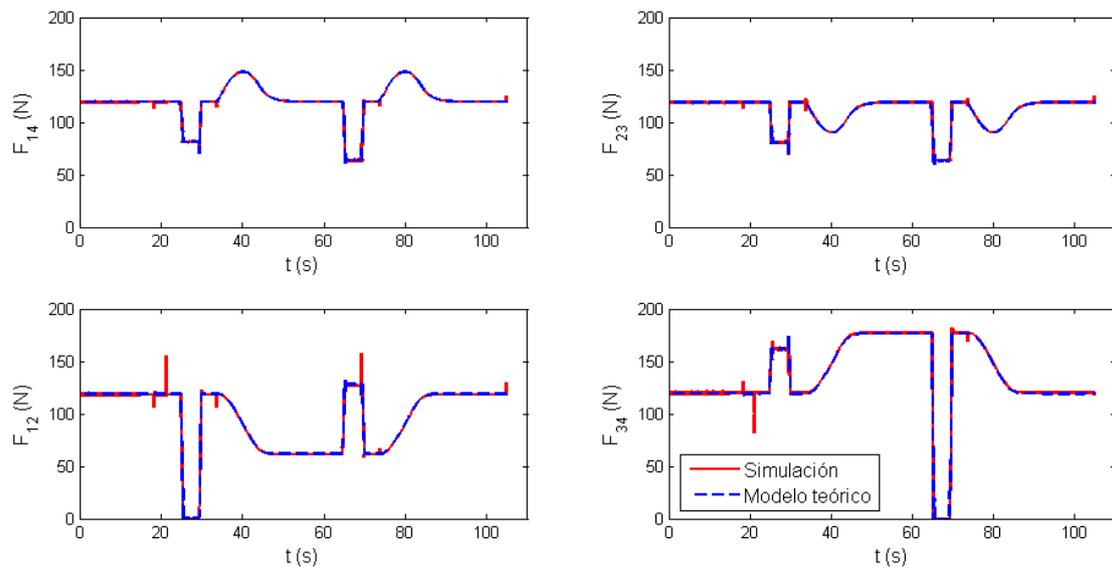


Figura 102. Secuencia ejecutada por Lázaró para sobrepasar una zanja ancha y profunda. Simulación con *ADAMS*.



**Figura 103. Variables  $\theta_1$ ,  $|d_2|$ ,  $\phi$  y  $F_{5z}$  obtenidas de la simulación en *ADAMS* cuando el robot sobrepasa una zanja ancha y profunda.**

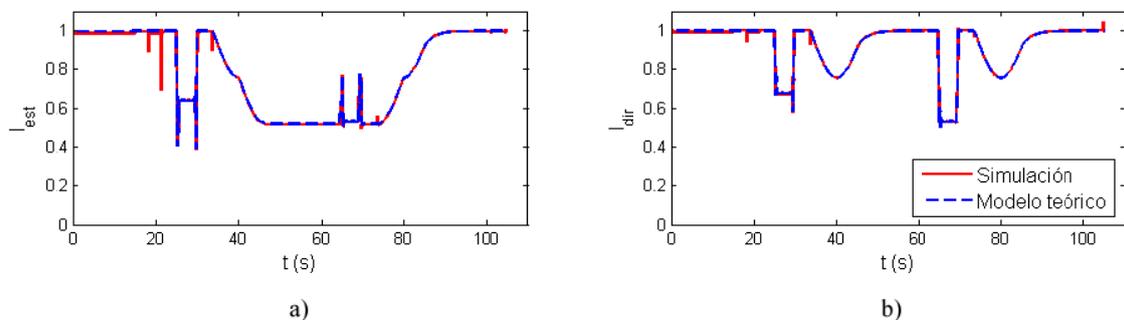
A continuación se muestran en la Figura 104 las sumas de reacciones para los ejes de vuelco obtenidas de acuerdo a la simulación en *ADAMS* y, también, la misma información obtenida a través de las ecuaciones teóricas. Se debe resaltar que, para la obtención de las reacciones utilizando las ecuaciones teóricas, fue necesario utilizar las medidas representadas en la Figura 103 ( $\theta_1$ ,  $|d_2|$ ,  $\phi$  y  $F_{5z}$ ).



**Figura 104. Reacciones en los ejes de vuelco obtenidos durante una simulación donde Lázaro sobrepasa una zanja ancha y profunda.**

Además, se presentan los índices de estabilidad (ver Figura 105a) y direccionamiento (ver Figura 105b) obtenidos durante la ejecución de la simulación. Es importante comparar nuevamente los valores obtenidos con las ecuaciones teóricas respecto a los valores obtenidos a través de la simulación. En el caso del índice de estabilidad, el error medio obtenido entre los índices teóricos y de simulación fue 0.43% mientras que el error cuadrático medio fue 1.31%. Por otro lado, en el índice de direccionamiento, el error medio correspondió a 0.16% y el error cuadrático medio fue 1.04%. Una vez más, se comprueba la fiabilidad de los modelos teóricos para predecir el comportamiento del robot con respecto al cálculo de las fuerzas de reacción con el suelo y la obtención de los índices de estabilidad y direccionamiento.

Finalmente, es relevante indicar si existe algún momento de inestabilidad o pérdida de direccionamiento durante la ejecución de la estrategia. En el caso de la estabilidad, la Figura 105a muestra que el menor índice de estabilidad es  $I_{est} = 0.51$ , el cual se presenta entre los 47 a 65 s y entre los 70 a 74 s. Estos dos períodos corresponden a las etapas *e* (*Posicionamiento del brazo en la parte posterior del robot*) y *h* (*Aterrizaje*). Concretamente, cuando el brazo está posicionado en la parte posterior del robot mientras que el efector final del brazo no toca el suelo ( $\theta_1 = 180^\circ$  y  $F_{5z} = 0 N$ ). En estos períodos, el índice de estabilidad es menor ya que, como se explicó anteriormente, Lázaro posee su centro de gravedad situado un poco más atrás del centro geométrico del robot y si el brazo está posicionado hacia atrás, contribuye para que el centro de gravedad se desplace aún más hacia atrás, por lo que, se genera un pequeño desequilibrio (con tendencia a volcar hacia atrás) que se manifiesta en un índice de estabilidad menor, aunque seguro.



**Figura 105. Índices de estabilidad y direccionamiento obtenidos cuando el robot sobrepasa una zanja ancha y profunda.**

Respecto al índice de direccionamiento, la Figura 105b muestra que el menor índice de direccionamiento ocurre entre los 65 y los 69 s. Este período corresponde a la Etapa *f* (*Elevación de la parte posterior del robot con apoyo del brazo*). Allí, el efector final del brazo toca el suelo generando la fuerza de contacto máxima (110 N), lo cual produce una disminución de las reacciones en las ruedas delanteras (únicas ruedas que están en contacto en ese instante) logrando una disminución del índice de direccionamiento hasta el valor de  $I_{dir} = 0.53$ , considerado un valor aceptable. Así pues, se comprueba, a través del análisis hecho, la capacidad de Lázaro para sobrepasar este tipo de obstáculos sin riesgo de vuelco ni pérdida de direccionamiento.

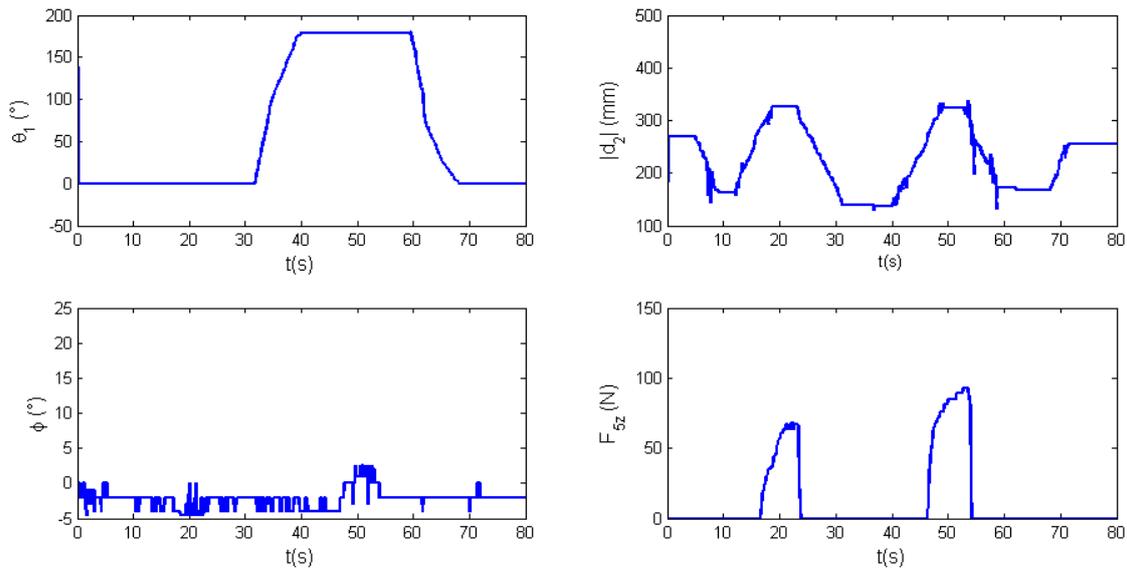
### 5.4.3 Pruebas experimentales

Por último, se realizó una prueba donde Lázaro ejecutó la estrategia diseñada para sobrepasar zanjas. La Figura 106 muestra la secuencia seguida por el robot para efectuar la estrategia donde la zanja se simuló utilizando una franja negra con un ancho de 120 mm. Se contabilizó el tiempo que duró el robot para efectuar la prueba, encontrando que éste ejecutó la estrategia en aproximadamente 75 s, comprobándose la capacidad del robot para ejecutarla.

Cabe resaltar que, durante la prueba, fueron adquiridas las medidas correspondientes a las variables  $\theta_1$ ,  $|d_2|$ ,  $\phi$  y  $F_{5z}$  (ver Figura 107) utilizando los sensores instalados en el robot. Esta información fue utilizada para obtener las fuerzas de reacción y, posteriormente, los índices de estabilidad y direccionamiento propios del ensayo, los cuales se muestran en la Figura 108.

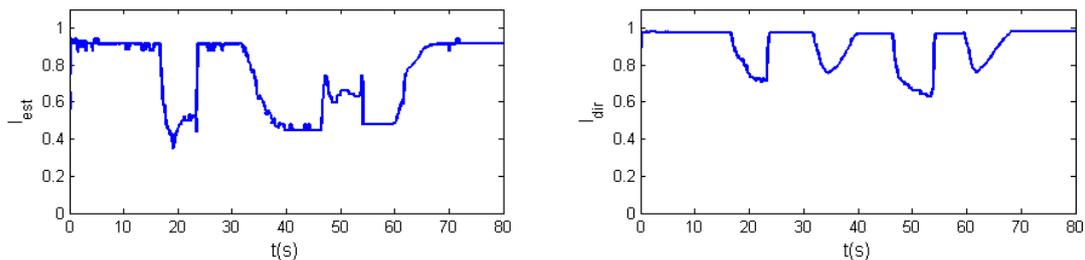


Figura 106. Secuencia seguida por Lázaro para sobrepasar una zanja.



**Figura 107.** Variables obtenidas por los sensores del robot ( $\theta_1$ ,  $|d_2|$ ,  $\phi$  y  $F_{5z}$ ) cuando éste sobrepasa una zanja.

Al comparar la Figura 105 con la Figura 108 se comprobó que, en forma, ambas gráficas son similares. Al detallar la comparación se observa que los valores mínimos tanto para el índice de estabilidad como para el índice de direccionamiento no coincidieron exactamente con los mostrados en la simulación, fundamentalmente por la diferencia existente en las medidas para la fuerza de contacto entre el efector final del brazo y el suelo ( $F_{5z}$ ).



**Figura 108.** Índices de estabilidad y direccionamiento obtenidos durante el paso sobre una zanja utilizando la estrategia especificada.

En el caso de la simulación, se presentan dos picos de carga durante la prueba (ver Figura 103): el primero con 76 N y el segundo con 111 N; mientras que en la prueba experimental el sensor arrojó para esos dos picos de carga valores de 68 N y 93 N, respectivamente (ver Figura 107). Adicionalmente, en la simulación estos picos son prácticamente constantes en un período de tiempo, mientras que, en la prueba, la

fuerza  $F_{5z}$  se va incrementando hasta alcanzar los picos mencionados. Esto trajo como consecuencia variaciones visibles en los índices de estabilidad y direccionamiento en los cortos períodos de tiempo donde el efector final del brazo tocara el suelo ( $F_{5z} > 0 N$ ) afectando la posición de los valores mínimos en los índices estudiados. A pesar de esta diferencia, el comportamiento de los índices medidos es similar entre la simulación y la prueba experimental. Por último, es importante destacar que con la obtención de los índices de navegabilidad se verificó la capacidad de Lázaró para efectuar esta estrategia permaneciendo en una condición estable sin riesgo de vuelco ni pérdida de direccionamiento.

## 5.5 Conclusiones

En este capítulo se desarrollaron un conjunto de estrategias diseñadas para que Lázaró pueda superar obstáculos tales como escalones, rampas de gran inclinación y zanjas. Todas las estrategias desarrolladas se fundamentan en el uso de su brazo como herramienta de apoyo para sobrepasar estos obstáculos de grandes dimensiones, que no podrían ser superados por este robot considerando solo la tracción de sus motores y el tamaño de sus ruedas. Al respecto, también se definieron las dimensiones máximas que podrán tener estos obstáculos para utilizar estas estrategias: en el caso de los escalones y rampas de gran inclinación (con ángulo de inclinación  $\beta \geq 43^\circ$ ), la altura máxima es  $140 mm$ ; y en el caso de las zanjas, su ancho máximo será  $150 mm$ .

Para cada estrategia diseñada, se estudiaron las etapas o conjunto de movimientos que debía efectuar el robot para ejecutar la maniobra exitosamente. Específicamente, se determinaron las fuerzas de reacción en cada instante para realizar posteriormente un análisis de navegabilidad. Dicho análisis se fundamentó en la obtención de los índices de estabilidad y direccionamiento de acuerdo a la metodología presentada en el Capítulo 4. No se estudió el índice de deslizamiento, puesto que las estrategias diseñadas se especificaron de manera que sus ruedas estén situadas en todo momento sobre una superficie horizontal, por lo cual se puede considerar que  $I_{desl} \approx 1.0$ .

Posteriormente, se hicieron simulaciones en el software *ADAMS* para obtener, de cada estrategia diseñada, las fuerzas de reacción y los índices de estabilidad y

direccionamiento. Una vez obtenidos, se compararon con los valores calculados utilizando las ecuaciones teóricas descritas en este capítulo. Al respecto se evidenció que las ecuaciones teóricas son confiables para predecir el comportamiento del robot respecto a la obtención de las fuerzas de reacción y los índices de navegabilidad. Adicionalmente, se comprobó a través de las simulaciones hechas para los obstáculos con las dimensiones máximas, que Lázaro puede sobrepasar dichos obstáculos sin volcarse o perder su capacidad de direccionamiento, puesto que los índices de estabilidad y direccionamiento obtenidos en las simulaciones nunca llegaron a valores críticos cercanos a 0.

Finalmente, se realizaron pruebas experimentales donde se comprobó en primer lugar, la capacidad real que posee el robot Lázaro para ejecutar las estrategias diseñadas y, en segundo lugar, se validaron los resultados de la simulación al compararlos con los resultados reales, ya que se encontró una gran similitud entre los índices de estabilidad y direccionamiento obtenidos en las simulaciones versus aquellos obtenidos en los experimentos, comprobándose de esta manera la fiabilidad de los modelos teóricos y simulaciones presentados.

## Capítulo 6

# CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

---

### 6.1 Conclusiones

El estudio de la navegabilidad de los robots móviles cuando se desplazan sobre terrenos irregulares es una línea de investigación muy extensa y presenta múltiples problemas pendientes de resolución. En esta tesis doctoral se ha abordado la evaluación de la navegabilidad de robots móviles sobre terrenos inclinados y cómo superar algunos obstáculos específicos.

En primer lugar, se completó una revisión donde se clasificaron los distintos robots móviles respecto a sus características físicas o estrategias operativas que les permiten navegar sobre terrenos irregulares buscando disminuir el riesgo al vuelco (el cual se evalúa a través de distintos criterios de estabilidad que también fueron descritos). Al respecto, se evidenció que estos robots móviles fueron diseñados para navegar exitosamente en algunos entornos específicos, pero existe todavía un largo trecho para lograr el diseño de robots móviles que puedan navegar de manera segura sobre cualquier entorno natural de manera autónoma y con la mínima posibilidad de inutilización por vuelco o deslizamiento.

Posteriormente se describió el diseño y desarrollo de Lázaro, el cual es un robot móvil con un brazo acoplado cuyo efector final consiste en una rueda que le permite al robot generar un punto de contacto adicional entre el brazo y el suelo. Dicho punto, si está bien posicionado, contribuye al mejoramiento de la estabilidad ante el vuelco; además, es útil para que Lázaro pueda implementar maniobras dirigidas a la superación de algunos obstáculos.

Al respecto, se hizo necesario definir un conjunto de métricas que pudiesen evaluar la navegabilidad del robot cuando éste se desplaza sobre superficies inclinadas. Para ello, se definieron tres índices (fundamentados en las fuerzas de reacción entre el robot y el suelo) dirigidos a evaluar la navegabilidad del robot: un índice de estabilidad que estima el riesgo al vuelco, un índice de direccionamiento que estima la pérdida de la capacidad de orientarse para seguir una trayectoria específica y, por último, un índice novel llamado índice de deslizamiento, el cual estima la propensión del robot a resbalar cuando se desplaza sobre una superficie inclinada. Estos tres índices fueron validados a través de simulación y pruebas experimentales, encontrándose que son altamente eficientes para evaluar, en conjunto, la navegabilidad de un robot móvil cuando se desplaza sobre superficies inclinadas.

Adicionalmente, se definió una nueva estrategia que puede utilizar un manipulador móvil para mejorar su estabilidad al vuelco. Ésta se fundamenta en dos diferentes acciones que puede ejecutar su brazo mientras el robot se desplaza sobre una superficie inclinada: propiciar el contacto entre efector final del brazo y el suelo para generar un punto de apoyo adicional (considerando una rueda como efector final), o realizar movimientos compensatorios con el brazo para reposicionar el centro de gravedad del robot sin contacto adicional. Se encontró que estas estrategias, en conjunto, disminuyen la posibilidad de vuelco, pero se evidenció que el uso del contacto del brazo con el suelo tiende a disminuir la capacidad de direccionamiento y aumentar la posibilidad de deslizamiento, por lo que su uso queda restringido a situaciones donde estos requerimientos no sean tan relevantes.

Finalmente, se desarrolló un grupo de maniobras que Lázaro puede ejecutar en conjunto con su brazo para superar algunos obstáculos específicos tales como escalones, rampas de gran inclinación y zanjas. Para cada maniobra se realizó un estudio para

evaluar la estabilidad y direccionamiento de acuerdo a los índices desarrollados previamente. Se encontró que este robot es capaz de superar estos obstáculos (con dimensiones máximas relacionadas con limitaciones físicas del robot) sin correr riesgo de inutilización por vuelco o pérdida en la capacidad de direccionamiento.

## 6.2 Publicaciones derivadas

Durante el desarrollo de esta tesis doctoral, se dirigieron un conjunto de trabajos especiales de grado (proyectos final de carrera); además, se presentaron artículos tanto en congresos nacionales e internacionales como en revistas científicas. A continuación se listan todas estas contribuciones.

### *Trabajos especiales de grado (Proyectos final de carrera):*

- C. Porras y J. Porras (2011). *Diseño y construcción de la estructura mecánica de un robot móvil con un brazo articulado*. Tutor: **J. García**. Universidad Nacional Experimental del Táchira, Venezuela.
- E. Sánchez (2014). *Diseño de una arquitectura de software para el robot móvil Lázaro*. Tutor: A. Gil. Corresponsable: **J. García**. Universidad Nacional Experimental del Táchira, Venezuela.
- W. Sánchez (2014). *Estimación de movimiento de un robot móvil usando el emparejamiento de puntos con un telémetro láser 2D*. Tutor: I. Medina. Corresponsable: **J. García**. Universidad Nacional Experimental del Táchira, Venezuela.

### *Congresos en Español:*

- J. Serón, A. García-Cerezo, J. L. Martínez, A. Mandow, **J. García** y J. Morales (2011). *Maniobras 3D en el robot ALACRANE: paso de un desnivel con apoyo del manipulador en el Suelo*. En Actas Robot 2011. Sevilla, pág. 80-84. ISBN: 978-84-615-6787-4.

- C. Porras, J. Porras, **J. García** y J. L. Martínez (2011). *Diseño de la estructura mecánica de un robot móvil con un brazo para el contacto con el suelo*. En Actas del V Congreso Internacional de Ingeniería Mecánica y III de Ingeniería Mecatrónica. Bogotá (Colombia), pág. 1-10. ISBN: 978-958-719-945-1.
- **J. García**, J. L. Martínez, A. Mandow, A. García-Cerezo y J. Serón (2012). *Diseño de un efector final hidráulico de doble función para el robot móvil Alacrane*. En Actas de las XXXIII Jornadas de Automática. Vigo, pág. 705-710. ISBN: 978-84-8158-583-4. Premio del Comité Español de Automática al mejor trabajo de Robótica de las Jornadas.
- **J. García** y J. L. Martínez (2012). *Desarrollo de un simulador en MATLAB para la enseñanza de la cinemática de robots móviles y manipuladores*. En Memoria Técnica del VII Congreso Bolivariano de Ingeniería Mecánica. Cusco (Perú), pág. 1-9. Disponible en: <http://congreso.pucp.edu.pe/vii-cobim/F.1.4.pdf>.
- **J. García** (2013). *Variación del índice de estabilidad en un robot móvil al utilizar un punto de apoyo adicional de posicionamiento variable*. En Actas del XI Congreso Iberoamericano de Ingeniería Mecánica, CIBIM, 2013. La Plata (Argentina), pág. 1-10. ISBN: 978-950-34-1025-7.
- W. Sánchez, I. Medina, **J. García** y A. Gil (2014). *Estimación de movimiento de un robot móvil usando el emparejamiento de puntos con un telémetro láser 2D*. En Actas de la II Conferencia nacional de computación, informática y sistemas. Caracas (Venezuela), pág. 165-171. ISBN: 978-980-7683-00-5.

#### *Congresos en Inglés:*

- J. Serón, J. L. Martínez, A. Mandow, A. García-Cerezo, J. Morales, A. Reina y **J. García** (2012). *Terrace climbing of the Alacrane mobile robot with cooperation of its onboard arm*. En Proc. of the IEEE International Workshop on Advanced Motion Control. Sarajevo (Bosnia y Herzegovina), pág. 1-6. ISBN: 978-1-4577-1073-5.
- **J. García**, J. L. Martínez, A. Mandow y A. García-Cerezo (2015). *Steerability analysis on slopes of a mobile robot with a ground contact arm*. En 23rd

Mediterranean Conference on Control and Automation. Torremolinos, pág. 267-272.  
ISBN: 978-1-4799-9935-4.

*Revistas científicas:*

- **J. García**, J. L. Martínez y A. García-Cerezo (2011). *Modelado del efector del robot Alacrane para el contacto con el suelo*. Revista Científica UNET. Vol. 23(2), pág. 88-100. ISSN: 1316-869X11C (Venezuela).
- **J. García**, I. Medina, A. García-Cerezo y A. Linares (2015). *Improving the static stability of a mobile manipulator using its final effector in contact with the ground*. Enviado a IEEE Latin American Transactions.

### 6.3 Trabajos futuros

La investigación desarrollada en esta tesis puede diversificarse en varias direcciones, algunas de las cuales se listan brevemente a continuación:

- Implementar completamente la arquitectura diseñada para el robot Lázaro, la cual incluye la incorporación de un telémetro láser 3D que permitiría detectar, clasificar y dimensionar los diferentes tipos de obstáculos que el robot pudiera encontrarse a medida que se desplaza sobre un entorno natural.
- Definir la ubicación exacta de los puntos de contacto del robot con el suelo cuando éste se desplace sobre un terreno altamente irregular, ya que, en estos casos, se pueden generar puntos de contacto lejos de su posición teórica. Junto con ello, se puede mejorar la formulación del índice de deslizamiento para incluir la posición real de los puntos de contacto y el efecto sobre la localización instantánea de las fuerzas de reacción y fricción.
- Desarrollar maniobras dirigidas a superar obstáculos irregulares de manera segura en entornos naturales donde obstáculos regulares tales como escalones, no son los más abundantes. Por ello, se deben desarrollar estrategias que permitan, en tiempo real, generar movimientos adecuados para que el robot pueda sobrepasarlos.

- Desarrollar estrategias para mejorar la navegabilidad de los robots móviles que incluyan el gasto energético, pues se espera que este tipo de robots puedan desplazarse sobre entornos naturales con un alto grado de autonomía y durante largos períodos de tiempo. Por tanto, se puede considerar el desarrollo de estrategias que permitan mejorar la navegabilidad mientras se ahorra la mayor cantidad de energía, que en el caso de los robots móviles, siempre es limitada.
- Estudiar el efecto que produce el uso de remolques pasivos sobre los índices de navegabilidad del robot. Una de las alternativas en robots móviles para aumentar su autonomía energética es el uso de remolques para el transporte de fuentes de energía adicionales. Este elemento afecta la posibilidad de vuelco, la capacidad de direccionarse y la propensión a deslizarse. Por ello, se puede mejorar la formulación de los índices de navegabilidad del robot para incluir esta circunstancia.

# APÉNDICE A. NUEVA INTERFAZ DE USUARIO DE LÁZARO

---

## A.1 Introducción

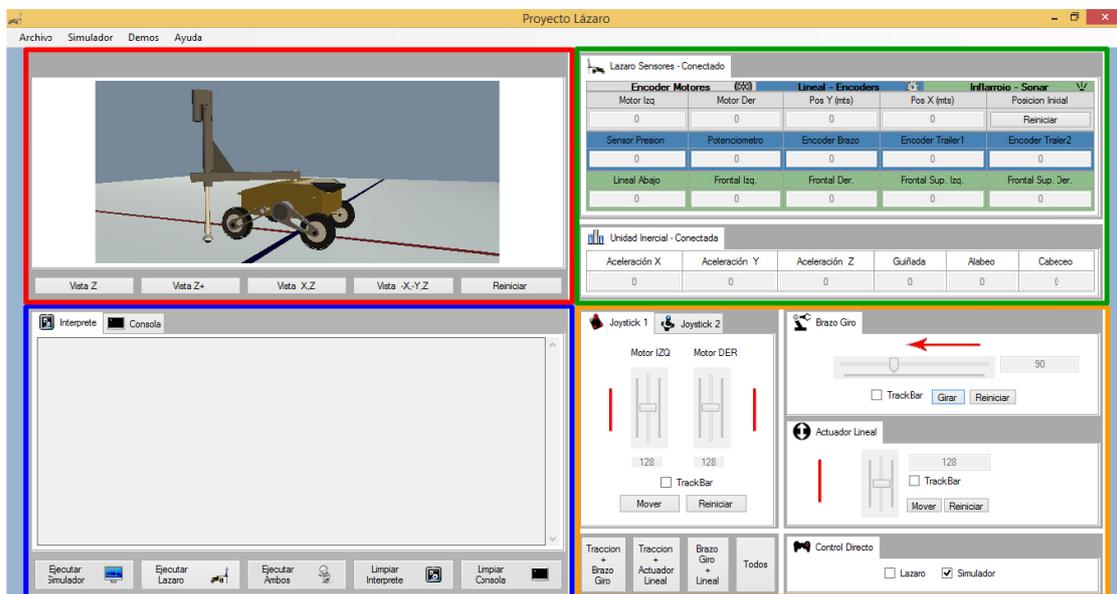
A continuación se describe una nueva interfaz de usuario desarrollada bajo el entorno *Windows* para Lázaro. Ésta se realizó con el propósito de brindar una mejor experiencia al usuario en su interacción con el robot, ya que la interfaz construida previamente en *Simulink* (ver Apartado 3.7) resulta menos amigable por las propias características de este entorno.

## A.2 Ventana principal

La nueva interfaz consta de una ventana principal (ver Figura 109), la cual se subdivide en cuatro componentes principales que se describen a continuación:

- Panel Simulador 3D (recuadro rojo en la Figura 109): Tiene como propósito mostrar, a través de un modelo 3D, los posibles movimientos, comportamientos y estrategias que ejecutará Lázaro siguiendo un conjunto de instrucciones. Este componente se diseñó utilizando el motor gráfico *Xna* de *Windows*. Cabe destacar que, actualmente, se puede visualizar el modelo 3D del robot Lázaro sobre un plano horizontal utilizando varias vistas ortogonales y una isométrica.
- Panel sensorial (recuadro verde en la Figura 109): En este panel se pueden leer las mediciones obtenidas por todos los sensores del robot en tiempo real. Este panel incluye: codificadores de los motores, potenciómetros, sónares y mediciones de la IMU. Adicionalmente, se incluye la ubicación del robot en tiempo real (sobre un plano horizontal) a partir de cálculos odométricos utilizando como origen del sistema de referencia inercial, el primer punto registrado cuando el robot ejecuta algún programa o rutina.

- Panel intérprete – consola (recuadro azul en la Figura 109): Este panel posee dos *tabpages* superpuestas (intérprete y consola). El *tabpage* Intérprete permite al programador codificar todas las instrucciones, comportamientos, estrategias y tareas que el robot ejecutará de manera secuencial o a través de un multiproceso utilizando el lenguaje de programación C# y un conjunto de librerías desarrolladas para tal fin. El *tabpage* Consola permite al usuario comprobar el estado en el que se encuentra cualquier método o instrucción durante la ejecución de algún programa por parte del robot.
- Panel de control directo (recuadro naranja en la Figura 109): Este panel permite la teleoperación tanto del robot como del modelo mostrado en el panel simulador 3D. La teleoperación se realiza a través de *trackbars* diseñadas para cada actuador. El movimiento del actuador se activa al desplazar el *trackbar* desde la posición central hacia sus extremos. Para activar la teleoperación del robot, del modelo 3D o ambos, se debe seleccionar en el subpanel *Control directo*, cuál de estos elementos será teleoperado.



**Figura 109. Interfaz de usuario del robot Lázaro desarrollada en Windows.**

# APÉNDICE B. MODELADO DE LÁZARO EN *ADAMS*

---

## B.1 Introducción

*ADAMS* es un software desarrollado para realizar análisis dinámicos de sistemas mecánicos. Esta herramienta fue utilizada para simular a Lázaro ejecutando las estrategias diseñadas, ya sea para navegar sobre superficies inclinadas o para sobrepasar obstáculos. A continuación se describe el proceso seguido para modelar el robot en este entorno.

## B.2 Fases de modelado

En primer lugar, se desarrolló el modelo 3D de Lázaro con el software *Solid Edge V.20* tratando de modelar la mayoría de componentes, de manera tal que las propiedades dimensionales y de masa en el modelo fuesen muy parecidas al robot real. Este modelo fue exportado al entorno *ADAMS* (ver Figura 110). Cabe destacar, que *ADAMS* también posee herramientas de modelado 3D, pero no se utilizaron puesto que no son tan especializadas como en un programa CAD, por lo que sería difícil modelar a Lázaro con un grado de exactitud aceptable en este entorno. Adicionalmente, se exportó al entorno *ADAMS* una superficie virtual de pruebas (ver Apartado 4.6). Luego, se desarrollaron una serie de procedimientos que se listan a continuación:

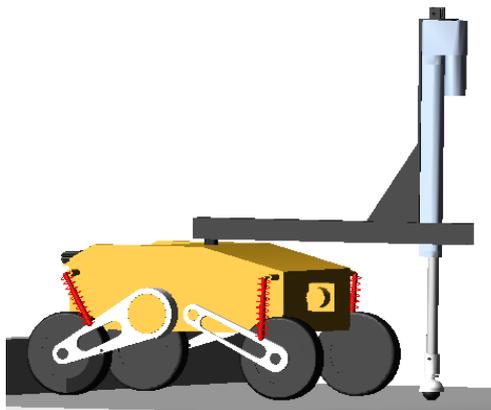
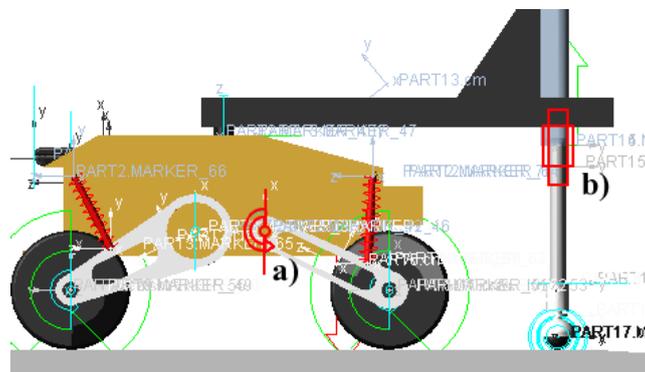


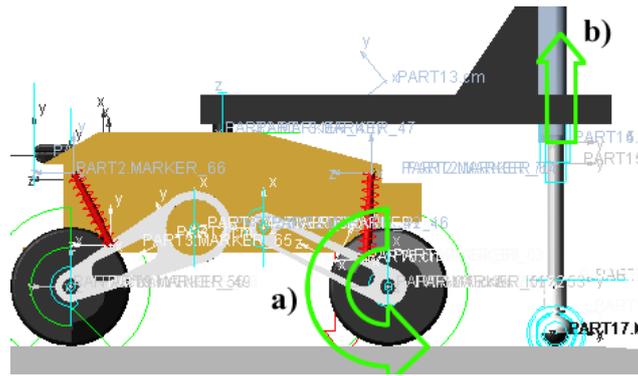
Figura 110. Modelo 3D de Lázaro en el entorno *ADAMS*.

1. **Asignación de propiedades físicas:** Para cada pieza que forma parte del modelo 3D de Lázaro, se fijaron sus propiedades físicas asignando un material desde un listado que posee el programa o fijando directamente sus propiedades tales como densidad. Posteriormente, *ADAMS* es capaz de calcular directamente la masa y tensores de inercia, entre otras propiedades físicas. En el caso de la superficie virtual de pruebas, ésta debe ser declarada como perteneciente al suelo. De esta manera, no adquiere propiedades físicas y no se toma en consideración para calcular parámetros como la masa total del modelo o el centro de gravedad.
2. **Modelado de las articulaciones:** Cuando el modelo 3D de cualquier mecanismo es llevado al entorno *ADAMS*, éste se visualiza ensamblado pero sus piezas no están conectadas entre sí. Por ello, hay que construir las articulaciones entre las piezas que forman el modelo. En el caso de Lázaro, se utilizaron específicamente conexiones rígidas (entre piezas que no se mueven entre sí), articulaciones rotacionales (por ejemplo para la primera articulación del brazo) y cilíndricas (en la segunda articulación del brazo, ver Figura 111).



**Figura 111. Modelo 3D de Lázaro resaltando en color rojo: a) una articulación rotacional y b) una articulación cilíndrica.**

3. **Modelado de actuadores:** Posterior a la creación de las articulaciones, se procedió a la incorporación de actuadores en aquellas articulaciones donde se requieren. Así, se crearon actuadores rotacionales en las articulaciones correspondientes a las ruedas del robot y en la primera articulación del brazo. Adicionalmente, se creó un actuador de traslación sobre la segunda articulación del brazo (ver Figura 112).



**Figura 112. Modelo 3D de LázarO resaltando en color verde: a) un actuador rotacional y b) un actuador de traslación.**

4. **Modelado del sistema de suspensión:** Para cada rueda se modeló un sistema de suspensión conformado por una dupla resorte – amortiguador (ver resortes de color rojo en la Figura 112). Luego, en cada sistema, se asignaron variables como constante de rigidez del resorte, constante de amortiguamiento del amortiguador y longitud natural del resorte.
5. **Modelado de contactos:** Por defecto, el entorno *ADAMS* no considera que las piezas presentes en el modelo se tocan entre sí. Por lo que, si se desea considerar el contacto entre dos piezas, se debe especificar al programa. Para LázarO se requirió modelar cinco relaciones correspondientes al contacto entre las cinco ruedas del robot con el suelo. En el modelado de estas relaciones se requiere indicar al programa los coeficientes de fricción (estático y dinámico) entre las dos superficies que se tocan, además de algunos coeficientes adicionales tales como rigidez del contacto, amortiguamiento y profundidad de penetración (como regla general se encontró que mientras más pequeños sean estos coeficientes, menos vibraciones se producen en las zonas de contacto, lo cual es característica del contacto con ruedas de caucho).
6. **Declaración de variables de control:** Estas variables se utilizan para desarrollar el sistema de control. *ADAMS* puede conectarse con el entorno *Simulink* para realizar simulaciones en conjunto, donde *ADAMS* aporta los cálculos referentes a la cinemática y dinámica del modelo mientras *Simulink* permite desarrollar e implementar un sistema de control. Para ello, se deben definir variables que servirán como entradas y salidas del modelo en *ADAMS*. En el caso de LázarO,

se definieron como variables de salida los ángulos *roll*, *pitch* y  $\theta_1$ ,  $d_2$ ,  $d_{inf}$  y  $F_{5z}$ . Todas estas variables las obtiene *ADAMS* durante la simulación. Como variables de entrada al modelo se definieron las velocidades angulares de las ruedas (derecha e izquierda), par en la primera articulación del brazo y fuerza ejercida por el actuador lineal en la segunda articulación del brazo. Estas variables se asignan a los actuadores correspondientes dentro del modelo. Las variables de entrada se obtienen en el entorno *Simulink* durante la simulación al implementar el sistema de control.

7. **Implementación del sistema de control:** Este sistema se desarrolla en el entorno *Simulink*, pero se debe exportar previamente la planta desde *ADAMS*, la cual contiene todas las variables de entrada y salida del sistema. Cabe destacar que las variables de salida en *ADAMS* se visualizarán como variables de entrada en *Simulink* y viceversa. Al exportarse la planta desde *ADAMS*, ésta se abre en *Simulink* y aparecerán todas las variables expresadas como entradas y salidas, sin ninguna conexión y disponibles para desarrollar el sistema de control. Una vez implementado este sistema por el programador (ver Figura 113), se exporta nuevamente a *ADAMS*, quedando el modelo listo para la simulación.

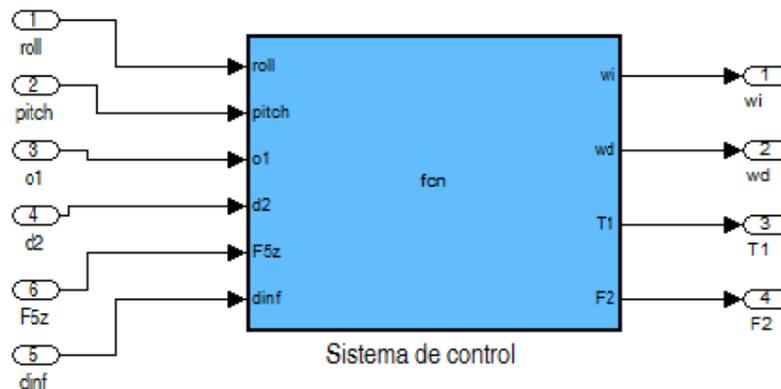
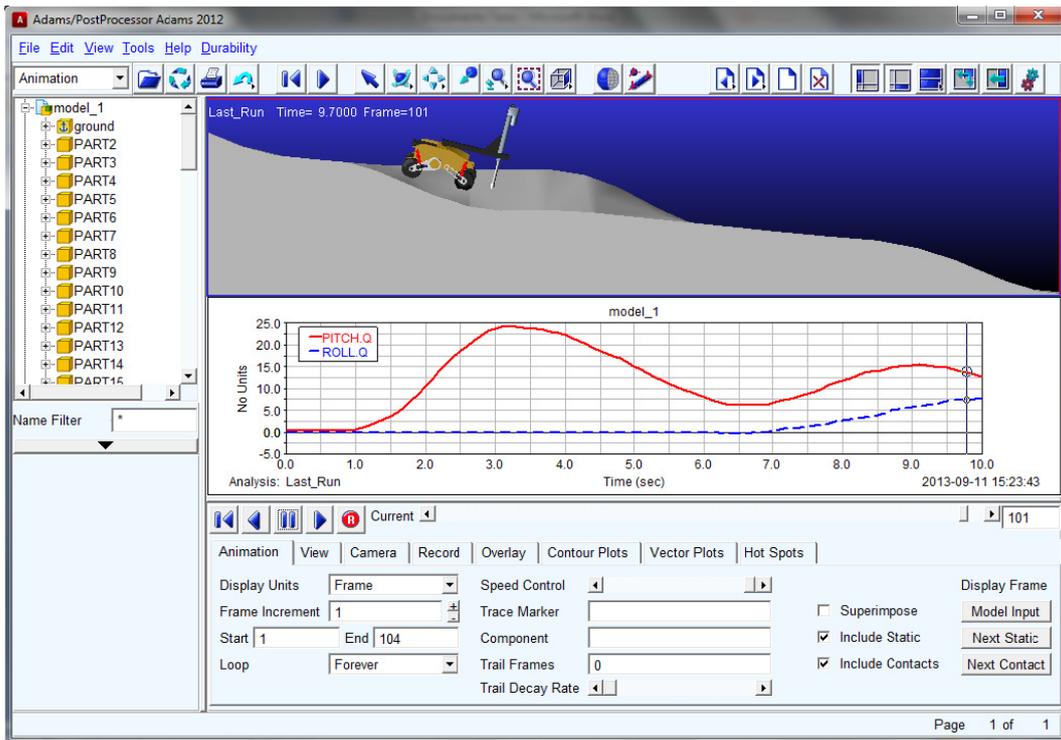


Figura 113. Sistema de control desarrollado en *Simulink* para ser implementado en el entorno *ADAMS* durante una simulación.

8. **Simulación y visualización de resultados:** A continuación se ejecuta la simulación para un tiempo prefijado por el usuario. El software irá registrando durante la simulación, todas las variables definidas por el usuario más otras medidas obtenidas a partir de las ecuaciones cinemáticas y dinámicas que

definen el modelo (por ejemplo velocidades, aceleraciones, fuerzas de contacto, fuerzas de fricción, entre otras). Todas estas variables y medidas pueden ser visualizadas posteriormente en el entorno *ADAMS/PostProcessor* a través de gráficas y animaciones (ver Figura 114) o simplemente exportando la información para ser analizada en otro programa.



**Figura 114. Entorno *ADAMS/PostProcessor*.**



# ACRÓNIMOS

---

ADAMS	Análisis dinámico automatizado de sistemas mecánicos (del Inglés: <i>Automated dynamic analysis of mechanical systems</i> ).
CAD	Diseño asistido por computador (del Inglés: <i>Computer aided design</i> ).
COG	Centro de gravedad (del Inglés: <i>Center of gravity</i> ).
DC	Corriente continua (del Inglés: <i>Direct current</i> ).
D-H	Nomenclatura de Denavit-Hartenberg para la cinemática de brazo.
ECM	Error cuadrático medio.
ESM	Margen de estabilidad energética (del Inglés: <i>Energy stability margin</i> ).
FASM	Margen de estabilidad fuerza – ángulo (del Inglés: <i>Force–angle stability margin</i> ).
GDL	Grado de libertad.
IMU	Unidad de medición inercial (del Inglés: <i>Inertial measurement unit</i> ).
LMA	Mecanismo de acoplamiento actuador (del Inglés: <i>Linkage mechanism actuator</i> ).
LSM	Margen de estabilidad longitudinal (del Inglés: <i>Longitudinal stability margin</i> ).
MHS	Medida de estabilidad momento - altura (del Inglés: <i>Moment-height stability measure</i> ).
NASA	Administración Nacional de la Aeronáutica y del Espacio (del Inglés: <i>National Aeronautics and Space Administration</i> ).
PC	Computadora personal (del Inglés: <i>Personal computer</i> ).
PWM	Modulación por ancho de pulsos (del Inglés, <i>Pulse-width modulation</i> ).
SLAM	Localización y construcción de mapas simultánea (del Inglés: <i>Simultaneous localization and mapping</i> ).
SSM	Margen de estabilidad estática (del Inglés: <i>Static stability margin</i> ).
ZETUF	Fuerza nula de reacción del neumático (del Inglés: <i>Zero tire upward force</i> ).
ZMP	Punto de momento cero (del Inglés: <i>Zero moment point</i> ).
2D	Bidimensional.
3D	Tridimensional.



# NOMENCLATURA

---

$a_z$	Ancho de una zanja ( $mm$ ).
$a_1$	Distancia entre los ejes de coordenadas $Z_0$ y $Z_1$ (del brazo) ubicados siguiendo la nomenclatura D-H. Alcance horizontal del brazo ( $mm$ ).
$B$	Constante de amortiguamiento de cada amortiguador instalado en el robot Lázaro ( $N.s/mm$ ).
$B_b$	Coefficiente de fricción viscosa en los cojinetes de apoyo en la primera articulación del brazo ( $N.s.mm$ ).
$B_m$	Coefficiente de fricción viscosa en los engranajes y escobillas del motor ( $N.s.mm$ ).
$d_{inf}$	Distancia medida desde el sensor infrarrojo hasta el suelo ( $mm$ ).
$d_g$	Diámetro de la corona perteneciente al sistema sinfin – corona ubicado en la primera articulación del brazo ( $mm$ ).
$d_w$	Diámetro del tornillo perteneciente al sistema sinfin – corona ubicado en la primera articulación del brazo ( $mm$ ).
$d_2$	Desplazamiento de la segunda articulación del brazo medido a través del potenciómetro instalado en el actuador lineal del brazo ( $mm$ ).
$d_{2i}$	Valor de $d_2$ cuando el efector final del brazo toca el suelo sin que exista compresión alguna en el sistema de amortiguamiento del robot ( $d_{2i}=282.5 mm$ ).
$e_d$	Diferencia entre las mediciones en $mm$ obtenidas del sensor infrarrojo ( $d_{inf}$ ) y el potenciómetro en la segunda articulación del brazo ( $d_2$ ).
$e_f$	Error entre la fuerza de contacto requerida ( $F_{5z sp}$ ) y la fuerza de contacto medida ( $F_{5z}$ ) en el efector final del brazo ( $N$ ).
$f$	Coefficiente de fricción en el acoplamiento sinfin – corona ubicado en la primera articulación del brazo.
$F_{nm}$	Sumatoria de dos fuerzas de reacción normal ( $F_{nm} = F_{nz} + F_{mz}$ ; fuerza paralela al eje $Z_c$ correspondiente al sistema $X_c Y_c Z_c$ ).
$F_{nm}^M$	Sumatoria de dos fuerzas de reacción normal ( $F_{nm}^M = F_{nz}^M + F_{mz}^M$ ; fuerza paralela al eje $Z_M$ correspondiente al sistema $X_M Y_M Z_M$ ).
$F_{nr}$	Fuerza de fricción medida en un punto de contacto del robot con el suelo ( $N$ ).
$F_{5r}$	Fuerza de fricción medida en el punto de contacto del efector final del brazo con el suelo ( $N$ ).
$F_{nz}$	Fuerza de reacción normal ( $N$ ) medida en un punto de contacto del robot con el suelo (fuerza paralela al eje $Z_c$ correspondiente al sistema $X_c Y_c Z_c$ ).
$F_{nz}^M$	Fuerza de reacción normal ( $N$ ) medida en un punto de contacto del robot con el suelo (fuerza paralela al eje $Z_M$ correspondiente al sistema $X_M Y_M Z_M$ ).
$F_{5z}$	Fuerza de contacto entre el efector final del brazo y el suelo ( $N$ ), medida a través del sensor de presión (fuerza paralela al eje $Z_c$ correspondiente al sistema $X_c Y_c Z_c$ ).

$F_{5z}^M$	Fuerza de contacto entre el efector final del brazo y el suelo ( $N$ ); Fuerza paralela al eje $Z_M$ correspondiente al sistema $X_M Y_M Z_M$ .
$F_{5z\ eq}$	Fuerza de contacto entre el efector final del brazo y el suelo en el instante cuando dos ruedas consecutivas pierden contacto con el suelo quedando el robot apoyado sobre tres puntos ( $N$ ); Fuerza paralela al eje $Z_c$ correspondiente al sistema $X_c Y_c Z_c$ .
$F_{5z\ opt}$	Fuerza de contacto entre el efector final del brazo y el suelo optimizada para lograr la maximización del índice de estabilidad ( $N$ ).
$F_{5z\ sp}$	Fuerza de contacto requerida entre el efector final del brazo y el suelo ( $N$ ).
$h$	Altura del escalón o rampa de gran inclinación ( $mm$ ).
$h_z$	Profundidad de una zanja ( $mm$ ).
$I_b$	Momento de inercia en el brazo ( $Kg/mm^2$ ).
$I_{desl}$	Índice de deslizamiento.
$I_{dir}$	Índice de direccionamiento.
$I_{est}$	Índice de estabilidad.
$I_m$	Momento de inercia en el rotor del motor ( $Kg/mm^2$ ).
$K$	Constante de rigidez de cada resorte en el sistema de amortiguamiento ( $N/mm$ ).
$K_b$	Constante de la fuerza contra electromotriz de un motor eléctrico ( $V \cdot s/rad$ ).
$K_m$	Constante mecánica de un motor eléctrico ( $N \cdot mm \cdot \Omega/V$ ).
$K_p$	Constante de proporcionalidad en un sistema de control.
$K_w$	Constante que relaciona los parámetros dimensionales y de operación en el sistema tornillo sinfín – corona ubicado en la primera articulación del brazo.
$l_1$	Distancia entre los ejes de coordenadas $X_0$ y $X_1$ (del brazo) ubicados siguiendo la nomenclatura D-H ( $mm$ ).
$N_g$	Cantidad de dientes de la corona perteneciente al sistema sinfín – corona ubicado en la primera articulación del brazo.
$N_w$	Cantidad de dientes del tornillo perteneciente al sistema sinfín – corona ubicado en la primera articulación del brazo.
$R$	Resistencia eléctrica del rotor de un motor eléctrico ( $\Omega$ ).
$r_b$	Distancia desde el eje de rotación de la primera articulación del brazo hasta el centro de gravedad considerando solo el brazo ( $mm$ ).
$R_r$	Radio de las ruedas del robot Lázaro ( $mm$ ).
$S_h$	Distancia de separación horizontal entre el robot y una rampa, medida desde el centro de la rueda frontal del robot hasta el vértice inferior de la rampa ( $mm$ ).
$V$	Tensión de alimentación a un motor eléctrico ( $V$ ).
$W$	Peso del robot Lázaro ( $N$ ).
$W_b$	Peso del brazo perteneciente al robot Lázaro ( $N$ ).
$W_{mp}$	Proyección del vector peso perteneciente al robot Lázaro en el plano $X_c Y_c$ ( $N$ ).
$(W_x, W_y, W_z)$	Proyecciones del vector peso del robot Lázaro respecto al sistema de referencia

	$X_c Y_c Z_c$ (N).
$({}^j x_i, {}^j y_i, {}^j z_i)$	Posición de un sistema de referencia $i$ , respecto a un sistema de referencia $j$ (mm).
$(x_n, y_n, z_n)$	Posición de un punto de contacto $n$ respecto al sistema de referencia $X_c Y_c Z_c$ (mm).
$(x_{cog}, y_{cog}, z_{cog})$	Posición del COG del robot Lázaro en coordenadas cartesianas respecto al sistema de referencia $X_c Y_c Z_c$ (mm).
$X_c Y_c Z_c$	Sistema de referencia local en Lázaro.
$X_i Y_i Z_i$	Para $i=1,2$ ; corresponde a sistemas de referencia ubicados en las articulaciones del brazo de acuerdo a la nomenclatura D-H.
$X_M Y_M Z_M$	Sistema de referencia mundo o sistema fijo cuyo plano $X_M Y_M$ es paralelo al plano horizontal.
$X_0 Y_0 Z_0$	Sistema de referencia en la base del brazo.
$\alpha$	Ángulo <i>roll</i> (°).
$\beta$	Ángulo de inclinación de una rampa respecto a la horizontal (°).
$\beta_{min}$	Ángulo de inclinación mínimo de una rampa respecto a la horizontal que garantiza el uso de la estrategia diseñada para el descenso de rampas (°).
$\eta$	Relación de transmisión en un tren de engranajes.
$\theta_1$	Ángulo de rotación de la primera articulación del brazo (°).
$\theta_{1\,cmp}$	Ángulo de rotación de la primera articulación del brazo ubicado en dirección contraria a la máxima pendiente del terreno (°).
$\theta_{1\,mp}$	Ángulo de rotación de la primera articulación del brazo ubicado en dirección a la máxima pendiente del terreno (°).
$\theta_{1\,opt}$	Ángulo de rotación de la primera articulación del brazo optimizado para lograr la maximización del índice de estabilidad (°).
$\theta_{1\,sp}$	Ángulo de rotación requerido en la primera articulación del brazo (°).
$\lambda$	Ángulo de avance del tornillo sinfín ubicado en la primera articulación del brazo (°).
$\mu_s$	Coefficiente de fricción estático.
$\mu_r$	Coefficiente de fricción por rodadura en el efector final del brazo.
$\sigma$	Desviación típica.
$\tau_b$	Par requerido para mover el brazo de Lázaro (N.mm)
$\tau_c$	Constante de fricción seca (N.mm)
$\tau_{est}$	Par generado por la fricción estática en la primera articulación del brazo (N.mm).
$\tau_{fc}$	Par generado por la fricción seca o fricción de Coulomb en la primera articulación del brazo (N.mm).
$\tau_m$	Par generado el motor de la primera articulación del brazo (N.mm).
$\tau_p$	Par perturbador sobre primera articulación del brazo (N.mm). Incluye el efecto de la gravedad sumado a los torques debidos a diferentes tipos de fricción.
$\tau_r$	Par generado por la fricción producida en el punto de contacto entre el efector final del brazo (rueda) y el suelo (N.mm).

$\Phi$	Ángulo de inclinación exhibido por el robot cuando sobrepasa un obstáculo ( $^{\circ}$ ). Es equivalente a $ \phi $ .
$\phi$	Ángulo <i>pitch</i> ( $^{\circ}$ ).
$\phi_{lim}$	Ángulo <i>pitch</i> que puede soportar el contacto entre el robot (estando en una posición estática) y el suelo antes de que se inicie el deslizamiento (si $\alpha = 0^{\circ}$ ).
$\phi_n$	Ángulo de presión normal en el tornillo sinfín ubicado en la primera articulación del brazo ( $^{\circ}$ ).
$\omega_m$	Velocidad angular del motor eléctrico ubicado en la primera articulación del brazo ( <i>rad/s</i> ).

# REFERENCIAS

---

- [1] M. Bakari, K. Zied, y D. Seward, "Development of a multi-arm mobile robot for nuclear decommissioning tasks," *International Journal of Advanced Robotic Systems*, vol. 4, no. 4, pág. 387-406, 2007.
- [2] J. Casper y R. Murphy, "Human – robot interactions during the robot-assisted urban search and rescue response at the World Trade Center," *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, vol. 33, no. 3, pág. 367-385, 2003.
- [3] B. Bishop, F. Crabbe, y B. Hudock, "Design of a low-cost, highly mobile urban search and rescue robot," *Advanced Robot*, vol. 19, no. 8, pág. 879-899, 2005.
- [4] J. Carlson y R. Murphy, "How UGVs physically fail in the field," *IEEE Transactions on Robotics*, vol. 21, no. 3, pág. 423-437, 2005.
- [5] J. Mehling, P. Strawser, L. Bridgwater, W. Verdeyen, y R. Rovekamp, "Centaur: NASA 's mobile humanoid designed for field work," en *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Rome, 2007, pág. 2928-2933.
- [6] R. Lindemann, D. Bickler, B. Harrington, G. Ortiz, y C. Voorhees, "Mars exploration rover mobility development," *IEEE Robotics & Automation Magazine*, vol. 13, no. 2, pág. 19-26, 2006.
- [7] M. Guarnieri, P. Debenest, P. Inoh, E. Fukushima, y S. Hirose, "Development of Helios VII: an arm-equipped tracked vehicle for search and rescue operations," en *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, Sandai, 2004, pág. 39-45.
- [8] M. Guarnieri, R. Kurazume, H. Masuda, T. Inoh, K. Takita, P. Debenest, R. Hodoshima, E. Fukushima, y S. Hirose, "Helios system: a team of tracked robots for special urban search and rescue operations," en *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, St. Louis, 2009, pág. 2795-2800.
- [9] A. García-Cerezo, A. Mandow, J. L. Martínez, J. Gómez-de-Gabriel, J. Morales, A. Cruz, A. Reina, y J. Serón, "Development of Alacrane: a mobile robotic assistance for exploration and rescue missions," en *IEEE International Workshop on Safety, Security and Rescue Robotics*, Rome, 2007, pág. 1-6.
- [10] F. Matsuno y S. Tadokoro, "Rescue robots and systems in Japan," en *IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics*, Shenyang, 2004, pág. 12-20.

- [11] S. Kang, W. Lee, M. Kim, y K. Shin, "Robhaz-rescue: Rough-terrain negotiable teleoperated mobile robot for rescue mission," en *IEEE International Workshop on Safety, Security and Rescue Robotics*, Kobe, 2005, pág. 105-110.
- [12] S. Moosavian, H. Semsarilar, y A. Kalantari, "Design and manufacturing of a mobile rescue robot," en *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, Beijing, 2006, pág. 3982-3987.
- [13] R. Siegwart y I. Nourbakhsh, *Introduction to autonomous mobile robots*, 1st ed. Cambridge, E.E.U.U.: The MIT Press, 2004.
- [14] K. Tani, N. Shirai, y H. Katoh, "Active suspension four-wheel model for a terrain robot," en *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, Tsukuba, 1989, pág. 408-413.
- [15] S. Hirose, T. Senu, y S. Aoki, "The Taqt Carrier: A Practical terrain- adaptive quadrack carrier robot," en *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, Raleigh, 1992, pág. 2068-2073.
- [16] M. Guihard, P. Gorce, y J. Fontaine, "Sapphyr: Legs to pull a wheel structure," en *IEEE International Conference on Systems, man and cybernetics*, Vancouver, 1995, pág. 1303-1308.
- [17] T. Mabuchi, T. Nagasawa, K. Awa, J. Shiraki, y T. Yamada, "Development of a stair-climbing mobile robot with legs and wheels," *Artificial Life and Robotics*, vol. 2, no. 4, pág. 184-188, 1998.
- [18] S. Ylönen y A. Halme, "WorkPartner - Centaur like service robot," en *IEEE/ASME International Conference on Intelligent Robots and Systems*, Lausanne, 2002, pág. 727-732.
- [19] V. Eathakota, A. Singh, S. Kolachalam, y K. Krishna, "Determination of optimally stable posture for force actuator based articulated suspension for rough terrain mobility," en *Trends in Intelligent Robotics*. Berlín, Alemania: Springer Berlin Heidelberg, 2010, pág. 154-161.
- [20] K. Iagnemma, A. Rzepniewski, S. Dubowsky, y P. Schenker, "Control of robotic vehicles with actively articulated suspensions in rough terrain," *Autonomous Robots*, vol. 14, no. 1, pág. 5-16, January 2003.
- [21] J. Shang, Z. Luo, D. Fan, y F. Zhao, "A six wheeled robot with active self-adaptive suspension for lunar exploration," en *International Technology and Innovation Conference*, Hangzhou, 2006, pág. 2035-2038.
- [22] A. Singh, V. Eathakota, K. Krishna, y A. Patil, "Evolution of a four wheeled active suspension rover with minimal actuation for rough terrain mobility," en *IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics*, Guilin, 2009, pág. 794-799.

- [23] B. Bluethmann, E. Herrera, A. Hulse, J. Figuered, L. Junkin, M. Markee, y R. Ambrose, "An active suspension system for lunar crew mobility," en *IEEE Aerospace Conference*, Big Sky, 2010, pág. 1-9.
- [24] J. Ma, J. Cheng, y D. Zuang, "Analysis of Sojourner's six-wheeled rocker suspension appended with driving moment," en *International Conference on Information Engineering and Computer Science*, Wuhan, 2009, pág. 1-4.
- [25] B. Chen, R. Wang, L. Yang, L. Jin, y L. Guo, "Design and simulation research on a new type of suspension for lunar rover," en *IEEE International Symposium on Computational Intelligence in Robotics and Automation*, Jacksonville, 2007, pág. 173-177.
- [26] J. Suthakorn, S. Shah, S. Jantarajit, W. Onprasert, W. Saensupo, S. Saeung, S. Nakdhamabhorn, y S. Reaungamornrat, "On the design and development of a rough terrain robot for rescue missions," en *IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics*, Bangkok, 2009, pág. 1830-1835.
- [27] W. Wang, Z. Du, y L. Sun, "Kinematics analysis for obstacle-climbing performance of a rescue robot," en *IEEE International Conference on Robotics and biomimetics*, Sanya, 2008, pág. 1612-1617.
- [28] F. Cordes, A. Dettmann, y F. Kirchner, "Locomotion modes for a hybrid wheeled-leg planetary rover," en *IEEE international conference on robotics and biomimetics*, Phuket, 2011, pág. 2586-2592.
- [29] M. Lauria, Y. Piguet, y R. Siegwart. (2015, Abril) Autonomous Systems Lab. [Online]. <http://www.asl.ethz.ch/robots/octopus>.
- [30] F. Michaud, D. Letoumeau, M. Arsenault, Y. Bergeron, y R. Cadrin, "Azimut , a leg-track-wheel robot," en *IEEE/RSJ Conference on intelligent Robots and Systems*, Las Vegas, 2003, pág. 2553-2558.
- [31] X. Duan, Q. Huang, N. Rahman, J. Li, y Q. Du, "Kinematic modeling of a small mobile robot with multi-locomotion modes," en *IEEE/ASME International Conference on Intelligent Robots and Systems*, Beijing, 2006, pág. 5582-5587.
- [32] P. Ben-Tzvi, S. Ito, y A. Goldenberg, "A mobile robot with autonomous climbing and descending of stairs," *Robotica*, vol. 27, no. 2, pág. 171-188, 2009.
- [33] Y. Liu y G. Liu, "Track – stair interaction analysis and online tipover prediction for a self-reconfigurable tracked mobile," *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, vol. 14, no. 5, pág. 528-538, 2009.
- [34] Y. Liu y G. Liu, "Interaction analysis and posture optimization for a reconfigurable tracked mobile modular manipulator negotiating slopes," en *IEEE International conference on Robotics and Automation*, Anchorage, 2010, pág. 1780-1785.

- [35] K. Choi, H. Jeong, K. Hyun, H. Choi, y Y. Kwak, "Obstacle negotiation for the rescue robot with variable single-tracked mechanism," en *IEEE/ASME international conference on Advanced intelligent mechatronics*, Zurich, 2007, pág. 1-6.
- [36] Y. Takita, N. Shimoi, y H. Date, "Development of a wheeled mobile robot " Octal Wheel "realized climbing up and down stairs," en *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, Sendai, 2004, pág. 2440-2445.
- [37] C. Marques, C. Joao, P. Lima, J. Frazao, I. Ribeiro, y R. Ventura, "Raposa: semi-autonomous robot for rescue operations," en *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, Beijing, 2006, pág. 3988-3993.
- [38] E. Kececi, "Design and prototype of mobile robots for rescue operations," *Robotica*, vol. 27, no. 5, pág. 729-737, 2009.
- [39] P. Moubarak y P. Ben-Tzvi, "Modular and reconfigurable mobile robots," *Robotics and autonomous systems*, vol. 60, no. 12, pág. 1648-1663, 2012.
- [40] J. Liu, Y. Wang, S. Ma, y B. Li, "Analysis of tipover stability for novel shape shifting modular robot," *Chin. J. Mech. Eng.*, vol. 19, no. 2, pág. 181-186, 2006.
- [41] C. Ye, S. Ma, y B. Li, "Development of a shape-shifting mobile robot for urban search and rescue," *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, vol. 21, no. 2, pág. 31-35, 2008.
- [42] B. Li, S. Ma, J. Liu, M. Wang, T. Liu, y Y. Wang, "Amoeba-I: a shape-shifting modular robot for urban search and rescue," *Advanced Robotics*, vol. 23, no. 9, pág. 1057-1083, 2009.
- [43] S. Nakamura, M. Faragalli, N. Mizukami, I. Nakatani, Y. Kunii, y T. Kubota, "Wheeled robot with movable center of mass for traversing over rough terrain," en *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, San Diego, 2007, pág. 1228-1233.
- [44] J. Morales, J. L. Martínez, A. Mandow, J. Serón, A. García-Cerezo, y A. Pequeño-Boyer, "Center of gravity estimation and control for a field mobile robot with a heavy manipulator," en *IEEE International Conference on Mechatronics*, Málaga, 2009, pág. 1-6.
- [45] J. Morales, J. L. Martínez, A. Mandow, J. Serón, y A. García-Cerezo, "Static tip-over stability analysis for a robotic vehicle with a single-axle trailer on slopes based on altered supporting polygons," *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, vol. 18, no. 2, pág. 697-705, April 2013.
- [46] C. Beck, J. Miro, y G. Dissanayake, "Trajectory optimisation for increased stability of mobile robots operating in uneven terrains," en *IEEE International Conference on Control and Automation*, Christchurch, 2009, pág. 1913-1919.

- [47] M. Norouzi, J. Miro, y G. Dissanayake, "Planning high-visibility stable paths for reconfigurable robots on uneven terrain," en *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots Systems*, Vilamoura, 2012, pág. 2844-2849.
- [48] A. Torige y T. Ihara, "Control of manipulator with gravity center position control on mobile vehicle," en *International Conference on Advanced Robotics*, Monterey, 1997, pág. 367-372.
- [49] H. Zhang y A. Song, "System centroid position based tipover stability enhancement method for a tracked search and rescue robot," *Advanced Robotics*, vol. 28, no. 23, pág. 1571-1585, 2014.
- [50] Q. Huang, S. Sugano, y K. Tanie, "Stability compensation of a mobile manipulator by manipulator motion: feasibility and planning," en *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, San Diego, 2007, pág. 1285-1292.
- [51] S. Moosavian y S. Hoseyni, "Dynamics modeling and tipover stability of a hybrid serial-parallel mobile robot," en *International Conference on Control, Instrumentation and Automation*, Shiraz, 2011, pág. 1024-1029.
- [52] R. Abo-Shanab y N. Sepehri, "Tip-over stability of manipulator-like mobile hydraulic machines," *Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control*, vol. 127, no. 2, pág. 295-301, 2005.
- [53] C. Qiu, Q. Cao, L. Yu, y S. Miao, "Improving the stability level for on line planning of mobile manipulators," *Robotica*, vol. 27, no. 3, pág. 389-402, 2009.
- [54] J. Lee, J. Park, y B. Lee, "Turnover prevention of a mobile robot on uneven terrain using the concept of stability space," *Robotica*, vol. 27, no. 5, pág. 641-652, 2008.
- [55] Q. Huang, S. Sugano, y K. Tanie, "Motion planning for a mobile manipulator considering stability and task constraints," en *IEEE International Conference on Robotics & Automation*, Leuven, 1998, pág. 2192-2198.
- [56] B. Beckman, J. Pieper, D. Mackay, M. Trentini, y D. Erickson, "Two dimensional dynamic stability for reconfigurable robots designed to traverse rough terrain," en *IEEE/RSJ International Conference of Intelligent Robots and Systems*, Nice, 2008, pág. 2447-2452.
- [57] J. Kim, W. Chung, Y. Youm, y B. Lee, "Real-time ZMP compensation method using null motion for mobile manipulators," en *IEEE International Conference on Robotics & Automation*, Washington, 2002, pág. 1967-1972.
- [58] M. Hatano y H. Obara, "Stability evaluation for mobile manipulators using criteria based on reaction," en *SICE Annual Conference*, Fukui, 2003, pág. 2050-2055.

- [59] Q. Huang, S. Sugano, y I. Kato, "Stability control for a mobile manipulator using a potential method," en *EEE/RSJ/GI International Conference on Advanced Robotic Systems and the real world*, Munich, 1994, pág. 839-846.
- [60] A. Meghdari, D. Naderi, y S. Eslami, "Optimal stability of a redundant mobile manipulator via genetic algorithm," *Robotica*, vol. 24, pág. 739-743, 2006.
- [61] Q. Huang, K. Tanie, y S. Sugano, "Coordinated motion planning for a mobile manipulator considering stability and manipulation," *The international Journal of Robotics Research*, vol. 19, no. 8, pág. 732-742, 2000.
- [62] A. Ghaffari, A. Meghdari, D. Naderi, y S. Eslami, "Tipover stability enhancement of wheeled mobile manipulators using an adaptive neuro- fuzzy inference controller system," en *World academy of science, engineering and technology*, 2008, pág. 241-247.
- [63] Y. Li y Y. Liu, "Fuzzy logic self-motion planning and robust adaptive control for tip-over avoidance of redundant mobile modular manipulators," en *IEEE/ASME International Conference of Advanced Intelligent Mechatronics*, Monterey, 2005, pág. 1281-1286.
- [64] S. Lee, M. Leibold, M. Buss, y F. Park, "Online stability compensation of mobile manipulators using recursive calculation of ZMP gradients," en *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, RiverCentre, 2012, pág. 850-855.
- [65] F. Inoue, T. Murakami, y K. Ohnishi, "A motion control of mobile manipulator with external force," *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, vol. 6, no. 2, pág. 137-142, 2001.
- [66] C. Kessens, D. Smith, y P. Osteen, "A framework for autonomous self-righting of a generic robot on sloped planar surfaces," en *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, RiverCentre, 2012, pág. 4724-4729.
- [67] Y. Chiu, N. Shiroma, H. Igarashi, N. Sato, M. Inami, y F. Matsuno, "Fuma: Environment information gathering wheeled rescue robot with one-DOF arm," en *IEEE International Workshop on Safety, Security and Rescue Robotics*, Kobe, 2005, pág. 81-86.
- [68] J. Serón, J. L. Martínez, A. Mandow, A. García-Cerezo, J. Morales, J. Reina, y J. García, "Terrace climbing of the Alacrane mobile robot with cooperation of its onboard arm," en *IEEE International Workshop on Advanced Motion Control*, Sarajevo, 2012, pág. 1-6.
- [69] J. Serón, A. García-Cerezo, J. L. Martínez, A. Mandow, J. García, y J. Morales, "Maniobras 3D en el robot Alacrane: Paso de un desnivel con apoyo del manipulador en el suelo," en *Robot 2011*, Sevilla, 2011, pág. 80-84.
- [70] G. Lan y S. Ma, "Step-climbing analysis of a novel tracked robot," en *IEEE International Conference on Robotics and biomimetics*, Shatin, 2005, pág. 544-549.

- [71] R. Sven y L. Johansson, "Winter tests of a quad-bike rollover prevention system," en *International Conference on advanced Robotics*, Tallinn, 2011, pág. 512-517.
- [72] M. Guarnieri, I. Takao, E. Fukushima, y S. Hirose, "Helios VIII search and rescue robot: design of an adaptive gripper and system improvements," en *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, San Diego, 2007, pág. 1775-1780.
- [73] M. Guarnieri, I. Takao, P. Debenest, K. Takita, E. Fukushima, y S. Hirose, "Helios IX tracked vehicle for urban search and rescue operations: mechanical design and first tests," en *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, Nice, 2008, pág. 1612-1617.
- [74] P. Ben-tzvi, A. Goldenberg, y J. Zu, "Design, simulations and optimization of a tracked mobile robot manipulator with hybrid locomotion and manipulation capabilities," en *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Pasadena, 2008, pág. 2307-2312.
- [75] P. Ben-tzvi, A. Goldenberg, y J. Zu, "Implementation of sensors and control paradigm for a hybrid mobile robot manipulator for search and rescue operations," en *IEEE International Workshop on Robotic and Sensor Environment*, Ottawa, 2007, pág. 1-6.
- [76] J. García, J. L. Martínez, A. Mandow, A. García-Cerezo, y J. Serón, "Diseño de un efector final hidráulico de doble función para el robot móvil Alacrane," en *XXXIII Jornadas de Automática*, Vigo, 2012, pág. 705-710.
- [77] J. García, J. L. Martínez, y A. García-Cerezo, "Modelado del efector final del robot Alacrane para el contacto con el suelo," *Revista Científica UNET*, vol. 23, no. 2, pág. 88-100, 2011.
- [78] P. Roan, A. Burmeister, A. Rahimi, K. Holz, y D. Hooper, "Real-world validation of three tipover algorithms for mobile robots," en *IEEE International conference on Robotics and Automation*, Anchorage, 2010, pág. 4431-4436.
- [79] R. McGhee y A. Frank, "On the stability properties of quadruped creeping gaits," *Mathematical Biosciences*, vol. 3, pág. 331-351, Agosto 1968.
- [80] R. McGhee y G. Iswandhi, "Adaptive locomotion of a multilegged robot over rough terrain," *IEEE Transactions on Systems Man and Cybernetics*, vol. SMC-9, no. 4, pág. 176-182, 1979.
- [81] D. Messuri, "Optimization of the locomotion of a legged vehicle with respect to maneuverability," The Ohio State University, Ohio, Tesis doctoral 1985.
- [82] A. Ghasempoor y N. Sepehri, "A measure of machine stability for moving base manipulators," en *IEEE Conference on Robotics and Automation*, 1995, pág. 2249-2254.
- [83] S.i Sugano, Q. Huang, y I. Kato, "Stability criteria in controlling mobile robotic systems," en *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, Yokohama,

1993, pág. 832-838.

- [84] E. Papadopoulos y D. Rey, "A new measure of tipover stability margin for mobile manipulators," en *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Minneapolis, 1996, pág. 3111-3116.
- [85] Antonio Diaz-Calderon y Alonzo Kelly, "Development of a terrain adaptive stability prediction system for mass articulating mobile robots," en *Field and Service Robotics*. Berlín, Alemania: Springer Berlin Heidelberg, 2006, pág. 343-354.
- [86] E. Papadopoulos y D. Rey, "The force-angle measure of tipover stability margin for mobile manipulators," *Vehicle System Dynamics*, vol. 33, no. 1, pág. 29-48, 2000.
- [87] J. Valls y G. Dissanayake, "Automatic fine motor control behaviours for autonomous mobile agents operating on uneven terrains," en *3rd International Symposium on Practical Cognitive Agents and Robots*, Toronto, 2010, pág. 33-40.
- [88] A. Meghdari, D. Naderi, y M. Alam, "Neural-network-based observer for real-time tipover estimation," *Mechatronics*, vol. 15, pág. 989-1004, 2005.
- [89] Y. Li y Y. Liu, "Kinematics and tip-over stability analysis for the mobile modular manipulator," *Journal of Mechanical Engineering Science*, vol. 219, no. 3, pág. 331-342, 2005.
- [90] Y. Li y Y. Liu, "Real-time tip-over prevention and path following control for redundant nonholonomic mobile modular manipulators via fuzzy and neural-fuzzy approaches," *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, vol. 128, no. 4, pág. 753-764, December 2006.
- [91] Moosavian y K. Alipour, "Stability evaluation of mobile robotic systems using moment-height measure," en *IEEE Conference on Robotics, Automation y Mechatronics*, Bangkok, 2006, pág. 1-6.
- [92] S. Moosavian y K. Alipour, "Moment-height tip-over measure for stability analysis of mobile robotic systems," en *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, Beijing, 2006, pág. 5546-5551.
- [93] S. Moosavian y K. Alipour, "Tip-over stability of suspended wheeled mobile robots," en *IEEE International Conference on Mechatronics and Automation*, Harbin, 2007, pág. 1356-1361.
- [94] Y. Liu, X. Meng, y M. Zhang, "Research on mobile manipulator tip-over stability and compensation," en *8th WSEAS International Conference on Robotics, control and Manufacturing Technology*, Hangzhou, 2008, pág. 114-120.
- [95] C. Porras, J. Porras, J. García, y J. L. Martínez, "Diseño de la estructura mecánica de un robot móvil con un brazo para el contacto con el suelo," en *V Congreso Internacional de*

*Ingeniería Mecánica y III de Ingeniería Mecatrónica*, Bogotá, 2011, pág. 1-10.

- [96] W. Sánchez, I. Medina, J. García, y A. Gil, "Estimación de movimiento de un robot móvil usando el emparejamiento de puntos con un telémetro láser 2D," en *Conferencia Nacional de Computación, Informática y Sistemas*, Caracas, 2014, pág. 165-171.
- [97] A. Mandow, J. L. Martínez, J. Morales, J. Blanco, A. García-Cerezo, y J. González, "Experimental kinematics for wheeled skid-steer mobile robots," en *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, San Diego, 2007, pág. 1222-1227.
- [98] J. Denavit y R. Hartenberg, "A kinematic notation for lower-pair mechanisms based on matrices," *Journal of Applied Mechanics*, vol. 22, pág. 215-221, Junio 1995.
- [99] S. K. Saha, *Introducción a la robótica*, 1st ed. México, México: McGraw-Hill/Interamericana Editores, 2008.
- [100] F. Monasterio-Huelin y A. Gutiérrez. (2012, Abril) Robolabo.etsit.upm.es. [Online]. [www.robolabo.etsit.upm.es/asignaturas/seco/apuntes/motor\\_dc.pdf](http://www.robolabo.etsit.upm.es/asignaturas/seco/apuntes/motor_dc.pdf).
- [101] R. Kelly y V. Santibáñez, *Control de movimiento de robots manipuladores*, 1st ed. Madrid, España: Pearson Educación S.A., 2003.
- [102] A. Barrientos, L. Peñín, C. Balaguer, y R. Aracil, *Fundamentos de robótica*, Primera edición ed. Madrid, España: McGraw-Hill, 1996.
- [103] F. Torres, J. Pomares, P. Gil, S. T. Puente, y R. Aracil, *Robots y sistemas sensoriales*, 2nd ed. Madrid, España: Pearson educación S.A., 2002.
- [104] G. W. Michalec, "Engranés," en *Manual del ingeniero mecánico*. México, México: McGraw-Hill/Interamericana de México, S.A., 1999, ch. 8.3.
- [105] J. Gómez de Gabriel, A. Ollero, y A. García-Cerezo, *Teleoperación y telerrobótica*, Primer edición ed. Madrid, España: Pearson Educación S.A., 2006.
- [106] A. Pinto y A. Reali, "A hybrid adaptive architecture for mobile robots based on reactive behaviors," en *Fifth International Conference on Hybrid Intelligent Systems*, Rio de Janeiro, 2005, pág. 1-6.
- [107] N. Vuković y Z. Miljković, "New hybrid control architecture for intelligent mobile robot navigation in a manufacturing environment," *Faculty of Mechanical Engineering Transactions*, vol. 37, pág. 9-18, 2009.
- [108] A. Ollero, A. Mandow, V. Muñoz, y J. Gómez de Gabriel, "Control architecture for mobile robot operation and navigation," *Robotics & Computer- Integrated Manufacturing*, vol. 11, no. 4, pág. 259-269, 1994.

- [109] M. Stein y R. Paul, "Operator interaction, for time-delayed teleoperation, with a behavior-based controller," en *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, San Diego, 1994, pág. 231-236.
- [110] R. Brooks, "A robust layered control system for a mobile robot," *IEEE Journal of Robotics and Automation*, vol. RA-2, no. 1, pág. 14-23, Marzo 1986.
- [111] R. Arkin, "Behavior-based robot navigation for extended domains," *Adaptive Behavior*, vol. 1, no. 2, pág. 201-225, Septiembre 1992.
- [112] R. F. Abo-Shanab y N. Sepehri, "On dynamic stability of manipulators mounted on mobile platforms," *Robotica*, vol. 19, no. 04, pág. 439-449, 2001.
- [113] R. F. Abo-Shanab y N. Sepehri, "Dynamic modeling of tip-over stability of mobile manipulators considering the friction effects," *Robotica*, vol. 23, no. 2, pág. 189-196, 2005.
- [114] J. L. Martínez, A. Mandow, J. Morales, S. Pedraza, y A. García-Cerezo, "Approximating kinematics for tracked mobile robots," *The international Journal of Robotics Research*, vol. 24, no. 10, pág. 867-878, 2005.
- [115] B. Thibodeau, P. Deegan, y R. Grupen, "Static analysis of contact forces with a mobile manipulator," en *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Orlando, 2006, pág. 4007-4012.
- [116] N. Li, S. Ma, B. Li, M. Wang, y Y. Wang, "An online stair-climbing control method for a transformable tracked robot," en *IEEE International conference on Robotics and Automation*, RiverCentre, 2012, pág. 923-929.
- [117] S. Yu, T. Wang, Y. Wang, D. Zhi, C. Yao, Z. Wang, X. Li, Z. Wang, y Y. Luo, "A tip-over and slippage stability criterion for stair-climbing of a wheelchair robot with variable geometry single tracked mechanism," en *IEEE International Conference on Information and Automation*, Shenyang, 2012, pág. 88-93.
- [118] Y. Liu y G. Liu, "Track-stair and vehicle-manipulator interaction analysis for tracked mobile manipulators climbing stairs," en *IEEE Conference on Automation Science and Engineering*, Washington, 2008, pág. 157-162.
- [119] W. Wang, D. Wu, Q. Wang, Z. Deng, y Z. Du, "Stability analysis of a tracked mobile robot in climbing stairs process," en *IEEE International Conference on Mechatronics and Automation*, Chengdu, 2012, pág. 1669-1674.
- [120] M. Brunner, T. Fiolka, D. Schulz, y C. Schlick, "Design and comparative evaluation of an iterative contact point estimation method for static stability estimation of mobile actively reconfigurable robots," *Robotics and Autonomous Systems*, vol. 63, no. 1, pág. 89-107, Septiembre 2015.

- [121] M. Mosadeghzad, D. Naderi, y S. Ganjefar, "Dynamic modeling and stability optimization of a redundant mobile robot using a genetic algorithm," *Robotica*, vol. 30, no. 03, pág. 505-514, Mayo 2012.
- [122] G. Freitas, F. Lizarralde, L. Hsu, y M. Bergerman, "Terrain model – based anticipative control for articulated vehicles with low bandwidth actuators," en *IEEE International conference on Robotics and Automation*, Karlsruhe, 2013, pág. 382-389.