

II CAIM 2010
Segundo Congreso Argentino
de Ingeniería Mecánica
San Juan - Noviembre 2010

Diseño Mecánico de un Vehículo Teleoperado

Francisco M. Vergara, Edith G. Gulino

*Departamento de Mecánica, Facultad de Ingeniería-Universidad Nacional de La Plata, UNLP.
Av. 1 y 47, (1900) La Plata, Argentina. e-mail: fvergara@ing.unlp.edu.ar.*

RESUMEN

Este trabajo presenta el diseño mecánico de un pequeño vehículo experimental que en primera instancia operará como teleoperado, y al que se espera luego automatizar. El método de diseño seguido es mayormente ascendente (bottom-up); se partió de la selección de componentes comerciales que permitieran cumplir los requerimientos establecidos, y luego se realizó el diseño mecánico para integrarlos. El sistema de dirección elegido es del tipo deslizante (Skeed Steering) ya que no cuenta con partes móviles. El equipo puede adaptarse a distintas tareas, como ser inspección de desastres, transporte de cargas medias en una planta (como un AGV), manipulación de objetos peligrosos. Para esta última tarea, está previsto dotarlo de un brazo manipulador intercambiable.

El artículo presenta un breve panorama de este tipo de vehículos, la especificación de requerimientos, las decisiones tomadas, el modelo CAD resultante y un modelo matemático simple utilizado para el análisis preliminar del comportamiento.

Palabras Claves: TOV, Skeed Steering Vehicle, holonómico, modelo matemático, simulación

1. INTRODUCCIÓN

Los Vehículos Terrestres Teleoperados (TOV) son equipos controlados a distancia, normalmente diseñados para moverse por distintos tipos de terrenos. Su aplicación primaria es en tareas de inspección que implican riesgo de vida, tales como derrumbes de construcciones o minas, zonas de terremotos, tránsito en campos minados, por lo cual tienen importantes implicancias sociales. Para estas tareas captan la imagen del ambiente con cámaras y la transmiten al operador distante. Si además se los dota de uno o más brazos manipuladores, pueden aplicarse en tareas complejas, como manejar residuos peligrosos o desarmar explosivos.

Los TOVs pueden considerarse compuestos de cinco subsistemas:

- La plataforma móvil, propiamente el cuerpo del vehículo
- El brazo manipulador, si lo posee.
- El módulo de sensores, que permite la interacción con el ambiente.
- La unidad de control del operador, a través de la cual se maneja el vehículo
- El sistema de comunicaciones inalámbricas.

Este trabajo se ocupa del diseño mecánico de la plataforma de un TOV actualmente en construcción (Figura 1) que integra tecnología de la estantería con un diseño original. Sus objetivos son la experimentación en el ámbito académico y posteriormente su aplicación en tareas riesgosas.

En el proyecto participan profesionales y alumnos de ingeniería electrónica y mecánica, quienes amplían así su experiencia en el diseño y operación de sistemas teleguiados y robótica móvil, y posteriormente permitirá a los alumnos realizar prácticas de laboratorio en dichos temas.

También se presenta un modelo matemático simple, utilizado para los cálculos preliminares, y que sirvió como base para el desarrollo de los modelos cinemático y dinámico más complejos. Estos se abordan en otro trabajo en preparación.

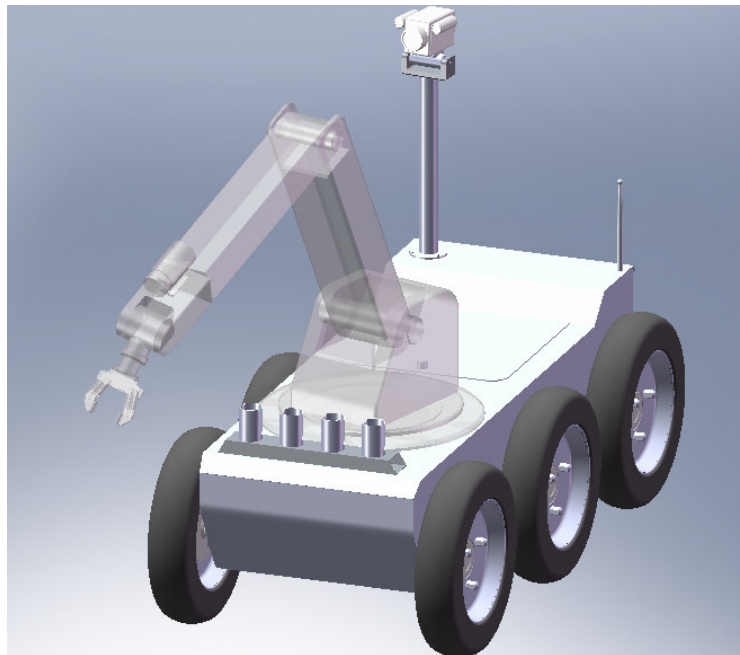


Figura 1 Modelo geométrico del vehículo, con un brazo genérico

Los vehículos Teleoperados comparten gran parte de la problemática de diseño y operación con sus similares automáticos, los robots móviles, por lo cual este trabajo se apoya en investigaciones realizadas sobre estos últimos.

2. ESPECIFICACIONES GENERALES

Se comenzó estableciendo las características generales deseadas el vehículo. Estas son:

- Debe ser apto para tránsito en interiores.
- Debe ser apto para tránsito en exteriores, bajo buenas condiciones climáticas y en terrenos de rugosidad media.
- Debe alcanzar una velocidad máxima en terreno liso del orden de 6 km/h.
- Debe atravesar puertas estándar (ancho inferior a 0,7 mts).
- Debe subir pendientes de hasta 35° y escaleras de pendiente aparente hasta 35°.
- Debe ser hermético al ingreso de suciedad.
- Debe contar con un sistema de navegación automática básico, con el fin de evitar obstáculos evidentes.
- Debe contar con un sistema de visión.
- El brazo manipulador debe desmontarse fácilmente y reemplazarse por distintos modelos.
- El brazo manipulador debe contar con un acople rápido para el cambio automático de herramientas.
- El vehículo debe contar con un portaherramientas para el brazo.

3. OFERTA COMERCIAL

Definidos los requerimientos generales, se investigó la oferta comercial de equipos de características compatibles; se analizaron soluciones estándar a estos requerimientos y se realizó el diseño mecánico del vehículo. La tabla 1 presenta un resumen de características de algunos de los equipos comerciales estudiados, y la definición del presentado aquí (VET).

Tabla 1 Características de TOV 's

Fabricante	Remotec	UMA	Robusoft	Telerob	Robotnik	Foster-Miller	
Modelo	HD-1	Auriga II	RobuROC 6	TEODor	Rescuer	Talon	VET
Ambiente	Exterior						
Aplicaciones	1,2,3	1,4	2	1,2,3	1,3	1,3	1,2,3
Cuerpo	Rígido	Rígido	Articulado	Rígido	Rígido	Rígido	Rígido
Sist. Dirección	Deslizamiento (sked Steering)						
Locomoción	4 ruedas	Orugas	6 ruedas	Orugas	Orugas	Orugas	6 Ruedas
Fuente de Potencia	Baterías	Grupo elect.	Baterías	Baterías	Baterías	Baterías	Baterías
Pendientes (°)	45	30	45	32	45	43	35
Obstáculos (alto)	400	-	250	-	-	-	200
Velocidad (km/h)	7	2,9	13	2,7	4,5	8,3	6
Autonomía (hs)	4 hs	-	-	4 hs.	8	3	3
Alto (mm)	762 (1)	960 (3)	500	1240 (4)	600 (2)	427 (1)	490 (2)
Ancho (mm)	660	700	780	685	780	572	690
Largo (mm)	990	1200	1500	1300	1100	864	1416
Peso (Kg)	68 (2)	190	160	400	250	52 a 71	~150

Aplicaciones: 1-Inspección, 2-Vigilancia, 3-Manipulación de objetos peligrosos, 4-Extinción de incendios

Notas: (1) Con brazo recogido; (2) Sin brazo; (3) Con plataforma de despegue (para pequeños helicópteros de observación); (4) Con brazo

4. SELECCIÓN DE LA CONFIGURACIÓN

Existen variantes de estructura para estos vehículos, y hay varias revisiones de los mismos [1], [2], [3].

En general, se los clasifica por el tipo de locomoción; los tres medios de movimiento más usuales son: por ruedas, por patas y orugas. El medio más adecuado para un equipo depende principalmente del ambiente

en que deba trabajar. Los vehículos con ruedas son adecuados para interiores y exteriores con pisos relativamente planos. En suelos muy irregulares o en escaleras, son preferibles las patas. Si el ambiente predominante es agreste, el vehículo de orugas es mejor elección; éste también sube bien escaleras.

Las patas se descartan para vehículos teleoperados debido a la complejidad de su operación manual. Por otra parte Wong y Huang [4] hacen un estudio comparativo de ruedas y orugas desde el punto de vista de la tracción, y concluyen que la tracción que puede proveer un vehículo con ruedas es siempre menor que uno comparable con orugas, debido a la menor longitud de contacto con el terreno. Las mayores diferencias se dan en terrenos no firmes, y se acercan mucho en terrenos firmes, como el asfalto o piso de arena consolidada, donde la tracción depende más de la fricción entre el terreno y la rueda. La tracción de las ruedas mejora si la presión baja (más área de contacto) especialmente en terreno flojo. En el caso del vehículo con ruedas, para una configuración dada, un espaciado uniforme entre las ruedas provee la máxima área de contacto entre rueda y terreno.

La solución más aceptable son los vehículos sobre orugas, e inicialmente se había elegido un equipo de estas características. Pero en el país no se consiguieron orugas livianas; las disponibles comercialmente son para vehículos pesados, como los viales y agrícolas. Por lo tanto se optó por un modelo con ruedas de igual diámetro e igualmente espaciadas. Primero se consideró un modelo de cuatro ruedas y luego se optó por uno de seis, pues éste tiene mejor adherencia y capacidad de transitar en terrenos más complicados.

El despeje del suelo resulta importante cuando el terreno tiene irregularidades localizadas importantes. El sistema de navegación automática tratará de que las ruedas las eviten, pero el cuerpo del vehículo podría pasar por encima de las mismas. El despeje se estableció en este caso en el orden de 130 mm, estimando un aplastamiento de la cubierta de 8-10 mm.

Existen vehículos con ruedas con cuerpos segmentados y articulados. Esta configuración permite al vehículo adaptarse a terrenos muy desparejos; ejemplos de estos equipos son el RobuROC 6 de Robusoft y el TankBot de Macroswiss, ambos de seis ruedas y cuerpo dividido en tres secciones articuladas. Estas configuraciones se descartan en este caso por su complejidad constructiva y la estructura elegida es de un único cuerpo rígido sin suspensiones. Esto limita sus prestaciones en terrenos muy desparejos, pero simplifica mucho el diseño y construcción, siendo todavía apto para terrenos medios.

El sistema de dirección elegido es del tipo deslizante (*Skeed Steering, SSV*), y es muy común en este tipo de vehículos. Este sistema de dirección no tiene partes móviles; las ruedas tienen un solo grado de libertad, y el vehículo se comporta según el principio de deslizamiento que le da su nombre, es decir, para que doble las ruedas deben deslizarse en sentido transversal al movimiento de avance. La ausencia de un sistema complejo de dirección simplifica el diseño y hace al equipo mucho más robusto, por lo tanto estos vehículos son más adecuados para su uso en exteriores; además tienen muy buena maniobrabilidad. Entre sus desventajas están no ser *holonómicos*, es decir, tienen más grados de libertad efectivos que controlables, lo que implica mayor complejidad en su control. Estos vehículos no pueden seguir cualquier trayectoria deseada, pero si cuentan con espacio suficiente pueden alcanzar cualquier punto.

Los vehículos holonómicos por su parte, presentan una gran maniobrabilidad, incluso giro de radio cero, pero tienen configuraciones especiales de bastante complejidad mecánica. Un ejemplo de vehículo holonómico comercial es el Seekur (<http://www.activrobots.com/ROBOTS/Seekur.html>).

Casi todos los vehículos estudiados usan baterías como fuente de potencia. Esto limita su autonomía, pero es la fuente más simple de operar. Pocos vehículos usan otras fuentes de potencia, como el Auriga II y vehículos militares como el Crusher (NREC) que usan combustible líquido.

5. DISEÑO

La tarea presentada aquí se centró en el diseño del cuerpo del vehículo. El método de diseño seguido es mayormente ascendente (bottom-up); se partió de la selección de componentes estándar que permitieran cumplir los requerimientos establecidos, y luego se realizó el diseño mecánico para integrarlos.

Respecto a la estructura, el cuerpo es de chapa de aluminio soldada, reforzado en los sectores más solicitados. Los accesorios son de caño estructural de aluminio o fundidos. Las llantas son de aluminio, y se utilizan cubiertas estándar de ciclomotor (90/90-10).

En este equipo el sistema de potencia es eléctrico, con motores de continua, y se seleccionaron baterías de ciclo profundo para el almacenamiento de energía, ya que a diferencia de un acumulador de automóvil, deben poder descargarse por completo y repetidamente, presentando una vida útil razonable.

Debido a la fricción por deslizamiento entre la rueda y el terreno durante las maniobras, los SSV consumen mucha energía comparados con vehículos con otros sistemas de dirección, lo que es un problema en vehículos eléctricos pequeños como éste, pues reduce la autonomía.

Las baterías son individualmente el elemento más voluminoso y pesado del equipo. Se ubicaron entre los ejes posterior y medio y apoyadas en el piso del vehículo, en atención al criterio de distribución de masa explicado en el párrafo siguiente. El peso de las baterías sobre el tren trasero se compensa con el peso del manipulador, que se ubica entre los ejes delantero y medio.

El centro de masa del vehículo se intenta mantener cercano al centro geométrico de la base del móvil, para mejorar la distribución de cargas sobre las ruedas; esto además mejora el comportamiento durante los giros, pues el deslizamiento lateral depende de la carga sobre los neumáticos. Para esto, se trata de distribuir las cargas tan simétricamente como sea posible. Para mejorar el equilibrio, el CM también se mantiene lo más bajo posible.

Para la planta motriz, en estos vehículos pequeños invariablemente se utilizan motores eléctricos, típicamente de inducción, sincrónicos de imán permanente o de continua. Para la elección, hay que tener en cuenta varias características al mismo tiempo. En este caso, las más relevantes son:

- Densidad de potencia
- Rendimiento en todo el rango de velocidades
- Capacidad de sobrecarga
- Costo

Verucchi et al. [5] analizan distintas opciones de motores eléctricos para un vehículo experimental, concluyendo que el motor sincrónico de imán permanente es una de las mejores. Se destacan el rendimiento y la potencia específica, por lo que los motores son más compactos y livianos; sin embargo, los motores más utilizados en la robótica móvil son los de corriente continua, por lo simple que resulta su control, y específicamente los de imán permanente.

En este equipo, más pequeño y de menor velocidad que el tratado en [5] el rendimiento y la potencia específica no son tan relevantes, y dada su disponibilidad, se emplean motores de CC, que cumplen razonablemente los requerimientos. Los motores elegidos tienen la opción de incorporar un reductor a tornillo sinfín y corona de la misma marca, obteniendo un moto-reductor compacto. Para no sobrecargar el reductor se requiere una reducción final que se efectúa con poleas y correas sincrónicas.

El movimiento del vehículo se logra aplicando pares tractores a uno o más pares de ruedas. En la mayoría de las aplicaciones, las ruedas del mismo lado giran coordinadas, a la misma velocidad. Esta coordinación puede lograrse por medio de una transmisión mecánica, o con tracción individual en cada rueda, con control local de velocidad y coordinado en un nivel supervisor automático. Aquí se adoptó inicialmente la primera

opción motorizando solo el eje posterior, pero el diseño contempla la posibilidad de agregar otros dos motores al eje delantero. La transmisión entre ejes se hace con correas sincrónicas.

Para que el vehículo doble, se deben aplicar pares diferentes en ambos lados del mismo, así que se requieren dos motores por eje, con control independiente, y coordinado en un nivel supervisor (manual en este caso).

Por el tamaño del equipo y las prestaciones esperadas, las solicitaciones estructurales no son importantes, y el cálculo más relevante es el de los motores. Para éste se consideraron el desplazamiento normal en terreno plano y la situación más desfavorable, es decir con el vehículo ascendiendo una pendiente o escalera. Se resume en la tabla 2, para un solo motor:

Tabla 2 Cálculo de los motores

Pend. °	En el Vehículo						Reductor		En el Motor					
	Velocidad Km/h	m/seg	Masa Kg	Fuerza N	Radio m	Torque N.m	Pot. Watt	Rel. 1:	Ren. -	Vel. RPM	Torque N.m	Pot. Watt	Corr. A	Sobrecarga %
35,0	3	0,83	75	484	0,2	96,7	403	56	0,92	2228	1,7	438	31	75
0,0	6	1,67		59		11,8	98			4456	0,2	107	6	-57

El motor elegido entrega una potencia nominal de 250 Watts; la sobrecarga en ascenso de pendientes es importante y estará limitada a períodos cortos.

Estos motores se proveen para 12 y 24 VCC. La elección recayó sobre el motor de 24 VCC, dado que con 12 volt, las corrientes máximas resultaban muy elevadas. Para alimentar el motor y por motivos de autonomía, se requieren dos baterías. Otros motores y accesorios (manipulador, cámaras, luces) se alimentan con una sola de las baterías.

El sistema de visión consiste en una cámara principal color montada en una columna con ángulo de visión de hasta 50° en horizontal y 40° en vertical y con posibilidad de incorporarle dos grados de libertad (cabeceo y guiñada). Se prevee instalar una cámara secundaria sobre el brazo, cercana al elemento final. La Figura 2 presenta un dimensional del equipo sin el brazo ni la columna de la cámara, y la Figura 3 una vista explosionada del mismo.

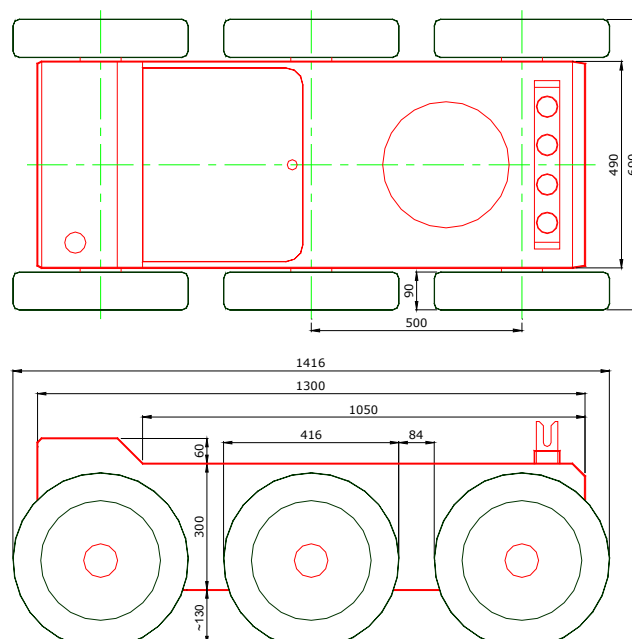


Figura 2 Dimensional del equipo

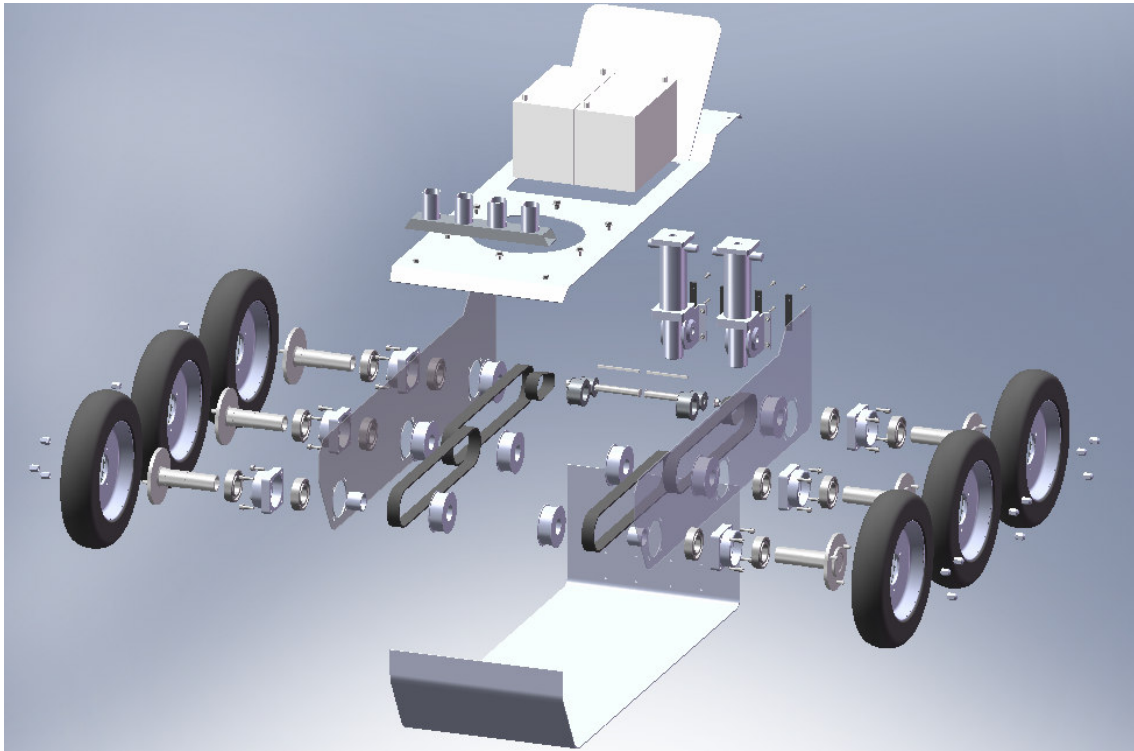


Figura 3 Vista explosionada

6. MODELADO Y SIMULACION

Para el estudio previo de las características dinámicas del equipo se realizó un modelo simple. En esta etapa no se incluye el modelo de los motores; las entradas de potencia son directamente los pares ejercidos por los mismos.

La hipótesis básica del modelado es que el vehículo se comporta como un cuerpo rígido y se mueve en un plano (XY). En estas circunstancias, las ecuaciones dinámicas surgen de aplicar dos balances de cantidad de movimiento lineales y otro rotacional al vehículo, uno por cada grado de libertad. Se utiliza una terna fija al móvil (o,x,y,z) con origen en su centro de masa (G) para describir el movimiento en forma interna. La Figura 4 presenta una vista superior del vehículo con la indicación de variables y sistema de coordenadas.

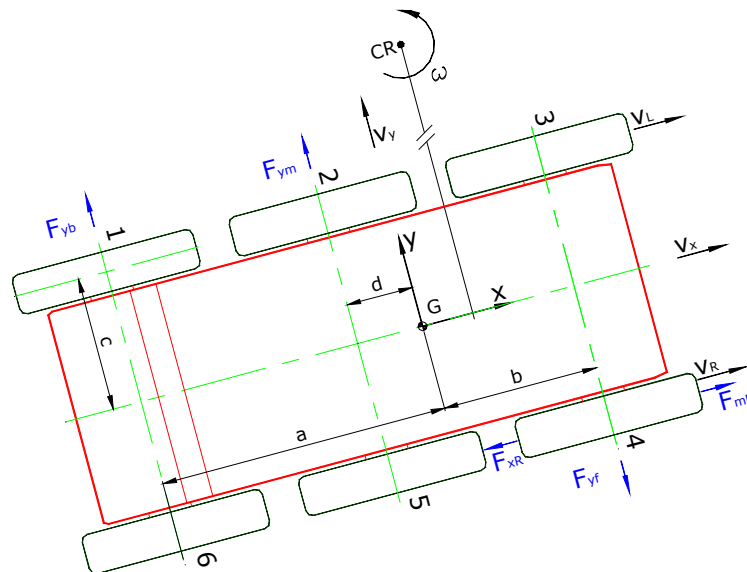


Figura 4 Variables y sistema de coordenadas utilizados en el modelo

6.1 Análisis de las fuerzas

Las fuerzas longitudinales se encuentran distribuidas sobre las ruedas en cada lado del vehículo; a los efectos de este modelo, se consideran concentradas y solo se habla de fuerza izquierda y derecha (subíndices L y R).

La fuerza de tracción en las ruedas sólo tiene componente longitudinal (x), y es fácilmente calculable en función del torque motor y radio de la rueda:

$$F_{mL} = T_{mL} / r \quad \text{y} \quad F_{mR} = T_{mR} / r \quad (1)$$

Donde:

$F_{mL,R}$: Fuerza tractora sobre las ruedas izquierdas y derechas respectivamente

$T_{mL,R}$: Torque motor izquierdo y derecho respectivamente

r : Radio aparente de las ruedas (se considera el aplastamiento)

Todas las fuerzas resistentes se deben a la fricción entre la rueda y el terreno; es roce seco y por lo tanto responden a la ley de Coulomb, es decir dependen solo de la fuerza normal y el coeficiente de fricción. El sentido de la fuerza depende del sentido de la velocidad, lo que se expresa matemáticamente a través de su signo.

A las fuerzas tractoras se oponen las componentes en x del roce (F_x), que también se agrupan por lado. Estas fuerzas se describen con¹:

$$F_{xL} = \mu_x \cdot N \cdot \text{signo}(v_L) \quad \text{y} \quad F_{xR} = \mu_x \cdot N \cdot \text{signo}(v_R) \quad (2)$$

Donde:

μ_x : Coeficiente de fricción por rodadura.

N : Reacción vertical del terreno por lado = peso del vehículo/2

$v_{L,R}$: Velocidades longitudinales de las ruedas izquierdas y derechas.

Las fuerzas transversales (F_y) se deben a la fricción por deslizamiento entre el terreno y la rueda, y solo aparecen cuándo el vehículo gira. En este caso se agrupan las fuerzas de ambas ruedas sobre el mismo eje (delantero, medio y trasero), y se expresan:

$$F_{yf} = \mu_y \cdot N_f \cdot \text{signo}(v_f) \quad F_{ym} = \mu_y \cdot N_m \cdot \text{signo}(v_m) \quad \text{y} \quad F_{yb} = \mu_y \cdot N_b \cdot \text{signo}(v_b) \quad (3)$$

Con:

μ_y : Coeficiente de fricción por deslizamiento.

$v_{f,m,b}$: Velocidades transversales sobre cada eje.

$N_{f,m,b}$: Reacciones normales sobre cada eje.

6.2 Ecuaciones auxiliares

Las velocidades de las ruedas dependen de las velocidades lineales del vehículo (v_x, v_y), de su velocidad de giro (ω) y sus dimensiones. Las ecuaciones son:

$$v_L = v_x - \omega \cdot c \quad v_R = v_x + \omega \cdot c \quad (4)$$

$$v_b = v_y - \omega \cdot a \quad v_m = v_y - \omega \cdot d \quad v_f = v_y + \omega \cdot b \quad (5)$$

Donde a, b, c, y d surgen de la figura 4.

¹ Todas las fuerzas se expresan individualmente en el mismo sentido de la velocidad; el signo real de cada fuerza viene dado por su signo en la ecuación de balance correspondiente.

6.3 Ecuaciones dinámicas

Con las consideraciones anteriores, las ecuaciones resultan:

Balance según el eje x:

$$D(m.v_x) = \sum F_x = F_{mR} + F_{mL} - F_{xR} - F_{xL} \quad (6)$$

Donde m es la masa del vehículo

Análogamente, el balance según el eje y:

$$D(m.v_y) = \sum F_y = -F_{yb} - F_{ym} - F_{yf} \quad (7)$$

Y para el movimiento de giro del vehículo:

$$D(J.\omega) = (F_{mR} - F_{mL}).c - (F_{xR} - F_{xL}).c - F_{yb}.a - F_{ym}.d - F_{yf}.b \quad (8)$$

Siendo J el momento de inercia baricéntrico del vehículo.

Las ecuaciones (1 a 8) constituyen el modelo completo. El modelo se programo y simuló usando Simulink™.

La figura 5 presenta la aceleración del vehículo en terreno liso desde el reposo, cuándo se aplican torques iguales en ambos lados en forma de paso. La combinación del alto torque de arranque de los motores y el modelo de fuerzas resistentes que no dependen de la velocidad (no posee realimentación) producen una respuesta casi lineal. La velocidad de 6 km/h (1,67 m/s) se alcanza en un tiempo muy aceptable, con torques relativamente bajos (15 N.m). Debido al modelo de fuerzas de roce empleado, los torques se deben bajar al valor de equilibrio (11,8 N.m, Tabla 2) ni bien se alcanza la velocidad deseada, de lo contrario el vehículo continuará acelerando. Al aplicarse pares iguales, el vehículo no gira y ω permanece en 0.

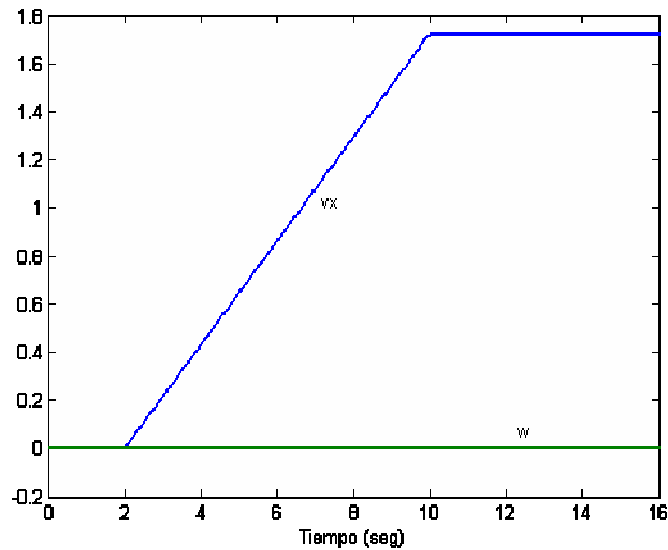


Figura 5 Aceleración del vehículo

Ascendiendo una pendiente la respuesta es similar y el tiempo de estabilización depende de los torques aplicados.

Al aplicar pares diferentes en ambos lados del vehículo éste dobla y cuándo se igualan los pares, sigue en una nueva dirección. Pero el modelo de fuerzas de roce laterales expresado por la Ecuación (3) no garantiza el equilibrio de fuerzas según el eje y ni el de momentos baricéntricos, y al no tener ningún amortiguamiento, el modelo presenta estabilidad marginal. De acuerdo al modelo, el vehículo comienza a oscilar alrededor del centro de rotación (CR); ω , F_y y v_y quedan oscilando, mientras v_x se comporta igual que antes.

7. CONCLUSIONES

El estudio de características de robots móviles comerciales fue de gran utilidad en el proceso de diseño seguido para este vehículo.

El resultado de la tarea es un modelo de vehículo relativamente sencillo y compacto, cuyas prestaciones (teóricamente) satisfacen plenamente los requerimientos establecidos.

Se requiere un estudio más profundo de las características dinámicas del equipo; para esto es necesario mejorar el modelo matemático, tarea en la que se está trabajando actualmente.

Este trabajo permitió adquirir experiencia en el diseño de este tipo de vehículos, que se aplicará en la etapa de diseño del control del equipo y trabajos posteriores.

8. REFERENCIAS

- [1] A. Cerón Correa, Sistema Robóticos Teleoperados, *Ciencia e Ingeniería Neogranadinas*, N°15, pp. 62-69, Nov. 2005.
 - [2] R. Silva Ortigoza, J. R. García Sánchez, V. R. Barrientos Sotelo, M. A. Molina Vilchis, V. M. Hernández Guzmán, G. Silva Ortigoza, Una panorámica de los Robots móviles, *Télématique*, **V.6**, N° 3, pp. 1-14, 2007.
 - [3] H. A. Secchi, *Una Introducción a los Robots Móviles* (monografía), AADECA, Buenos Aires, 2008.
 - [4] J. Y. Wong, Wei Huang, Wheels vs. tracks – A fundamental evaluation from the traction perspective, *Journal of Terramechanics*. N° 43, pp. 27–42, 2006.
 - [5] C. Verucchi, G. Bossio, G. García, C. Ruschetti, *Anales de la XII Reunión de Trabajo en Procesamiento de la Información y Control (RPIC 2007)*, *Algunas pautas para la selección de motores de propulsión en vehículos eléctricos*, Trabajo #205, 6 pp, Río Gallegos, 2007.
-