

ESTIMACIÓN DE LOS PARÁMETROS EQUIVALENTES DE LA SUSPENSIÓN DE UN VEHÍCULO PESADO CON 5 EJES

ESTIMATION OF THE EQUIVALENT PARAMETERS OF THE SUSPENSION OF A HEAVY VEHICLE WITH 5 AXES

Alejandro O. Peralta^{a,b}, Elvio Heidenreich^a, Aldélio B. Caldeira^b y Ricardo T. Costa Neto^b

^a*Departamento de Ingeniería Mecánica, Facultad. Ingeniería del Ejército, Cabildo 15, Buenos Aires, Argentina, aoperalta@fie.undef.edu.ar, www.ingenieriaest.iese.edu.ar*

^b*Departamento de Ingeniería Mecánica, IME, 22290-270, Rio de Janeiro, RJ, Brazil, ricardo@ime.eb.br, www.ime.eb.mil.br*

Palabras clave: Dinámica Vertical, Problemas Inversos, Levenberg-Marquardt, R2W, Sistemas Mecánicos, Multicuerpos Rígidos.

Resumen. En este trabajo se presenta un modelo de medio vehículo con cinco ejes, utilizando el software Matlab/Simulink(R). Son modeladas dos configuraciones diferentes del sistema de suspensión con la finalidad de analizar la performance de la dinámica vertical del vehículo. Los datos experimentales fueron obtenidos, por medio de un conjunto de acelerómetros y extensómetros colocados en los distintos puntos de interés, durante el pasaje de la pista de obstáculos y posterior filtrado de las señales obtenidas. En este trabajo serán estimados los parámetros de la suspensión (rigidez y amortiguamiento) empleando el método de problemas inversos. Para lo cual son utilizados los métodos Restricted Window (R2W) y Levenberg-Marquardt (LM), de naturaleza estocástica y determinística, respectivamente, a fin de minimizar el error cuadrático entre los datos experimentales y los resultados numéricos de las simulaciones.

Keywords: Vertical Dynamics, Inverse Problems, Levenberg-Marquardt, R2W, Mechanical Systems, Rigid Multibodies.

Abstract. In this work, we present a model of a half vehicle with five axes, using the Matlab / Simulink(R) software. Two different configurations of the suspension system are modeled in order to analyze the performance of the vehicle's vertical dynamics. The experimental data were obtained, by means of a set of accelerometers and extensometers placed in the different points of interest, during the passage of the obstacle course and subsequent filtering of the signals obtained. In this work the parameters of the suspension (rigidity and damping) will be estimated using the inverse problems method. For which the Restricted Window (R2W) and Levenberg-Marquardt (LM) methods, of stochastic and deterministic nature, respectively, are used in order to minimize the quadratic error between the experimental data and the numerical results of the simulations.

1. INTRODUCCIÓN

La dinámica vehicular puede ser dividida en tres grandes grupos como son la dinámica vertical, lateral y longitudinal. En este trabajo se analizó la dinámica vertical que está relacionada al comportamiento del vehículo cuando es sometido a excitaciones y vibraciones de base, que pueden ser inducidas por una variedad de fuentes, incluyendo irregularidades del suelo, vibraciones del motor, de la transmisión y de las orugas. Los distintos sistemas de suspensiones permiten eliminar o amortiguar las vibraciones y las excitaciones de base a las cuales es sometido el automotor para mejorar el confort, aumentar la maniobrabilidad y la seguridad de los ocupantes. El vehículo de combate (VC) a ser analizado es el M113, uno de los más vendidos del mundo, y que se encuentra en servicio en el Ejército Argentino, que actualmente realiza la conversión de la versión A1 a A2 y uno de los subsistemas que se modifica es el de la suspensión, agregando un amortiguador en el segundo eje. Con la finalidad de analizar la performance de las dos versiones y validar el modelo matemático en el laboratorio de cálculos numéricos de la facultad (Sicanlab) se decidió realizar los ensayos de los vehículos pasando la pista de obstáculos.

Ante esta problemática se pudo observar que algunos investigadores siguen la línea de investigación sobre como optimizar el sistema de suspensión con ensayos en laboratorios, otros por medio de simulaciones puramente numéricas y, finalmente, trabajos que realizan pruebas de campo, que, aunque más realistas, tienen costos más elevados que las simulaciones numéricas.

2. PRUEBAS DE CAMPO

En este trabajo, fueron realizadas las mediciones de campo del VC M113 A1 y A2, que fueron equipados con un extensómetro en la primera y quinta rueda respectivamente y con tres acelerómetros (triaxiales MEAS) posicionados sobre el eje delantero (ED), en el centro de gravedad (CG) y sobre el eje trasero (ET) para poder determinar las aceleraciones verticales. Para este trabajo se consideró que el vehículo se desplaza a una velocidad constante de 10 km/h cuando sobrepasa un obstáculo sinusoidal, presentado en la Fig. 1 y los parámetros empleados son presentados en la Tab. 1. En primer lugar, se realizaron pasajes en terreno plano para poder aplicar un filtrado de las vibraciones, a la velocidad que se realizaron los ensayos, y posteriormente se realizan varios pasajes por los obstáculos para descartar errores en las mediciones.

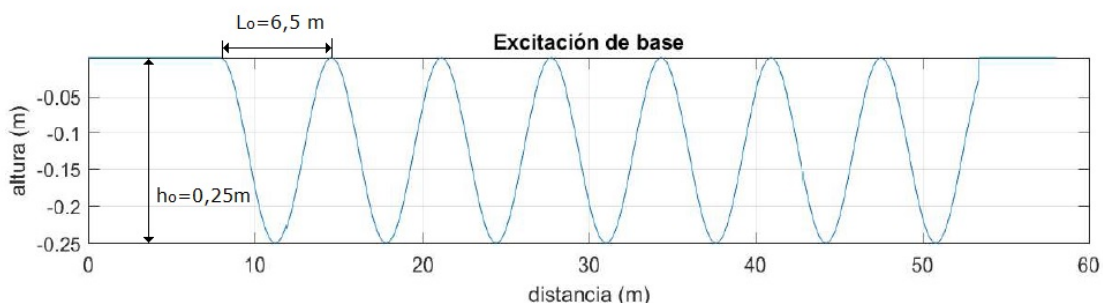


Figura 1: Modelado de la excitación de base.

Parámetro	Símbolo	Valor	Parámetro	Símbolo	Valor
Masa suspendida [kg]	Ms	5109	Dist CG al Eje 1 [m]	L1	1.35
Momento Inercia [kg m ²]	Iyy	12856	Dist CG al Eje 2 [m]	L2	0.69
Rigidez Susp [N/m]	ksi	104000	Dist CG al Eje 3 [m]	L3	0.02
Coef Amort [N s/m]	bsi	22520	Dist CG al Eje 4 [m]	L4	-0.66
Masa no suspendida [kg]	Mns	113.5	Dist CG al Eje 5 [m]	L5	-1.32
Rigidez de la oruga [N/m]	bwi	613000	Factor geometria	Factor	0.5-1.5
Factor Muelle	FCM	0.5-1.5	Factor Amort	FCA	0.5-1.5

Tabla 1: Parámetros mecánicos y geométricos del modelo.

2.1. Filtrado de las señales

Los datos adquiridos por los acelerómetros tienen una gran cantidad de ruido, que debió ser filtrado. Este ruido es proveniente de las vibraciones del motor, de la transmisión, de las orugas, etc. Para ello fue necesario pasar las mediciones del dominio del tiempo al dominio de las frecuencias y luego se resolvió usar un filtro de pasabajos de Butterworth y normalizar la frecuencia de corte. Al estar los acelerómetros colocados en la masa suspendida, la frecuencia de corte adoptada fue de 2 Hz conforme lo observado en (Ata y Oyadiji, 2014) las frecuencias del chasis se encuentran en el orden de 1 Hz y de la masa no suspendida en el orden de los 10 Hz para la velocidad analizada. Por otro lado, los datos adquiridos por los extensómetros no necesitaron ser filtrados.

3. MODELO MATEMÁTICO

El modelo propuesto para el análisis es un modelo de medio vehículo con 7 grados de libertad (GL), donde fueron considerados el desplazamiento de las cinco masas no suspendidas, el ángulo de cabeceo (pitch) y la aceleración vertical (bounce) del chasis en el centro de gravedad (CG). Las hipótesis del problema son: la superficie de contacto de la oruga-suelo es puntual en cada rueda, el suelo es indeformable, no se consideraron las fuerzas laterales ni la rugosidad del pavimento y el chasis es considerado un cuerpo rígido e indeformable. Cabe destacar que en el modelo se introdujeron tres diferentes factores de corrección, ya presentados en la Tab. 1. Por un lado se consideró el factor geometría, que es un factor corrector que toma en cuenta la geometría de la suspensión y por otro lado el factor Muelle y el Factor Amortiguador que consideran la deformación en los bujes de anclaje al chasis.

3.1. Empleo de los transformadores cinemáticos

EL sistema es modelado usando diagramas de bloques en el software Matlab / Simulink[®], con base en la metodología de flujo de potencia, usando la Matriz de Vínculos Cinemáticos (MVC) (Costa Neto, 2008).

El origen del referencial del cuerpo está en el CG y los ejes de coordenadas coinciden con los ejes principales de inercia de los cuerpos. Entretanto, es necesario relacionar las velocidades absolutas de los puntos de interés con las velocidades absolutas, lineares y angulares del propio chasis. Para este fin, se utiliza la MVC, definida como Θ , que permite vincular las aceleraciones entre el CG del chasis y los puntos de interés utilizados en el análisis de movimiento. Para lo cual es usada de la siguiente forma: el primer paso es definir la relación de las posiciones en relación al sistema de referencia fijo ${}^f r_i$ y al sistema de referencia en el cuerpo ${}^c r_0$, conforme la Ec. (1), y las relaciones de las velocidades absolutas en los sistemas de referencia y en los

puntos de interés, según la Ec. (2), (Haug, 1989).

$${}^f r_i = {}^f r_0 + {}^f T^c \cdot {}^c r_0 \quad (1)$$

$${}^f \dot{r}_i = {}^f \dot{r}_0 + {}^f T^c \cdot {}^c \dot{r}_0 + {}^f \dot{T}^c \cdot {}^c r_0 \quad (2)$$

Considerando que los cuerpos son rígidos e indeformables el tercer término de la Ec. (2) es nulo. La derivada de la matriz ${}^f T^c$ es representada en la Ec. (3) donde ${}^f \Omega$ es el vector velocidad angular del referencial del cuerpo medido en el referencial fijo. La notación $\tilde{\Omega}$ representa un vector conformado por ω_x , ω_y y ω_z escrito en la forma de una matriz anti simétrica (Haug, 1989).

$${}^f \dot{T}^c = {}^f \tilde{\Omega} \cdot {}^f T^c \quad (3)$$

La Ec. (4) representa el vector de velocidades absolutas en los puntos de interés, que, cuando son multiplicadas por la MVC, son transferidas del CG a los puntos de interés.

$${}^c V_{iz}^f = \Theta_c \cdot \begin{bmatrix} {}^f V_{cz}^c \\ {}^f \dot{\theta}_c \end{bmatrix} \quad (4)$$

La Ec. (5) proporciona el vector de la suma de las fuerzas, según la segunda ley de Newton, y la suma de los momentos, según la ecuación de Euler, calculadas en función de las fuerzas aplicadas en los puntos de interés, que, cuando son multiplicadas por la transpuesta de la MVC, son transferidas para el CG.

$$\begin{bmatrix} \sum_{i=1}^n {}^c F_{iz}^f \\ \sum_{i=1}^n {}^c M_{iy} \end{bmatrix} = \Theta^T \cdot {}^f F_{iz}^c \quad (5)$$

La Ec. (6) determina la aceleración absoluta lineal y la aceleración angular en el CG.

$$\begin{bmatrix} {}^f a_z^c \\ {}^f \ddot{\theta}_y^c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} MS & 0 \\ 0 & I_{yy} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^p {}^c F_{iz}^f \\ \sum_{i=1}^p {}^c M_{iy} \end{bmatrix} \quad (6)$$

3.2. Modelización en diagramas de bloques

El modelo esquemático presentado por (Ata y Oyadiji, 2014) y el modelado en diagrama de bloques empleando la metodología de flujo de potencia pueden ser observados en la Fig. 2. En este trabajo sólo se presenta el modelo con los cinco ejes, cada uno de ellos equipado con un muelle y un amortiguador equivalentes. Se simuló a una velocidad de 10 km/h y únicamente el obstáculo, del tipo sinusoidal, Fig. 1.

En la Fig. 3 se presentan el 2do nivel de bloques tanto del chasis como de la suspensión. En el bloque del chasis se puede observar la función donde se hace uso de los VCM, según la Ec. (4) y la Ec. (5) y se utiliza otra función en la que se emplea la ecuación de movimiento conforme la Ec. (6).

3.3. Validación del modelo

En primer lugar fué necesario obtener los valores de los puntos de las curvas de (Ata y Oyadiji, 2014) para poder digitalizar las curvas a fin de poder compararlas con las simulaciones. Las simulaciones se realizaron con el paso constante de 0,01 segundos y empleando la resolución de las ecuaciones diferenciales ordinarias ODE8 en SIMULINK / MATLAB®. ODE8

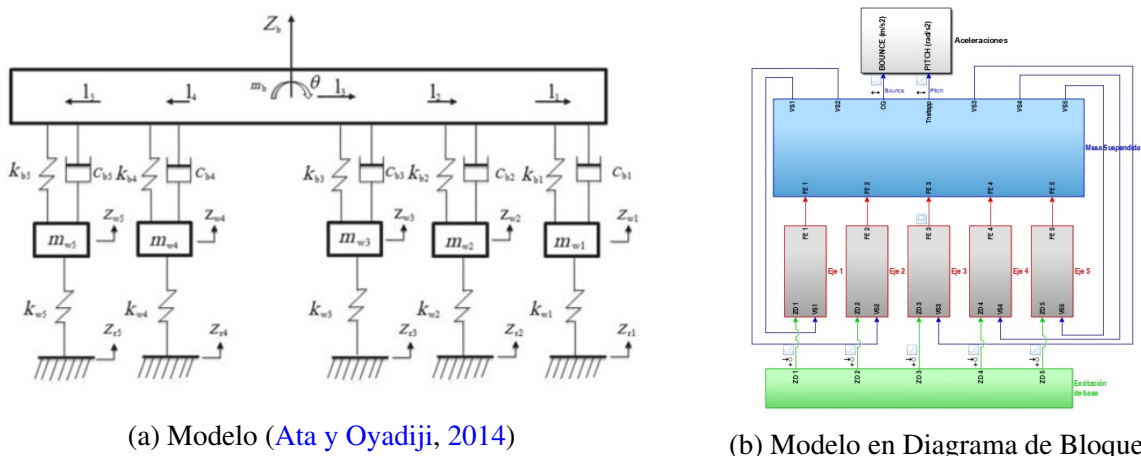


Figura 2: Comparación de modelos

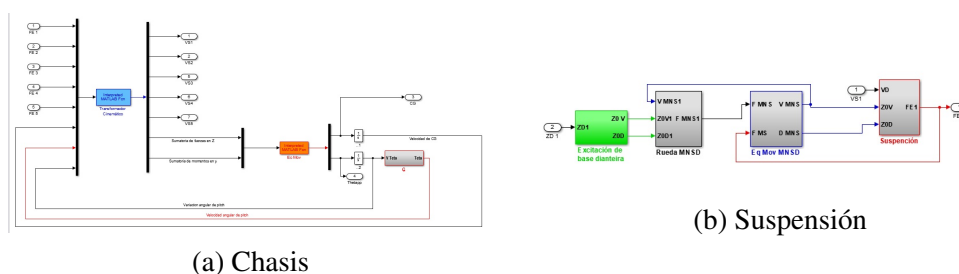


Figura 3: Segundo Nivel de bloque

es un método de cálculo numérico, de la familia de métodos de Runge Kutta, desarrollada por Dormand-Prince, sin necesidad de resolver las ecuaciones diferenciales concatenadas.

Para validar el problema directo se simuló a una velocidad de 10 km/h y únicamente el obstáculo, del tipo sinusoidal, de 5 metros de largo y 0,1 metros de altura. En la Fig. 4 se puede observar que los resultados proporcionados por el modelo son congruentes con los resultados obtenidos por (Ata y Oyadiji, 2014) tanto en las aceleraciones verticales del CG como las aceleraciones angulares del CG para la velocidad analizada.

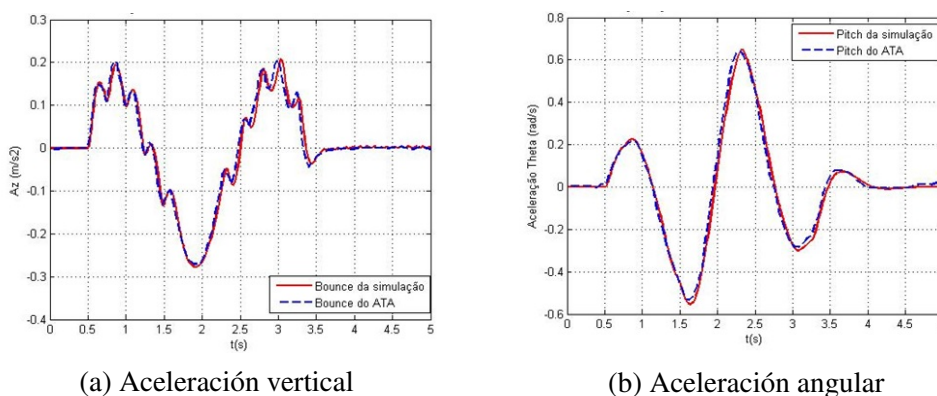


Figura 4: Simulación a 10 km/h

4. PROBLEMAS INVERSO

Los problemas inversos se caracterizan por determinar causas desconocidas a partir de efectos deseados u observados. Generalmente, las observaciones no son precisas, ya que pueden existir datos contaminados con ruidos o errores experimentales. En los estudios de problemas inversos, se designa una clase de problemas matemáticos, que buscan estimar parámetros o funciones inicialmente desconocidas de un modelo matemático, a partir de un conjunto de datos experimentales o pseudoexperimentales. La utilización de problemas inversos ha sido ampliamente difundida, ya que la estimación tanto de parámetros como de funciones desconocidas, se obtiene con gran velocidad y precisión. Los problemas inversos y los experimentos son procesos interdependientes, pues visando el mejor rendimiento de ambos, cuanta más informaciones experimentales estén disponibles en el análisis, mejor será la precisión de las estimaciones de los problemas inversos, ya que estos buscan determinar causas a partir de datos experimentales. En los problemas inversos, los métodos utilizados se dividen en deterministas y estocásticos. Los deterministas se fundamentan principalmente en términos de gradientes, y se utilizan para minimizar la función objetivo. Ellos poseen buena solución para un mínimo local, porque dependen del valor inicial, y un buena tasa de convergencia. Los métodos estocásticos poseen un óptimo mínimo global pero a un costo computacional mayor que con los los métodos deterministas.

4.1. Función multiobjetivo

En este trabajo, la función objetivo (FO) se ha convertido en una función multiobjetivo, que debe ser normalizada para poder trabajar con parámetros de diferente naturaleza. Esta función considera la aceleración vertical del chasis para cada uno de los puntos de interés y el desplazamiento de la primera y quinta rueda. La FO ha ser minimizada entre los datos experimentales y la diferencia con los resultados de la simulación del modelo computacional se expone en la Ec (7).

i: valores de la medición.

j: número de acelerómetros del 1 al 3.

n: número de extensómetros del 1 al 2.

$$FO^K = \frac{1}{med} \cdot \sqrt{\sum_{i=1}^{med} \left[\sum_{j=1}^3 \left(\frac{\ddot{Z}_{j,i,exp} - \ddot{Z}_{j,i,sim}}{\max(\ddot{Z}_{j,i,sim}) - \min(\ddot{Z}_{j,i,sim})} \right)^2 + \sum_{n=1}^2 \left(\frac{Z_{n,i,exp} - Z_{n,i,sim}}{\max(Z_{n,i,sim}) - \min(Z_{n,i,sim})} \right)^2 \right]}, \quad (7)$$

4.2. Criterio de parada

El criterio de parada, del proceso iterativo, adoptado corresponde al criterio de la discrepancia relativa inferior a la tolerancia adoptada, entre dos evaluaciones sucesivas de la FO y sólo después de que el criterio de parada es alcanzado por 5 iteraciones subsiguientes o por un máximo de 100 iteraciones, conforme la Ec (8).

$$|FO_{(p^{k-1})} - FO_{(p^k)}| < 10^{-3}, \quad (8)$$

4.3. Método de Estimativa de Parámetros- R2W

El método estocástico R2W se basa definir un dominio de búsqueda, Ec (9), y generar parámetros aleatorios (ζ_i), Ec (10), que luego se evalúan con la FO, de modo de elegir las mejores

soluciones que minimizan el cuadrado de los residuos entre los valores calculados con la simulación computacional y los datos experimentales.

El límite inferior de los parámetros se representa como (ζ_{iL}), el límite superior de los parámetros (ζ_{iH}), que son los que limitan el intervalo al que pertenecen las estimaciones y R es un número aleatorio perteneciente al intervalo $0 \leq R \leq 1$. La Fig. 5 muestra una representación esquemática del algoritmo.

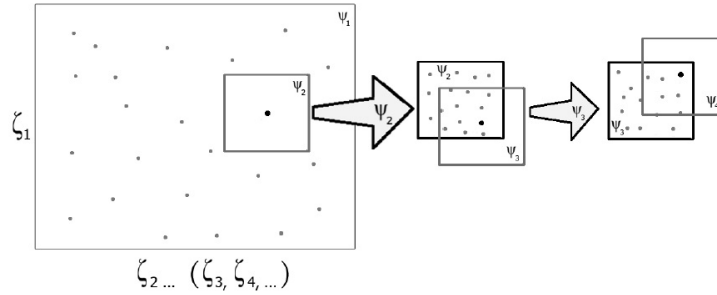


Figura 5: Representación esquemática del método R2W, (Bihain et al., 2012)

$$\mathbf{Z} = \mathbf{f}(\zeta_1, \zeta_2, \dots, \zeta_i) \tag{9}$$

$$\zeta_i = \zeta_{iL} + \mathbf{R}(\zeta_{iH} - \zeta_{iL}) \tag{10}$$

El procedimiento, que representa la Ec (10), se repite luego de la búsqueda aleatoria inicial. Como puede observarse en la Fig. 5, se comienza una nueva fase de búsquedas en una ventana de dominio restringido, próxima a las mejores soluciones obtenidas de la fase anterior. Siendo el nuevo intervalo de búsqueda definido por el factor de restricción (δ), según las Ec(s) (11-12). Las nuevas fases se producen hasta que se alcanza el criterio de parada definido, conforme la Ec (8).

$$\zeta_{iL} = \zeta_{iL}^* + \delta \cdot \zeta_{iL}^* \tag{11}$$

$$\zeta_{iH} = \zeta_{iH}^* - \delta \cdot \zeta_{iH}^* \tag{12}$$

4.4. Método de Estimativa de Parámetros Levenberg-Marquardt (LM)

De acuerdo con (Ozisk, 2018), en este método se busca obtener una diferencia cuadrática mínima a través de una función objetivo (FO) escrita en la forma matricial, Ec (13).

$$\mathbf{FO}(\mathbf{P}^k) = [\mathbf{Y}_{\text{exp}} - \mathbf{Y}_{\mathbf{P}^k}]^T \cdot [\mathbf{Y}_{\text{exp}} - \mathbf{Y}_{\mathbf{P}^k}] \tag{13}$$

El vector de parámetros se obtiene por medio de iteraciones, según se muestra en la Ec (14).

$$\mathbf{P}^{k+1} = \mathbf{P}^k + (\mathbf{J}^T \cdot \mathbf{J} + \mu^k \cdot \mathbf{\Omega}^k)^{-1} \cdot \mathbf{J}^T(\mathbf{Y}_{\text{exp}} - \mathbf{Y}_{\mathbf{P}^k}) \tag{14}$$

\mathbf{P}^k = vector de parámetros desconocidos, que serán estimados;

$\mathbf{Y}_{\mathbf{P}^k}$ = valores estimados, problema directo;

Y_{exp} = valores medidos, problema inverso;

J = es la matriz Jacobiana denominada matriz de sensibilidad;

k = número de iteraciones;

μ^k = factor de amortiguamiento;

Ω^k = diagonal de $J^T J$;

$$\Delta P \cdot (J^T \cdot J + \mu^k \cdot \Omega^k) = J^T (Y_{exp} - Y_{P^k}) \quad (15)$$

$$P^{k+1} = P^k + \Delta P \quad (16)$$

Además, según (Ozisk, 2018), los términos μ^k y Ω^k son esenciales para el proceso iterativo, ya que tienden a disminuir los efectos de mal acondicionamiento del problema inverso. Luego, en el punto en que el problema tiende a estar mejor condicionado, el valor de μ^k tiende a cero.

Resolviendo el problema directo en forma iterativa, se pueden estimar los parámetros desconocidos. Para ello hay que resolver el sistema de ecuaciones, el número de ecuaciones dependen de la cantidad de parámetros buscados, de acuerdo con la Ec (15). En este trabajo se resuelve el sistema de ecuaciones utilizando el método de Gauss. Una vez obtenido el ΔP , es decir una variación de los parámetros, se pueden estimar los nuevos valores, según la Ec (16). Estos se evalúan nuevamente en el problema directo y se comparan con la FO hasta alcanzar el criterio de parada definido, conforme la Ec (8).

5. RESULTADOS

Las simulaciones del modelo, en términos de dominio del tiempo, son obtenidas usando el software R2018 Matlab/Simulink®. Para el método R2W se consideró una población de 50 elementos. Se adoptó un paso de integración de 0,01 segundos, debido a que los sensores fueron calibrados con una tasa de medición de 100 Hz y el tiempo de simulación utilizado fue de 18 segundos, tiempo necesario para que el vehículo traspase completamente los obstáculos.

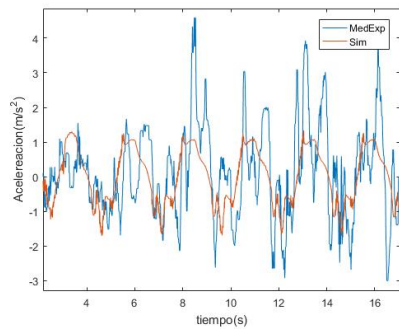
En la Fig. 6 se presenta la comparación de las curvas experimentales y de simulación de la aceleración vertical sobre el eje 1 del M113 A1 (a) y para la versión M113 A2 (b), la aceleración vertical en el CG del M113 A1 (c) y para la versión M113 A2 (d) y la aceleración vertical sobre el eje 5 del M113 A1 (e) y para la versión M113 A2 (f).

En la Fig. 7 se presentan las curvas de desplazamiento lineal del amortiguador de la primera rueda del M113 A1 (a) y para la versión M113 A2 (b) y de la quinta rueda en la del M113 A1 (c) y para la versión M113 A2 (d).

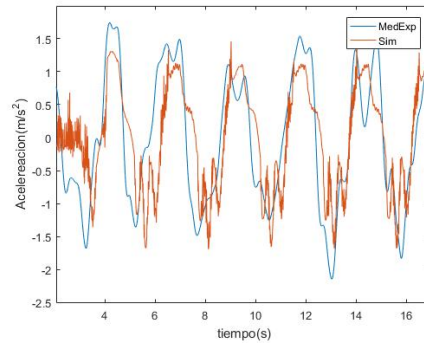
Parámetro	R2W-A1	LM-A1	R2W-A2	LM-A2
Factor	1.2547	1.3852	0.8143	0.8055
FCM	0.8486	0.8015	0.7458	0.7344
FCA	0.6967	0.6698	0.6191	0.5999
Función Objetivo	0.04245	0.03945	0.003362	0.002963

Tabla 2: Resultado de la estimación de los parámetros.

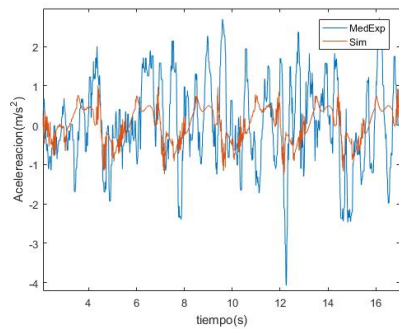
Los resultados obtenidos para el factor de corrección de la geometría de la suspensión, el factor de corrección de la rigidez del muelle, el factor de corrección del amortiguador de la



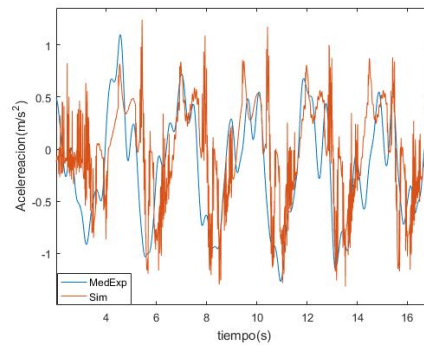
(a) AV en el 1er eje del M113 A1



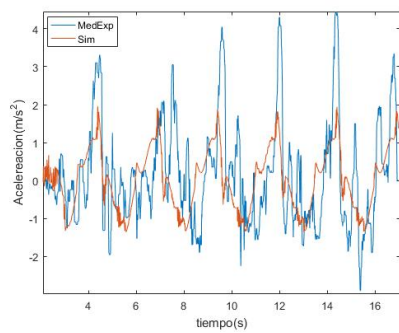
(b) AV en el 1er eje del M113 A2



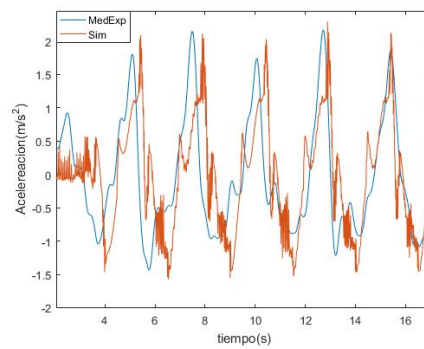
(c) AV en el CG del M113 A1



(d) AV en el CG del M113 A2



(e) AV en el 5to eje M113 A1



(f) AV en el 5to eje M113 A2

Figura 6: Aceleración vertical (AV)

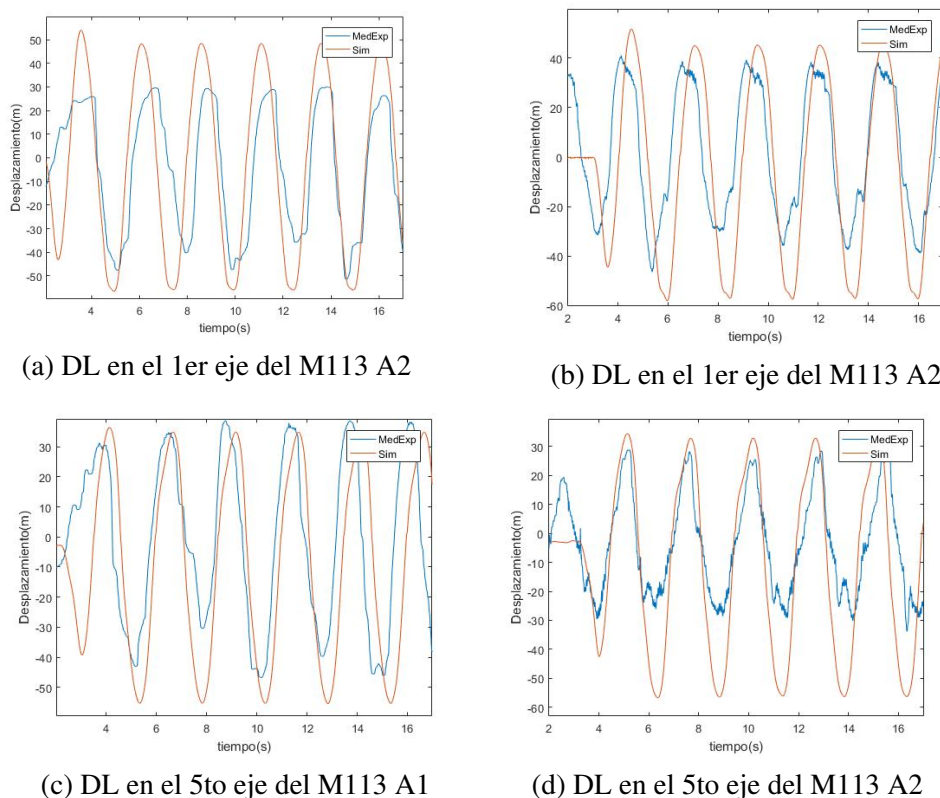


Figura 7: Desplazamiento lineal (DL)

suspensión y el valor de la función objetivo de cada algoritmo y de cada modelo analizado son presentados en la Tabla 2.

6. CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos en la versión M113A1 presentaron un desvío mucho mayor en relación a los resultados obtenidos en la versión M113A2. Esto es debido al mayor nivel de ruido en la versión A1. Cabe aclarar que se utilizó la misma frecuencia de corte durante el filtrado de las señales obtenidas en las mediciones para poder comparar los resultados.

La marcada disminución de las vibraciones y de las aceleraciones verticales entre la versión A1 y la versión A2 quedó demostrada.

Para este trabajo se consideró la velocidad de desplazamiento constante, pero esto no fue posible llevarlo a cabo durante las mediciones experimentales y al no considerar la dinámica longitudinal se incrementa considerablemente el error, por lo cual se deberá considerar este punto para trabajos futuros.

El algoritmo estocástico utilizado tuvo un mayor costo computacional pero la convergencia del algoritmo es independiente de los valores iniciales. El caso contrario ocurre con el algoritmo determinístico empleado aunque este logró una mayor minimización de la función objetivo elegida.

AGRADECIMIENTOS

Los autores expresan su agradecimiento a Héctor Correa, Jorge Reula, Pablo Mari Thomsem y Leandro Sinagra, pertenecientes al laboratorio de simulación numérica (SicanLab) de la

Facultad de Ingeniería del Ejército (FIE), por su colaboración en los ensayos de campo y al personal del Ejército Argentino que permitió llevar adelante este proyecto.

REFERENCIAS

- Ata W. y Oyadiji S. An investigation into the effect of suspension configurations on the performance of tracked vehicles traversing bump terrains. *Vehicle System Dynamics*, 52(7):969–991, 2014.
- Bihain A.L.J., Câmara L.D.T., y Silva Neto A. Avaliação da rotina inversa r2w na estimação de parâmetros de transferência de massa no processo de adsorção de glicose e frutose. *TEMA (São Carlos)*, 13(3):277–289, 2012.
- Costa Neto R. Modelagem e integração dos mecanismos de suspensão e direção de veículos terrestres através do fluxo de potência. *portuguese, Pontifical Catholic University, Department of Mechanical Engineering, Doctoral dissertation, Rio de Janeiro, Brazil*, 2008.
- Haug E.J. *Computer aided kinematics and dynamics of mechanical systems*, volumen 1. Allyn and Bacon Boston, 1989.
- Ozisik M.N. *Inverse heat transfer: fundamentals and applications*. Routledge, 2018.