

DIAGNÓSTICO DE FALLAS EN SUSPENSIONES ACTIVAS DE AUTOMÓVILES SOBRE MODELOS BOND GRAPH

Matías A. Nacusse, Guillermo J. Pierucci, Sergio J. Junco*, Mónica E. Romero

Departamento de Electrónica; Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura; Universidad Nacional de Rosario; Ríobamba 245 Bis, S2000EKE Rosario, Argentina.

* *sjunco@fceia.unr.edu.ar*

Palabras Clave: Suspensión de Vehículos, Diagnóstico de Fallas, Redundancias Analíticas, Bond Graph de Diagnóstico.

Resumen. Este artículo aborda el problema de detección, aislamiento y caracterización de fallas en suspensiones activas modeladas con el formalismo Bond Graph (BG). La técnica de las Relaciones Analíticas Redundantes (ARR) aplicada sobre el BG de Diagnóstico (DBG) asociado a un modelo de catorce grados de libertad de un automóvil es la herramienta básica usada para resolver el problema de diagnosticar fallas en amortiguador, resorte y actuador controlado de cada una de las cuatro suspensiones del vehículo. La posterior correlación de los residuos generados por las ARR con las magnitudes medidas del sistema permite reducir el número de sensores en relación con los resultados de un trabajo previo, aislar fallas no simultáneas en cada uno de los componentes y estimar el valor del parámetro característico de cada falla. Realimentando el valor de este último en el modelo DBG se puede detectar y aislar una nueva falla, con lo que se obtiene una técnica FDI (Fault Detection and Isolation) apta para diagnosticar fallas múltiples de aparición sucesiva. Los resultados presentados se ilustran con gráficas de simulación obtenidas con el software 20simTM que permite la especificación directa del problema en el dominio BG.

1 INTRODUCCIÓN

Desde hace ya más de una década se dedica un importante esfuerzo al desarrollo de sistemas FDI para diagnóstico y aislamiento de fallas de sistemas complejos (Venkatasubramanian et al. (2003)). El objetivo es lograr su funcionamiento en condiciones seguras, económicamente aceptables y de bajo impacto ambiental. Entre los métodos más usados para generar sistemas FDI se destacan los basados en modelos (Frank (1990)). Los importantes avances teóricos en la comprensión de fenómenos dinámicos y el empleo de potentes técnicas de simulación permiten tanto el análisis exhaustivo off-line de múltiples escenarios de fallas sin poner en riesgo al sistema real como el empleo on-line de los métodos FDI.

Con los métodos basados en modelos se generan indicadores a fin de poder detectar una falla y discriminarla de posibles efectos de incertidumbre y de otras fallas. Los indicadores, conocidos como residuos, surgen de plantear relaciones analíticas redundantes (ARR: Analytical Redundant Relationships) que, en general, son ecuaciones que representan restricciones del sistema expresadas en términos de variables medidas del mismo (Ould Bouamama et al. (2003)). Dichas restricciones contienen parámetros del sistema funcionando en condiciones normales de operación. Si la evaluación del residuo resulta dentro de un umbral alrededor de cero (teniendo en cuenta las incertidumbres en el modelado), el sistema se encuentra funcionando libre de fallas. Si el residuo se aparta de dicho umbral esto indica la presencia de una falla que puede ser el apartamiento de algún parámetro de su valor nominal o bien la alteración de alguna restricción involucrada en el residuo.

En este trabajo se presenta un sistema FDI para suspensiones activas de vehículos automotrices utilizando el formalismo BG (Karnopp et al. (2000), Cellier (1991)). A partir de un modelo BG del sistema se construye un DBG que implementa las ARR necesarias. Se utiliza el modelo desarrollado en Silva et al.(2007) (inspirado en Filippini.(2005), Mera et al. (2003), Niesner et al. (2005)) que trata el problema con suspensiones pasivas. El aporte principal de este trabajo, además del agregado de elementos activos a la suspensión, es la eliminación de un sensor en cada suspensión con la consiguiente reducción de costo y el procesamiento de la señal de residuo que permite aislar las fallas en los diferentes elementos de la suspensión. Además de la detección y aislamiento de la falla con el mismo tratamiento es posible calcular su magnitud e inyectarla en el DBG de modo de reinicializar el sistema FDI y dejarlo operativo para detectar fallas posteriores. Otra posibilidad es recalcular el controlador de la parte activa de modo que resulte un esquema tolerante a fallas.

La Sección 2 presenta algunos resultados previos. Luego, la Sección 3, introduce el método desarrollado sobre un modelo de cuarto de auto con dos sensores de velocidad lo cual provee un solo residuo. Este residuo es suficiente para detectar fallas en todos los elementos constitutivos de la suspensión pero no lo es para aislar el elemento que está fallando. Para superar esta limitación se procesa la señal de residuo de modo tal que se logra además obtener la magnitud de la falla. Con este valor se reinicializa el DBG a fin de poder detectar nuevas fallas como así también recalcular los parámetros del controlador de la parte activa. Una etapa posterior e inmediata es la extensión de esta técnica al modelo de medio auto con las mismas características de funcionamiento y flexibilidad del sistema FDI para detectar fallas sucesivas.

La extensión del método al modelo completo del automóvil, donde se presentan algunos problemas de indeterminación en los residuos que hace que los mismos se activen sin la presencia de elementos que fallan, se hace en la Sección 4. Aquí se generan nuevos residuos, que son combinaciones lineales de los originales, y se construye una matriz de firma de fallas (FSM: Fault Signature Matrix) que permite superar el problema de la indeterminación. Esta FSM permite detectar y aislar fallas simultáneas de hasta dos suspensiones. Una vez detectada

la falla se procesan las señales de residuo originales involucradas de modo de aislar el elemento fallado y reinicializar el DBG para detectar nuevas fallas.

En la Sección 5 se presentan los resultados de simulación que muestran el buen desempeño del sistema FDI propuesto y en la Sección 6 las conclusiones del trabajo.

2 RESULTADOS PREVIOS: FDI DE SUSPENSIONES PASIVAS CON RESIDUOS DERIVADOS DE ARR MEDIANTE LA TECNICA DBG

La [Figura 1](#) muestra un típico esquema FDI basado en modelo, donde el tratamiento del modelo matemático MM consistente en la obtención de un conjunto de ARRs, permite diagnosticar la(s) falla(s) en el sistema. Una ARR es un (sub)modelo que puesto sólo en términos de variables medidas e igualado a cero expresa la condición normal de operación del sistema. Un residuo es la desviación de la ARR debido a una falla.

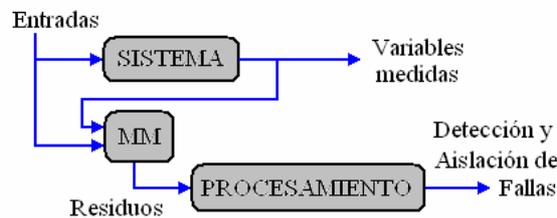


Figura 1. Esquema general de métodos FDI basados en modelos.

2.1 FDI con modelo de cuarto de vehículo

ARRs, Residuos y Fallas: Sea el problema de diagnosticar fallas en el amortiguador y el resorte de la suspensión pasiva del modelo de cuarto de vehículo de la [Figura 2a](#) ([Silva et al.\(2007\)](#), [Karnopp et al. \(2000\)](#)), donde se miden dos velocidades y una fuerza, según indicado. En este ejemplo, el vínculo 1 asociado a V_2 provee la *ARR1* (1) y el residuo asociado *Res1* (2), que no es otra cosa que el balance dinámico de fuerzas sobre la masa suspendida m_2 , de lectura inmediata sobre el BG causalizado de la [Figura 2b](#). El residuo se parametriza con los valores nominales de sus coeficientes $\overline{m_2}$ y $\overline{B_s}$, y se evalúa usando las mediciones V_1 , V_2 y F_{K_s} . En condiciones nominales *Res1* vale cero y se desvía de cero ante un valor del coeficiente B_s distinto del nominal (en todo este trabajo se suponen conocidos todos los valores asociados a las inercias, en este caso el de la masa suspendida m_2). Debido a errores de modelado, medición y procesamiento de los datos, el residuo no se anula exactamente sino que se mantiene dentro de un umbral en torno a cero y se desvía de dicho entorno ante un cambio en B_s . De este modo, con este residuo se puede detectar una falla en el amortiguador. Obsérvese que, dimensionalmente, los términos de *Res1* son esfuerzos generalizados, mientras que la variable medida V_2 es un flujo generalizado, es decir, una covariable de potencia de aquellos.

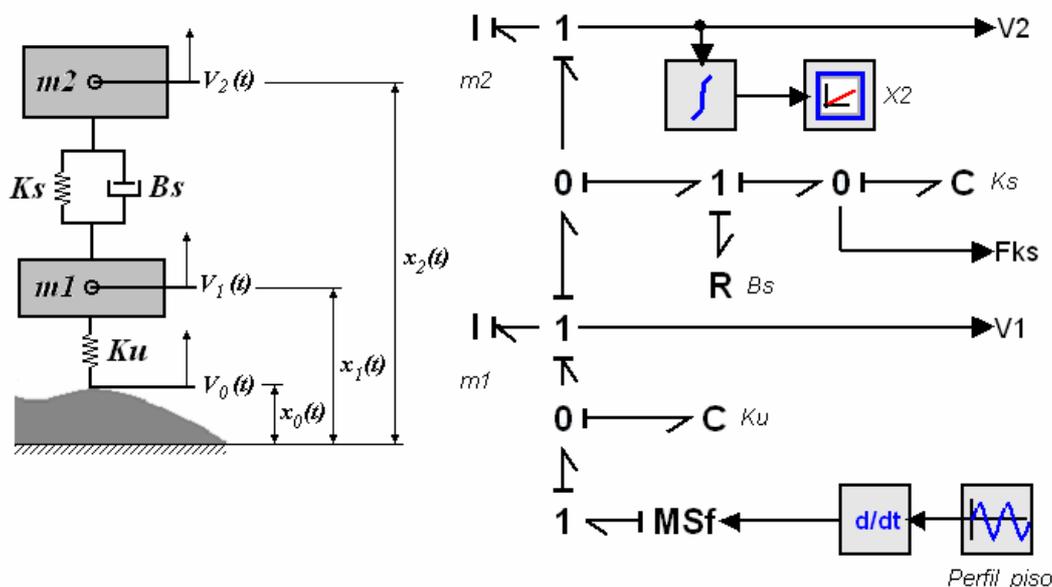


Figura 2. Modelos de cuarto de auto. a) Esquema Físico, b) Bond Graph.

$$m_2 \dot{V}_2 - F_{Ks} - B_s(V_1 - V_2) = 0 \quad (1)$$

$$Res1 = \bar{m}_2 \dot{V}_2 - F_{Ks} - \bar{B}_s(V_1 - V_2) \quad (2)$$

Diagnostic Bond Graph. En el dominio BG los residuos son calculados por el así llamado DBG, que es un BG de la planta al cual se inyectan las señales medidas vía fuentes moduladas. En general esto fuerza causalidad derivativa en todos los almacenadores de energía del DBG, lo que es conveniente porque no se necesita inicializar ningún estado en su evaluación mediante simulación (Medjaher et al. (2005), Izquierdo et al. (1995)). Esta técnica se ilustra con el DBG de la Figura 3, que para generar el residuo $Res1$ usa sólo un submodelo del BG de la Figura 2. En efecto, al medirse la velocidad V_1 de la rueda, los submodelos de la rueda y del piso son innecesarios a los fines de diagnosticar fallas en la suspensión.

Los residuos $Res1$ (2) y $Res2$ (3) se capturan directamente de sendos vínculos pasantes del DBG con las convenciones usuales de toma de información sobre los BGs. Esto es posible porque cada residuo es la covariable de potencia asociada a la variable medida e inyectada en el DBG por cada fuente modulada. La velocidad asociada al vínculo tipo 1 adyacente a la fuente $MSf:F_{Ks}$ es a la vez $Res2$ y covariable de potencia de la fuerza medida. Análogamente, el esfuerzo asociado al vínculo tipo 0 adyacente a la fuente $MSf:V_2$ es a la vez $Res1$ y covariable de potencia de la velocidad medida.

$$Res2 = (1/K_s) \cdot \dot{F}_{Ks} + V_2 - V_1 \quad (3)$$

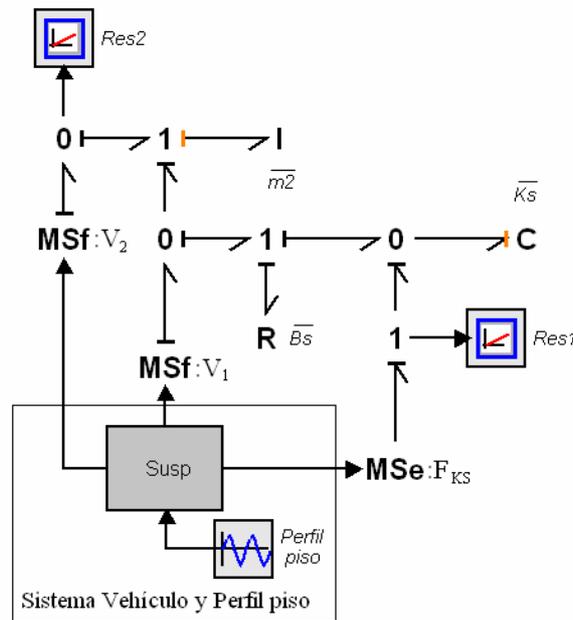


Figura 3. DBG del modelo de cuarto de auto.

Fault Signature Matrix. La presencia de sólo K_s en *Res2* indica su capacidad de detectar una falla en el resorte pero no en el amortiguador, mientras que lo opuesto ocurre en el *Res1*, debido a que sólo es parametrizado por B_s . De esta forma, las condiciones de *Monitorability* (Mb) e *Isolability* (Ib) de ambas fallas son satisfechas, lo cual se muestra en la FSM de la Tabla 1.

Tabla 1. *Fault Signature Matrix* para Suspensión Cuarto de Vehículo.

Componente	Res1	Res2	Mb	Ib
K_s	1	0	1	1
B_s	0	1	1	1

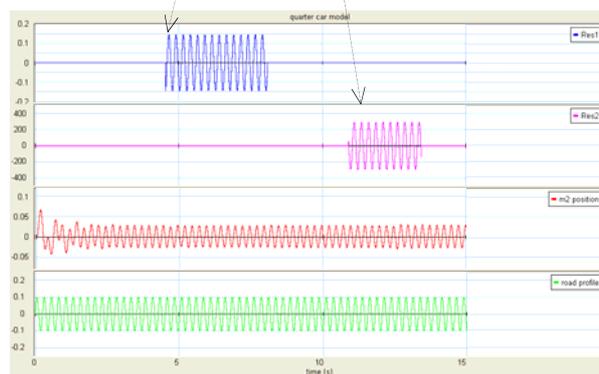


Figura. 4: Evolución de las señales de residuos *Res1* y *Res2*

La **Figura 4** muestra los resultados de simular fallas en la suspensión pasiva del vehículo con un perfil senoidal de suelo. En lugar del sistema real vehículo-piso se empleó el modelo BG de la **Figura 2** del cual se obtuvieron las “mediciones” que alimentan al DBG de la **Figura 3**. La simulación comienza en condiciones de operación normal, luego se produce un decremento del 5% en el valor de la constante K_s y luego un incremento del 5% en el valor de B_s para terminar con operación normal. Sobre la gráfica se observa la FSM del modelo (Tabla 1) y la correspondencia con la evolución temporal de los residuos.

2.2 FDI para modelo de vehículo con cuatro ruedas

La subsección anterior, tomada de (Silva et al.(2007)), sirve al propósito de introducir sobre un problema simple los fundamentos de la FDI basado en el método de las ARRr implementado sobre modelos BG y DBG, y así dar cierto carácter autocontenido a este trabajo. En general, un esquema completo de FDI incluye otros componentes tales como observadores de variables no medibles directamente (Frank (1990)), umbrales adaptables en los residuos para excluir desviaciones debidas a incertidumbres de modelado y/o medición (Shi et al. (2005)), etc.

En el mismo trabajo (Silva et al.(2007)) citado, el resultado anterior ha sido extendido a un sistema para diagnóstico de fallas en suspensiones pasivas sobre un modelo BG completo de un vehículo de 4 ruedas. En el presente artículo se retoma ese trabajo y se lo reformula con el fin de eliminar algunas mediciones allí necesarias y extenderlo al diagnóstico de fallas de suspensiones activas y al diseño de control tolerante a fallas.

3 FDI EN SUSENSIONES ACTIVAS SOBRE MODELOS DE CUARTO Y MEDIO VEHÍCULO

3.1 FDI con modelo de cuarto de vehículo

La Figura 5 muestra el modelo de la suspensión activa de un cuarto de auto, que difiere del presentado en la Figura 2 porque incluye el actuador que provee la fuerza controlada F_A y elimina la medición de la fuerza elástica del resorte. La ARR1 y el residuo $Res1$ se escriben ahora según (4) y (5), donde el término integral reemplaza a la fuerza antes medida y el $Res2$ no existe. En efecto, no se puede escribir como en (3) debido a que no se mide F_{KS} , careciendo además de sentido reemplazar la derivada de F_{KS} en términos de las variables medidas ya que eso conduce a una identidad. Se tiene entonces un único residuo con el cual se pretende diagnosticar las tres fallas posibles de la suspensión: en el amortiguador, en el resorte y en el actuador. Las dos primeras entendidas como la desviación del valor nominal de sus respectivos parámetros, la tercera como el apartamiento del valor de la fuerza F_A respecto al valor calculado por el controlador del actuador.

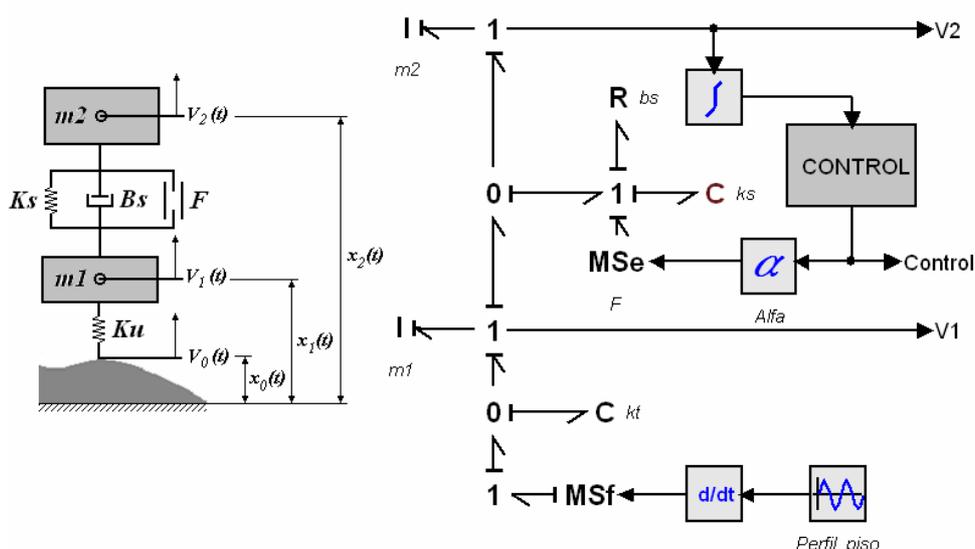


Figura 5. Cuarto de auto con suspension activa. a) Esquema Físico, b) Bond Graph.

$$m_2 \frac{dV_2}{dt} - B_S (V_1 - V_2) + K_S \int (V_1 - V_2) dt + F_A = 0 \quad (4)$$

$$Res1 = m_2 \frac{dV_2}{dt} - \bar{B}_S (V_1 - V_2) + \bar{K}_S \int (V_1 - V_2) dt + \bar{F}_A \quad (5)$$

Detección de las fallas. La Figura 6 muestra el DBG correspondiente al modelo de Figura 5. Es inmediato observar que una falla en cualquiera de los tres componentes de la suspensión excita al residuo (5), por lo que las tres son detectables, como se ilustra con las simulaciones de la Figura 7.

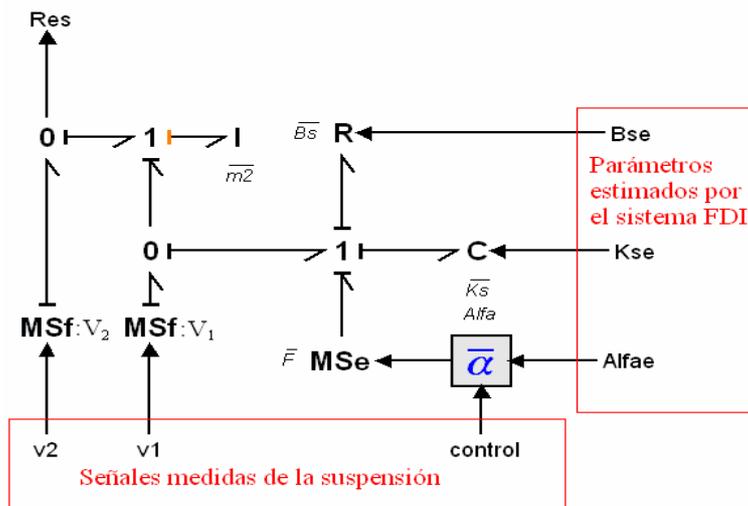


Figura 6. DBG para cuarto de auto con suspensión activa.

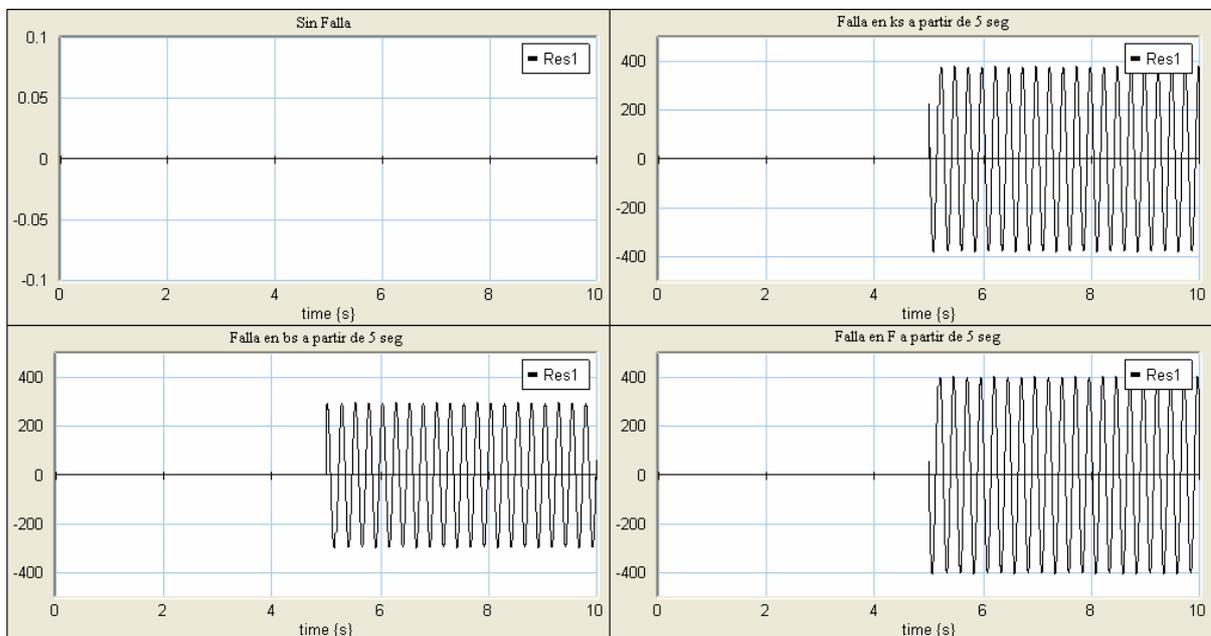


Figura 7. Evolución del residuo para distintas fallas en los elementos de la suspensión activa.

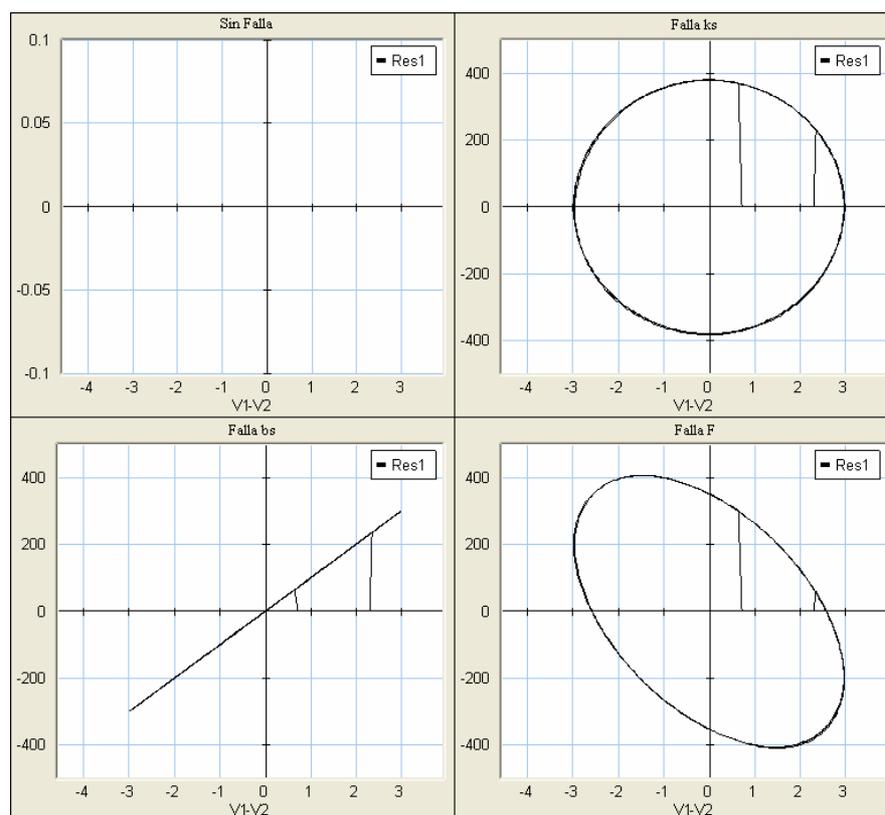


Figura 8. $Res1$ vs $(V_1 - V_2)$ aisla falla en amortiguador (B_S)

Aislación de las fallas. La Figura 7 muestra también que si bien es posible detectar todas las fallas, no es posible aislar una falla con el simple recurso de la FSM, ya que el residuo está activo en todos los casos. Restando (4) de (5) se obtiene la expresión alternativa (6) para el residuo, que muestra su dependencia lineal respecto de las desviaciones de los parámetros y de la fuerza F_A . Esta ecuación indica que, mediando la ocurrencia mutuamente excluyente de las fallas, éstas pueden aislarse individualmente mediante el procesamiento numérico del residuo con las diferencias de velocidades (aisla falla en amortiguador), de desplazamientos (falla en resorte), y de fuerzas del actuador. En efecto, para cada falla solo uno de los tres términos que componen el residuo es distinto de cero, con lo que solo una de las tres gráficas “ $Res1$ vs Variable diferencial” será una recta (aproximadamente, debido a las perturbaciones e incertidumbres ya mencionadas). En las Figuras 8, 9 y 10 se grafica la señal de residuo en función de la diferencia de velocidades ($V_1 - V_2$), del desplazamiento del resorte o de la integral de la diferencia de velocidades $\int (V_1 - V_2) dt$ y de la señal de control, de modo de poner en evidencia el componente que está fallando. En la Figura 8 se observa que cuando falla el amortiguador, la señal de residuo compone una recta respecto a la diferencia de velocidades. En la Figura 9 se observa que cuando falla el resorte la señal de residuo compone una recta respecto de la integral de las velocidades. Finalmente, la Figura 10 indica que la recta se compone respecto de la señal de control cuando falla el actuador. En estas figuras las abscisas provienen de las mediciones y las ordenadas de la simulación on-line del DBG de Figura 6.

$$Res1 = (\bar{B}_S - B_S)(V_1 - V_2) + (\bar{K}_S - K_S) \int (V_1 - V_2) dt + (\bar{F}_A - F_A) \quad (6)$$

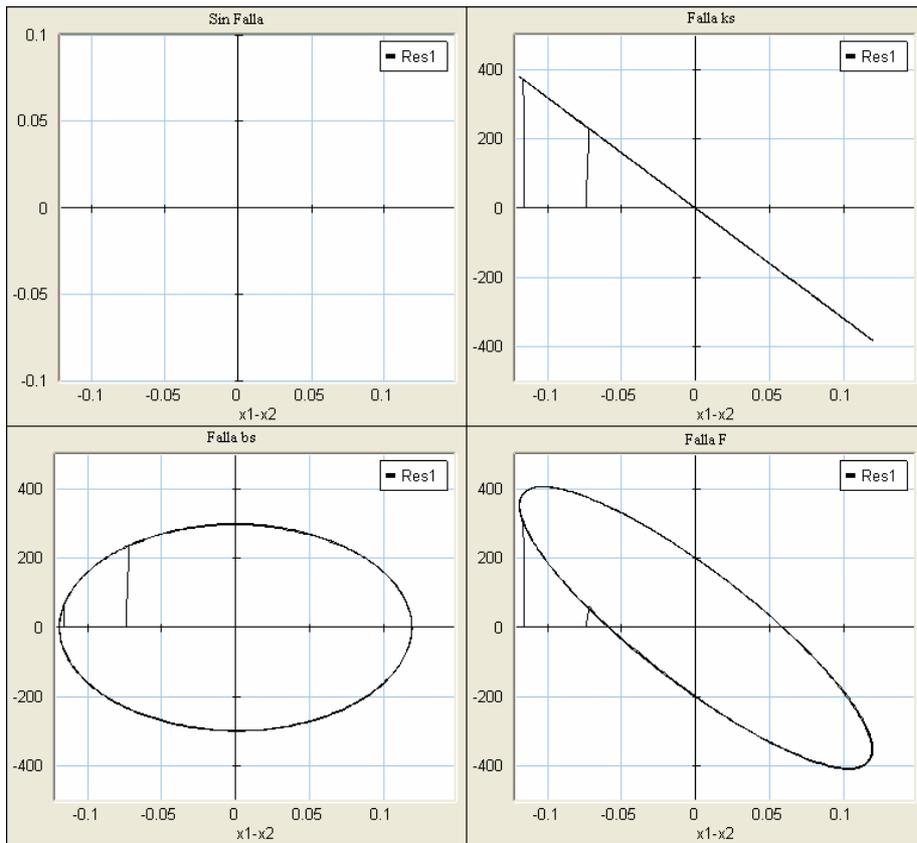


Figura 9. $Res1$ vs (X_1-X_2) aisla falla en resorte (K_S)

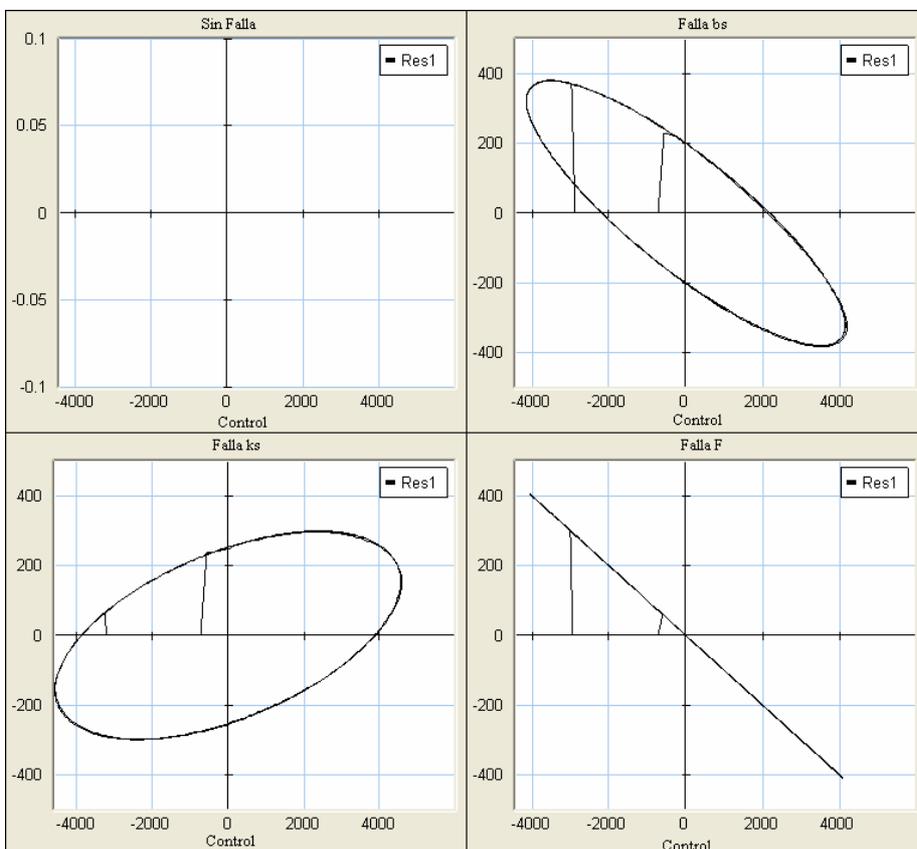


Figura 10. $Res1$ vs F_A , aisla falla en actuador (F_A)

Estimación de los parámetros de las fallas. Una vez aislada la falla, de la ecuación (6) se puede despejar el valor en falla de su parámetro característico, según las fórmulas dadas en las ecuaciones (7). El coeficiente α surge de representar al valor en falla de F_A como la siguiente proporción de su valor nominal: $F_A = \alpha \bar{F}_A$.

$$K_s = \bar{K}_s - \frac{\text{Re } s1}{\int (V_1 - V_2) dt}$$

$$B_s = \bar{B}_s - \frac{\text{Re } s1}{(V_1 - V_2)} \quad (7)$$

$$\alpha = 1 - \frac{\text{Re } s1}{\bar{F}_A}$$

FDI de fallas sucesivas. Una vez estimado el valor del parámetro en falla, se lo reemplaza en el DBG, con lo que el residuo vuelve a anularse. Esta simple operación deja al sistema habilitado para detectar una nueva falla en cualquiera de los componentes de la suspensión.

Control tolerante a fallas. En principio es posible recalcular el controlador para los nuevos parámetros del sistema, con lo que se puede obtener un controlador adaptable tolerante a las fallas en los componentes pasivos de la suspensión.

Sistema FDI. En base a los principios anteriormente expuestos se diseña el sistema FDI de la Figura 11. El bloque “*Susp_cuarto*” se corresponde con el modelo del cuarto de auto de la Figura 5. El bloque “*Prom_res1*” calcula una media móvil del valor absoluto del residuo generado por el “*DBG*” con el fin de evitar falsas detecciones de ausencia de falla cuando la trayectoria del residuo pasa por cero. A continuación el bloque llamado “*Detector_de_Falla*”, que contiene el valor del umbral de decisión, es el encargado de denunciar la existencia de una falla en la suspensión. Por último el “*Analizador_de_Falla*” se encarga de determinar cuál es el componente que falla y estima su magnitud, la cual es utilizada para actualizar los parámetros del “*DBG*”, lo que anula el residuo y permite la detección de una nueva falla en cualquiera de los componentes.

Según puede verse en la Figura 6, al eliminarse la fuente de esfuerzo modulada por la señal del sensor de esfuerzo del resorte, el capacitor C queda en causalidad integral, por lo que es necesario conocer su condición inicial en la simulación del DBG, a fin de evitar falsas alarmas. Soluciones alternativas de este problema son el empleo de un observador o la medición de los desplazamientos en vez de las velocidades, las cuales se obtendrían por derivación temporal on-line de las mediciones.

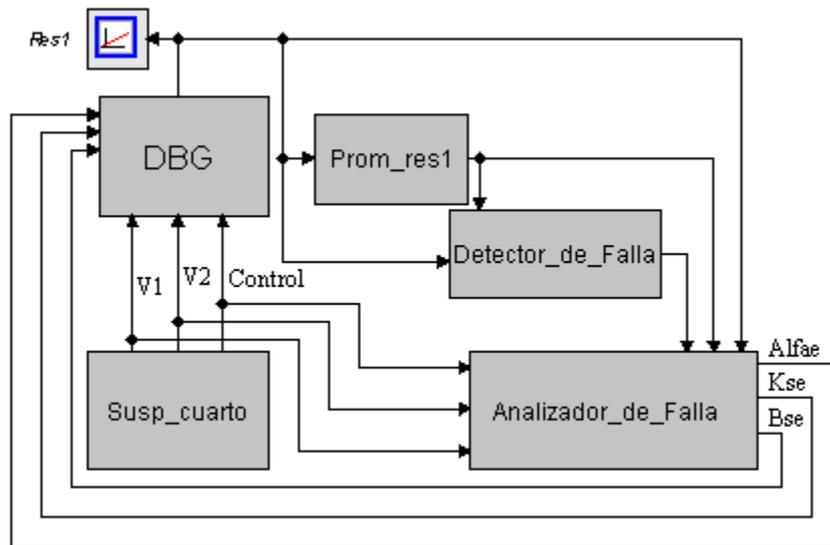


Figura 11. FDI para suspensión activa de cuarto de auto

3.2 FDI con modelo de medio vehículo

La Figura 12 muestra el esquema físico y el BG del modelo de medio vehículo. Las variables indicadas V_{2c1} y V_{2c2} son las velocidades de verticales delantera y trasera, respectivamente. Las inercias $I:J$ e $I:M$ son el momento de inercia y la masa suspendida del vehículo.

Usando la misma instrumentación que en el caso anterior, es decir, un par de sensores de velocidad por cada suspensión, el problema FDI se resuelve con la simple extensión del método hasta aquí presentado. El DBG de la Figura 13 muestra la generación de ambos residuos. Las ecuaciones correspondientes a cada uno de ellos son similares a la (5), con la diferencia de que el término $m_2 dV_2/dt$ debe ser reemplazado por la manifestación sobre cada vínculo I asociado a las velocidades de cabeceo de las fuerzas inerciales debidas a las aceleraciones angular y vertical de la masa suspendida. En el DBG las inercias $I:J$ e $I:M$ en causalidad derivativa generan estas fuerzas que se propagan vía la causalidad automáticamente hasta los vínculos I referidos, donde se hace el balance de fuerzas recogido por el θ pasante a fin de calcular cada residuo.

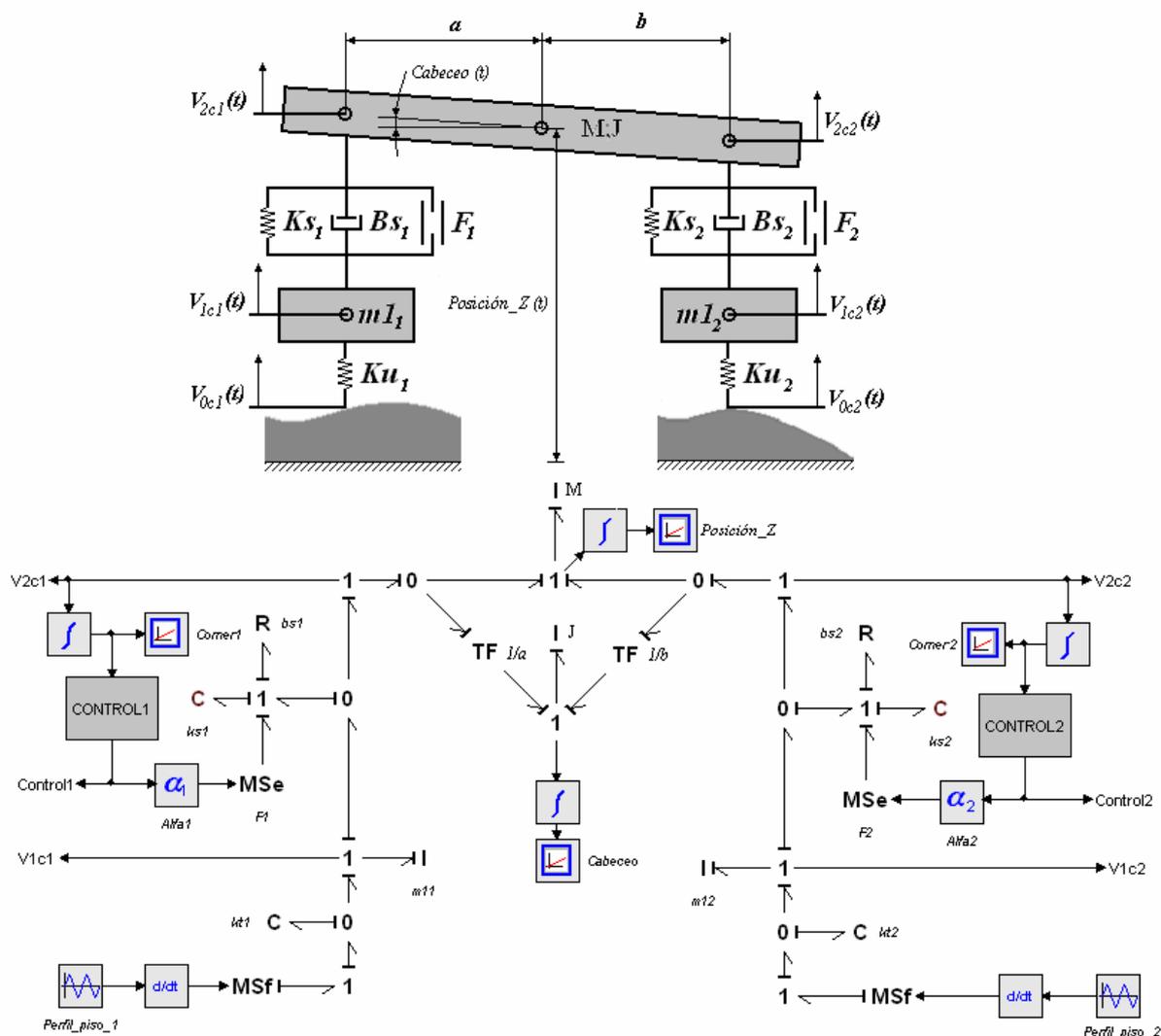


Figura 12. Modelo de medio auto con suspension activa e instrumentación. Parte superior: Esquema Físico. Parte inferior: Bond Graph.

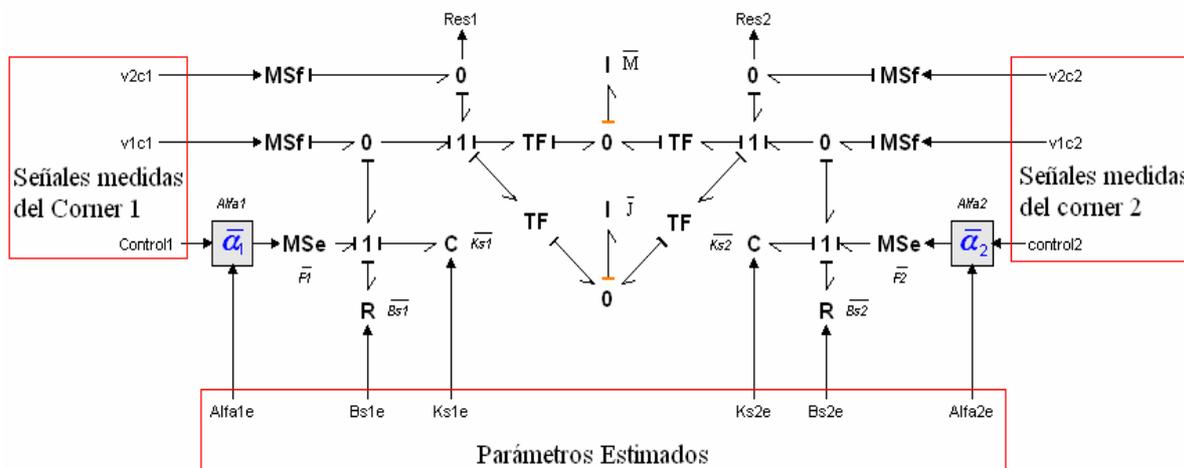


Figura 13. Diagnostic Bond Graph de medio vehiculo.

La Figura 14 muestra el sistema FDI para este caso, que no es otra cosa que la duplicación del descripto en el caso de cuarto de vehiculo.

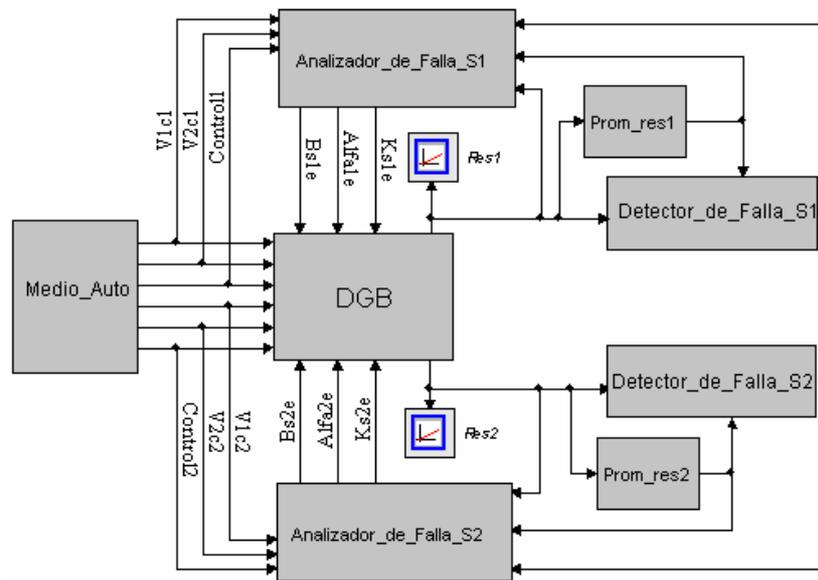


Figura 14. FDI para suspensión activa de medio auto

4 RESULTADO PRINCIPAL: FDI EN SUSPENSIONES ACTIVAS SOBRE MODELO DE VEHÍCULO COMPLETO

El traslado del sistema FDI presentado en la sección anterior al modelo de vehículo que considera las cuatro ruedas requiere algunos elementos complementarios. Se miden dos velocidades por cada suspensión y se forman cuatro residuos. Como se mostró en (Silva et al.(2007)) y se explica más adelante, para este sistema se hace necesario combinar los residuos originales de modo de eliminar cierta indeterminación que conduce a la activación de los residuos sin que se presenten fallas. A este nivel, con el DBG se pueden detectar fallas aisladas y simultáneas de hasta dos suspensiones a la vez. Para lograr la FDI secuencial, la estimación de los parámetros en falla y el control tolerante a fallas, es necesario un segundo procesamiento de los residuos en forma similar al hecho en los casos anteriores. Todas estas etapas se ilustran a continuación, empezando por una descripción del modelo completo de vehículo.

4.1 Modelo completo de vehículo.

Se utiliza el modelo de la Figura 15, que tiene catorce grados de libertad: desplazamiento traslacional (longitudinal, lateral y vertical) y las rotaciones (rolido, cabeceo y guiñada) del cuerpo del automóvil (cuerpo rígido), la rotación de las 4 ruedas y el desplazamiento vertical de las 4 suspensiones. El ángulo de steering, δ , es el mismo para las dos ruedas frontales. Se consideran dos marcos de referencia para expresar el modelo, uno solidario con el centro de masa del cuerpo del auto llamado (x, y, z) y otro marco global (X, Y, Z) fijo a tierra. Las características geométricas así como las fuerzas locales se refieren al marco local mientras que todas las componentes se refieren al global.

El cuerpo tiene masa m_s y momentos de inercia I_{xx} (rolido), I_{yy} (cabeceo) and I_{zz} (guiñada) sobre los ejes x, y, z , respectivamente. Como en la sección anterior, la suspensión está representada mediante un conjunto resorte-amortiguador (K_s, B_s) y una fuerza F_a , representando las partes pasiva y activa, respectivamente. Los parámetros de las ruedas son: masa m_u , momento de inercia I_{ω} , y coeficiente elástico de las ruedas K_t . Para las dinámicas lateral y longitudinal de la interacción entre la rueda y el camino se utilizó el modelo de

Pacejka (Izquierdo et al. (1995)).

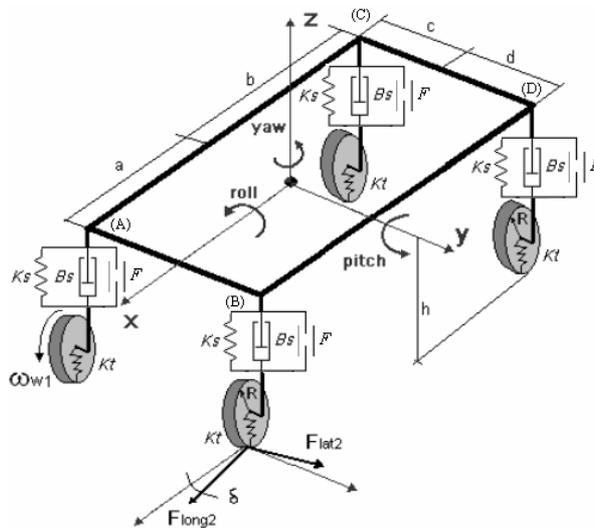


Figura 15. Modelo completo de la suspensión del automóvil

La Figura 16 muestra la representación BG de las ecuaciones de Euler (8), que describen la dinámica de un rígido en el espacio, en este caso aplicadas al chasis del vehículo, (Karnopp et al. (2000)). Las fuerzas $F_{x,y,z}$ y los momentos $T_{x,y,z}$ resultan de los efectos de los subsistemas de suspensión y las ruedas. Cada uno de estos subsistemas es luego modelado decomponiéndolo en los ejes x, y, z , que corresponden a las dinámicas longitudinal, lateral y vertical respectivamente. Para más detalles consultar (Silva et al.(2007)).

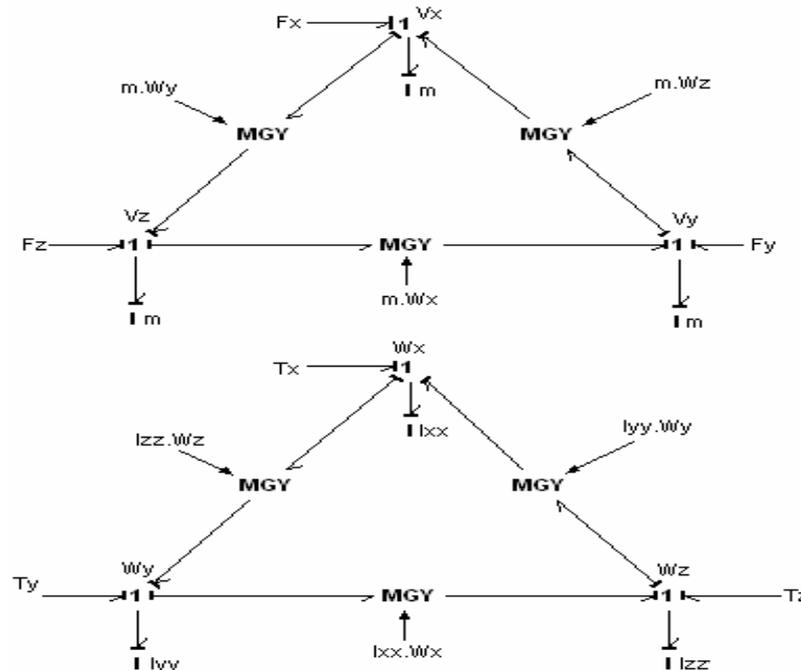


Figura 16. Modelo BG de las ecuaciones de Euler aplicadas al cuerpo del auto.

$$\left. \begin{aligned} F_x &= m\dot{v}_x + m\omega_y v_z - m\omega_z v_y \\ F_y &= m\dot{v}_y + m\omega_z v_x - m\omega_x v_z \\ F_z &= m\dot{v}_z + m\omega_x v_y - m\omega_y v_x \end{aligned} \right\} \text{fuerzas que actúan sobre el cuerpo}$$

$$\left. \begin{aligned} T_x &= I_{xx}\dot{\omega}_x + \omega_y I_{zz}\omega_z - \omega_z I_{yy}\omega_y \\ T_y &= I_{yy}\dot{\omega}_y + \omega_z I_{xx}\omega_x - \omega_x I_{zz}\omega_z \\ T_z &= I_{zz}\dot{\omega}_z + \omega_x I_{yy}\omega_y - \omega_y I_{xx}\omega_x \end{aligned} \right\} \text{torques que actúan sobre el cuerpo}$$

(8)

El BG resultante se muestra en la [Figura 17](#) y es el que se utiliza en la simulación como sistema pasible de fallas. Para obtener el DBG, sólo se usa la parte que describe la dinámica vertical del automóvil dado que es la que contiene los elementos de la suspensión.

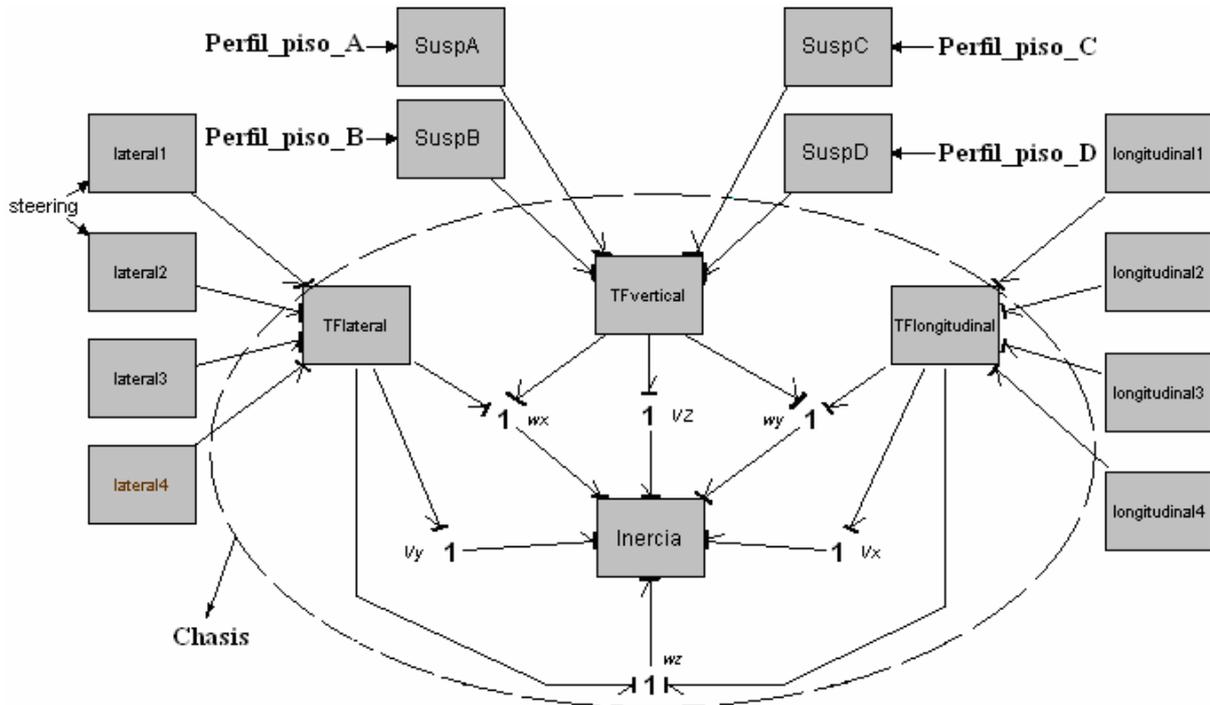


Figura 17. Modelo BG del auto completo.

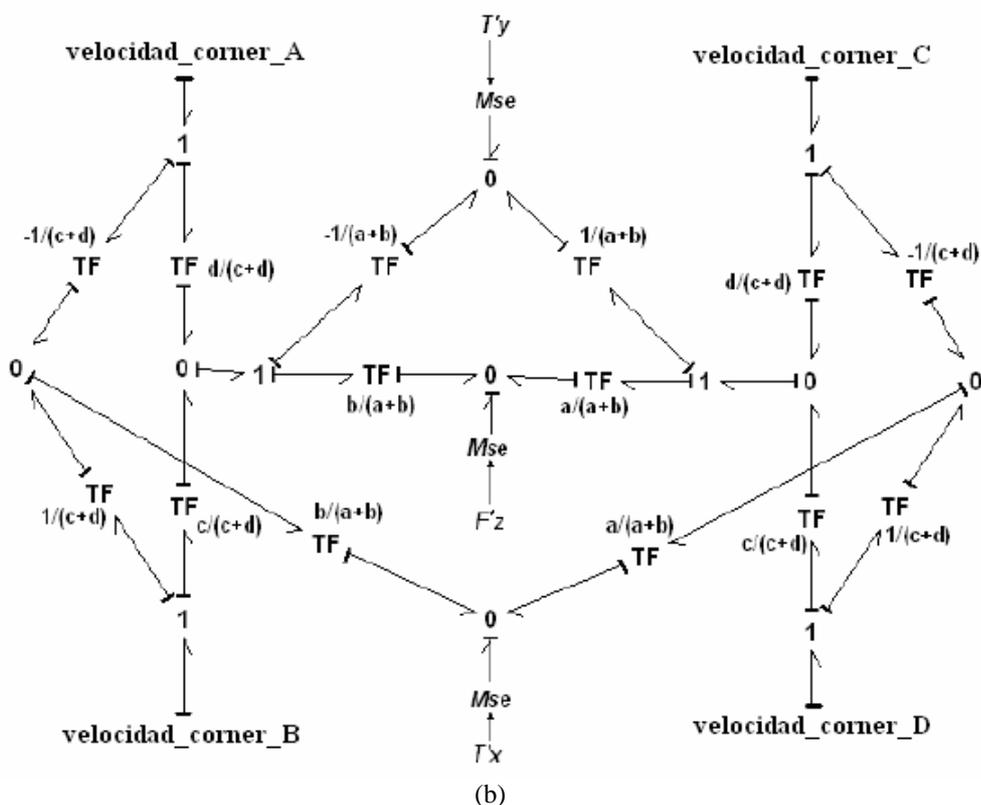
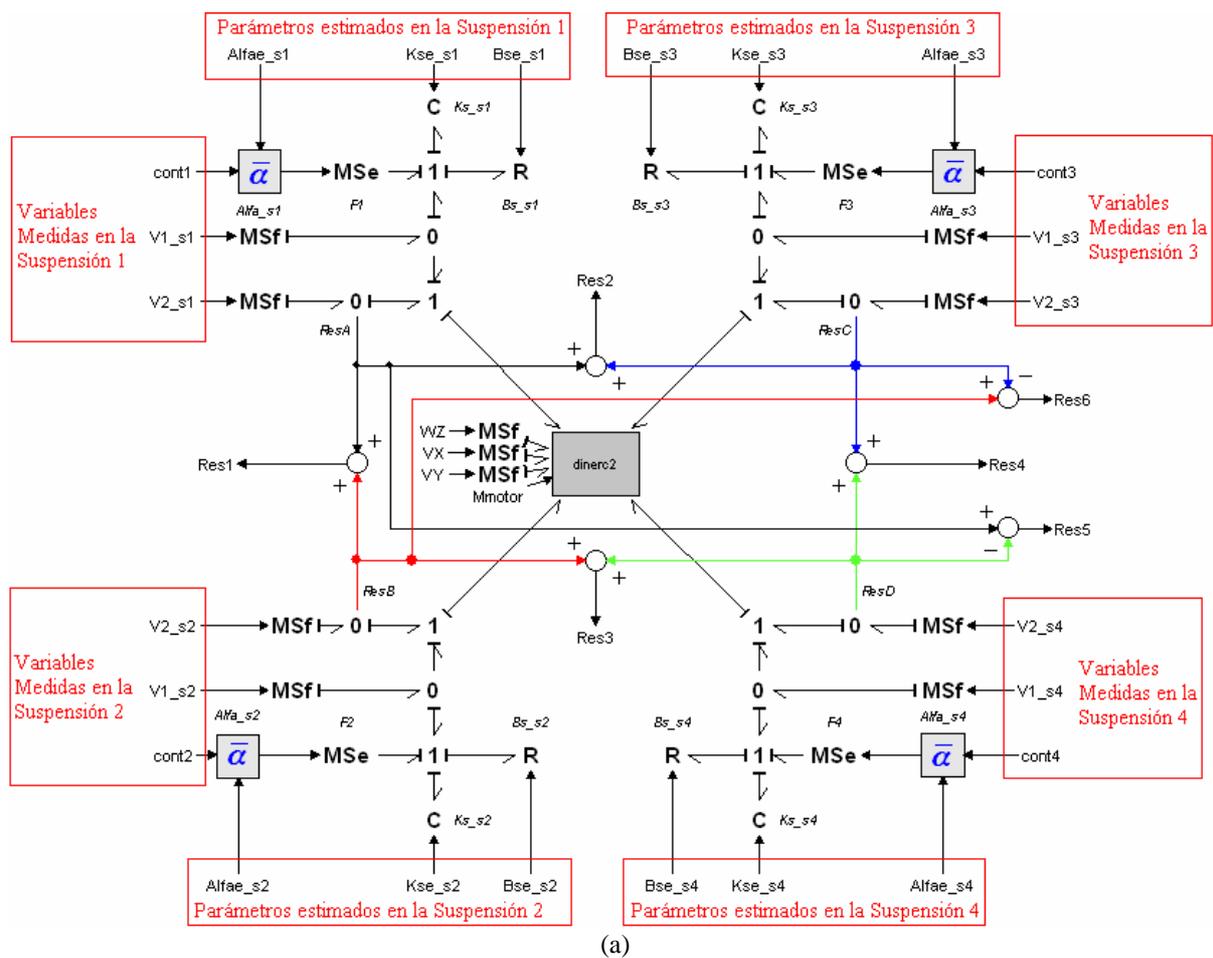


Figura 18. DBG del modelo de cuatro ruedas.

En la Figura 18 (a) se presenta el DBG del sistema completo, cuyo bloque “*dinerc2*” contiene el DBG de la masa suspendida del automóvil, detallado en la Figura 18 (b). Este último se conecta a cuatro DBG de la suspensión activa del cuarto de auto (Figura 6) a través de los puertos señalados como “*velocidad_corner*”. El submodelo de la Figura 18 (b) calcula los esfuerzos en las esquinas del chasis (esfuerzo del vínculo asociado a la masa m_2 dentro del DBG de la Figura 6) a partir de las velocidades correspondientes a dicho vínculo.

Se ingresa con las velocidades de las esquinas del chasis y a partir de estas se calculan los torques T_x , T_y , y el esfuerzo F_z como se indica en (8). Como se puede ver en (9), el cálculo de los cuatro esfuerzos a partir de los torques T_x , T_y y la fuerza F_z , no tiene solución única, ya que cualquier conjunto de esfuerzos K adicionales, que haga cero la sumatoria de aceleraciones de T_y , T_x , F_z , (ver Figura 19), también sería solución del sistema.

$$\begin{aligned} T_x &= (F_{z1} + F_{z3})(-c) + (F_{z2} + F_{z4})d \\ T_y &= (F_{z1} + F_{z2})(-a) + (F_{z3} + F_{z4})b \\ F_z &= F_{z1} + F_{z2} + F_{z3} + F_{z4} \end{aligned} \quad (9)$$

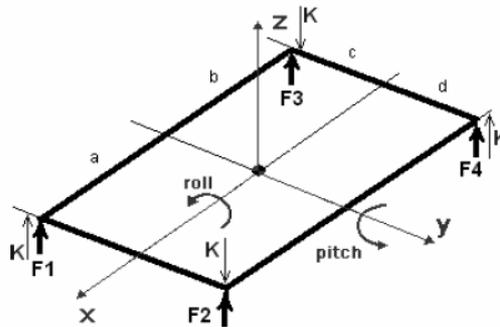


Figura 19. Esquema del auto que muestra la indeterminación para el cálculo de los esfuerzos $F_{z1}, F_{z2}, F_{z3}, F_{z4}$.

Esta indeterminación produce que los residuos definidos como hasta ahora se activen (es decir que se hagan distintos de ceros) aún cuando no se presenten fallas en el sistema de suspensión por lo que se hace necesario un primer procesamiento de los mismos de modo de poder detectar y aislar fallas. Para este caso denominamos a los residuos de cada suspensión como, ResA, ResB, ResC, ResD, en concordancia con lo señalado en la figura 15.

4.2 FDI mediante la FSM

Con combinaciones de los residuos generados por cada una de las suspensiones se generan nuevos residuos $ResX$ (con $X=1,2,\dots,6$), de manera de anular el efecto de las fuerzas K . El número de residuos generados está dado por todas las combinaciones posibles:

$$\begin{aligned} Res1 &= ResA + ResB \\ Res2 &= ResA + ResC \\ Res3 &= ResD + ResB \\ Res4 &= ResC + ResD \\ Res5 &= ResA - ResD \\ Res6 &= ResB - ResC \end{aligned} \quad (10)$$

A partir de estos nuevos residuos se construye una FSM (Tabla 2) que permite detectar y aislar fallas simultáneas hasta en dos suspensiones distintas. Si se presentan más de dos fallas

simultáneas, éstas serán detectables pero no aislables.

Si se presenta una falla en la suspensión A los residuos *Res1*, *Res2* y *Res5* se activarán y los restantes permanecerán nulos. Si se presentan fallas en las suspensiones C y D, sólo *Res1* permanece nulo y los restantes se activan. Siguiendo este razonamiento se observan todas las posibilidades de la tabla. Finalmente, se observa que cuando aparecen más de dos fallas simultáneas en suspensiones distintas todos los residuos se activan resultando imposible saber cuáles son las suspensiones que han fallado.

Tabla 2. FSM generada a partir de la definición de nuevos residuos para el modelo del auto completo.

	<i>ResA</i>	<i>ResB</i>	<i>ResC</i>	<i>ResD</i>
<i>Res1</i>	1	1	0	0
<i>Res2</i>	1	0	1	0
<i>Res3</i>	0	1	0	1
<i>Res4</i>	0	0	1	1
<i>Res5</i>	1	0	0	1
<i>Res6</i>	0	1	1	0

Una vez que ha sido identificada la o las suspensiones que fallaron se procede a procesar las señales de los residuos, del mismo modo que lo hecho anteriormente en la Sección 3, para aislar el elemento que ha fallado (resorte, amortiguador o actuador). Por ejemplo, si fallaron las suspensiones C y D se utilizarán el residuo *Res2* para analizar la suspensión C y el *Res3* para analizar la suspensión D.

5 SIMULACIONES Y DESEMPEÑO DEL SISTEMA FDI COMPLETO

En esta sección se muestran los resultados de simulación realizados con el programa *20-sim* (Controllab Products B.V.) de modo de observar el comportamiento del sistema FDI propuesto.

Se simuló una falla consistente en la variación de -20% en la constante del resorte de la suspensión A que comienza en $t=4$ seg y termina en $t=8$ seg. En la Figura 20 se puede observar la evolución de las señales: *Res1* que es el residuo asociado a las fallas en la suspensión A, *Falla_R*, *Falla_C* y *Falla_F*: señales booleanas que indican la presencia de falla en dichos componentes y *C2*: estimación de la magnitud del parámetro C de dicha suspensión.

En las gráficas puede verse que una vez que el residuo es activado, la señal *Falla_C* adquiere el valor verdadero indicando la presencia de una falla en el componente asociado a dicha señal, luego se realiza la estimación del parámetro que falla, obteniéndose cuanto se desvía éste de su valor nominal. En la gráfica *Falla_C* puede verse como, luego de realimentar el nuevo valor del parámetro fallado en $t=4.2$ seg, el residuo vuelve a su estado de libre de falla, quedando el sistema en condiciones de detectar una nueva falla. El proceso inverso se ve en $t=8$ seg. A su vez puede observarse además, que las señales booleanas *Falla_R* y *Falla_F* mantienen su valor en falso a lo largo de toda la simulación, lo cual es lógico ya que los elementos asociados a dichos componentes no fallan.

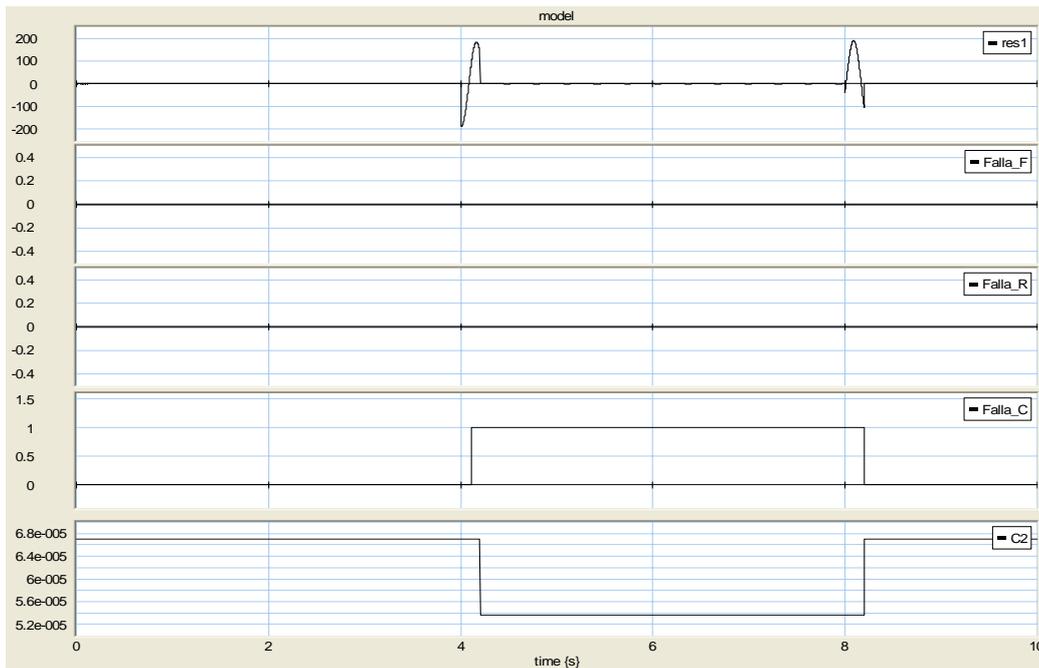


Figura 20. Simulación de una falla consistente en una variación de -20% en K_s

Otro ensayo realizado es una falla múltiple en las suspensiones B y C. En la primera el amortiguador reduce su valor nominal un 10%, y en la segunda la acción de control aumenta un 30% entre $t=5 \text{ seg}$ y $t=8 \text{ seg}$. Para detectar las fallas, se observa que solo $Res5$ permanece inactiva. Observando la FSM de la tabla 2, se aíslan las suspensiones que fallan, y se decide analizar la falla en la suspensión B con la señal $Res1$ y en la suspensión C con la señal $Res2$. En las gráficas puede observarse como evoluciona el sistema bajo las condiciones de falla especificada. Luego las señales $Falla_{R_{sb}}$ y $Falla_{F_{sc}}$ que indican cuáles son los elemento fallados y por último las señales R_{sb} y F_{sc} que indican el valor de la falla. Con estos valores se reinicializa el DBG quedando el sistema apto para detectar nuevas fallas.

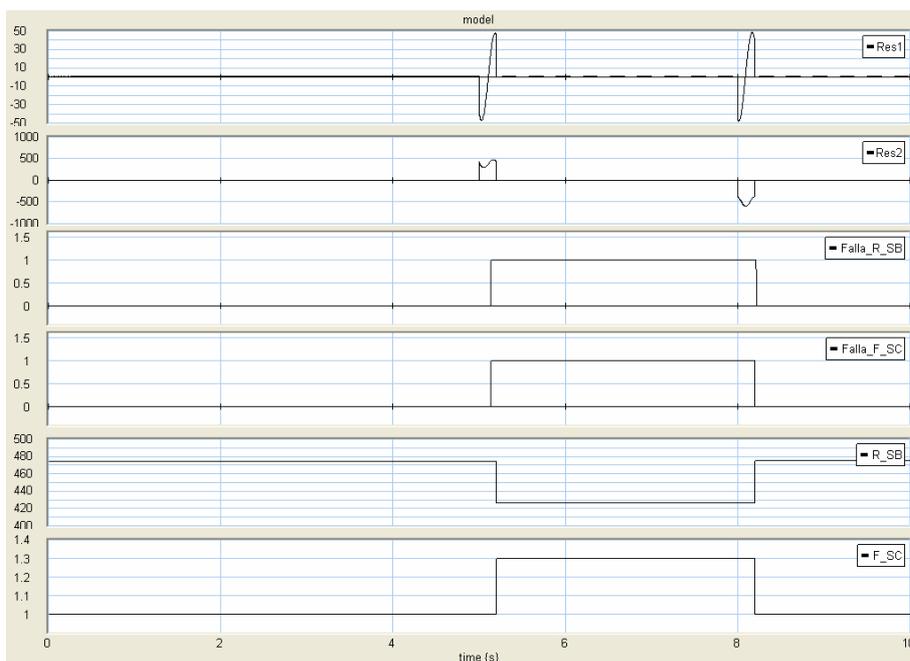


Figura 21 Simulación de una falla múltiple. Variación de 10% en B_s y de 30% en la acción de control.

6 CONCLUSIONES

En este trabajo se ha presentado un sistema FDI para la suspensión activa de un automóvil utilizando ARR que surgen de modelar el sistema con el formalismo de BG. Este sistema FDI contiene un número reducido de sensores y, mediante el procesamiento de las señales de residuo, permite detectar y aislar hasta dos fallas simultáneas en los distintos componentes de dos suspensiones. También es posible calcular la magnitud de la falla y reinyectarla en el DBG de modo que el sistema quede en condiciones de detectar nuevas fallas.

REFERENCIAS

- F. E. Cellier “Continuous System Modeling”, *Springer Verlag*, New York, 1991, pp.251-287.
- Controllab Products B.V., 20-sim™, www.20sim.com
- German Filippini, “Estudio del comportamiento dinámico de vehículos terrestres mediante bond graphs”, *Degree Thesis in Mechanical Engineering*; School Mech. Eng., Universidad Nacional de Rosario, Argentina, 2005.
- P. Frank. Fault Diagnosis in Dynamic Systems using analytical and knowledge-based redundancy _ a survey and some new results. *Automática* 26(30) :459-474. 1990.
- F. Aparicio Izquierdo, C. Vera Alvarez, V. Díaz López, “Teoría de los vehículos automóviles”, *Ed. Madrid: Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales de Madrid*, 1995.
- Dean C. Karnopp, Donald L. Margolis, Ronald C. Rosenberg, “System dynamics: Modeling and simulation of mechatronic systems”, *3rd ed.*, *Wiley Interscience*, New York, 2000, pp. 297-336.
- K. Medjaher, A. K. Samantaray, B. Ould Bouamama, Diagnostic Bond Graphs for Direct Residual Evaluation, *Proc. ICBGM'05*, 2005, pp.307-312.
- J. M. Mera, C. Vera, J. Félez, J. J. Esperilla, Influence of the Roll Axis Consideration in Vehicle Dynamic Bond Graph Models, *Proc. ICBGM'03*, 2003, pp. 203-209.
- C. Niesner, G. Dauphin-Tanguy, D. Margolis, F Guillemard, M. Pengov. A 4 wheel vehicle bond graph model including uncertainties on the car mass and the centre of mass position, *Proc. ICBGM'05*, 2005, pp.179-184.
- B. Ould Bouamama, A. K. Samantaray, M. Staroswiecki, G. Dauphin-Tanguy ”Derivation of Constraint Relations from Bond Graph Models for Fault Detection and Isolation ” *Proc. ICBGM* 2003.
- Z. Shi, F. Gu, B. Lennox, A. D. Ball. The development of an adaptive threshold for model-based fault detection of a nonlinear electro-hydraulic system. *Control Engineering Practice* 13 (2005) 1357–1367.
- L. Silva, D. Delarmelina, S. Junco, N. M’Sirdi, H. Noura. Bond Graph Based Fault Diagnosis of a 4W-Vehicle Suspension Model. *Enviado para revision a ICBGM'2007, International Conference on Bond Graph Modeling and Simulation*; SCS, San Diego, California, USA.
- Venkat Venkatasubramanian, Raghunathan Rengaswamy, Kewen Yin, Surya N. Kavuri. A review of process fault detection and diagnosis. *Computers and Chemical Engineering* 27 (2003) pp 293_346