

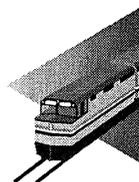
INTRODUCCION A LA TECNICA DE BOND GRAPH EN LA DINAMICA FERROVIARIA

Carlos Vera Álvarez

*INSIA (Instituto Universitario de Investigación del Automóvil),
CAMPUS SUR DE LA U.P.M.
Ctra. de Valencia, km 7. -28031 MADRID
Tfno: 91 3365305; Fax: 3365302
E-MAIL. cvera@insia.upm.es.*

Manuel Caballero Ocaña

*TAFESA.
Avda. de Andalucía, km, 9.-28021 MADRID
Tfno: 7980550; Fax: 7980961*



RESUMEN

La simulación por ordenador de la dinámica ferroviaria, constituye una herramienta cada vez mas necesaria para la optimización en el diseño no solo de los vehículos ferroviarios, sino también de los sistemas que se encuentran en contacto con ellos, como son la vía y la catenaria. En este sentido, surge la necesidad de encontrar herramientas o caminos que permitan la modelización conjunta de todos los sistemas que interactúan.

Por otra parte, los propios vehículos ferroviarios están formados por elementos neumáticos, hidráulicos y eléctricos, cuyo comportamiento condiciona en mayor o menor grado la dinámica ferroviaria.

En esta ponencia se presenta la técnica del Bond-Graph, como una posible herramienta para la simulación conjunta de sistemas que pertenecen a diferentes dominios de la Física, en su aplicación concreta a la dinámica ferroviario no solo de los vehículos sino también de la vía.

INTRODUCCION A LA TEORIA DEL BOND GRAPH

El Bond-Graph es una representación gráfica y concisa de los mecanismos de almacenamiento, disipación e intercambio de energía de sistemas, subsistemas y en este caso elementos dinámicos interactivos. Representa gráficamente lo que otras técnicas presentan en ecuaciones o en notación condensada de matrices o tensores.

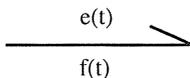
El propósito general de esta técnica, es la representación de cualquier sistema energético ingenieril en donde estén involucrados distintos dominios o campos de variada naturaleza energética. Esto es de gran utilidad cuando interactúan sistemas eléctricos, hidráulicos, neumáticos o de otro tipo, ya que la representación y tratamiento por Bond Graph es independiente del campo físico de aplicación.

El Bond Graph consta de gráficos análogos a los diagramas de circuitos o diagramas de bloque, pero es mas conciso que cualquiera de estos, y además posee un gran número de virtudes que facilitan mucho la selección de las variables de estado, la obtención de las ecuaciones y la posterior resolución por medio del ordenador.

La gran ventaja del Bond-Graph es la posibilidad de modelizar subsistemas independientemente, para posteriormente ser ensamblados en un modelo global del sistema. Así, si una estructura de cualquier geometría está integrada por componentes relativamente simples, tales como vigas o placas, entonces las técnicas del Bond Graph permitirán el tratamiento individual de cada uno de los componentes y el ensamblaje final del modelo total.

Como introducción al Bond Graph, se va a hacer un breve resumen de las variables que utiliza.

El flujo de potencia entre sistemas, subsistemas y elementos se representan mediante una línea o "bond". Cada "bond" lleva asociadas las variables esfuerzo $e(t)$ y flujo $f(t)$, cuyo producto da la potencia instantánea $P(t)$ transmitida por el "bond" la dirección del flujo de potencia se indica por la media flecha que aparece en uno de los extremos del "bond"



$$P(t)=e(t).f(t)$$

Las variables generalizadas $e(t)$ y $f(t)$ deben ser particularizadas para el dominio físico en estudio.



Otras variables importantes en la descripción de sistemas dinámico son el momento $p(t)$ y el desplazamiento $q(t)$. El momento se define como la integral del esfuerzo en el tiempo.

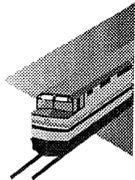
$$p(t) = \int_0^t e(t) \cdot dt$$

$$\frac{d}{dt} p = e(t) = p'(t)$$

De la misma forma, el desplazamiento $q(t)$ sería la integral del flujo en el tiempo.

$$q(t) = \int_0^t f(t) \cdot dt$$

$$\frac{d}{dt} q = f(t)$$



Variables generalizadas	Mecánica de traslación	Mecánica de Rotación	Electricidad
Esfuerzo $e(t)$	Fuerza	Par	Voltaje
Flujo $f(t)$	Velocidad	Velocidad angular	Intensidad
Momento $p(t)$	Momento cinético	Momento angular	Flujo
Desplazamiento $q(t)$	Desplazamiento	Angulo	Carga

Figura 1

En la tabla de la figura 1, se muestra la correspondencia de las variables generalizadas en distintos dominios.

Los elementos básicos del Bond Graph aparecen como componentes elementales de sistemas y subsistemas, representando la idealización matemática de componentes tales como resistencias, condensadores, masas, resortes, tuberías, bombas o amortiguadores. De esta manera solo se necesita una pequeña cantidad de elementos para poder representar modelos en cualquier dominio de la Física.

Por otra parte, la notación de Bond Graph permite visualizar el comportamiento del sistema más fácilmente que el conjunto de las ecuaciones de estado. A continuación, se detallan los elementos básicos a considerar.

Los elementos puerta son aquellos en los que el sistema almacena o disipa energía. Pueden ser de varios tipos : Resistencia, Rigidez, Inercia, Fuente de Esfuerzo y Fuente de Flujo.

La puerta RESISTENCIA es un elemento en el que las variables flujo y esfuerzo están relacionadas mediante una expresión matemática. La expresión se denomina ecuación constitutiva del elemento y la puerta se representa por -R-.

$$\begin{array}{c} e \\ \text{-----} \\ f \end{array} \begin{array}{l} \diagdown \\ \text{R} \end{array} \quad e = R \cdot f$$

Generalmente, la RESISTENCIA disipa energía. Ejemplos de ello son la resistencia eléctrica, el amortiguador mecánico y las pérdidas de carga hidráulicas.

El elemento o puerta rigidez cumple una ecuación que relaciona el esfuerzo con el desplazamiento. En términos físicos, una rigidez es una idealización de resortes lineales, barras de torsión, condensadores o acumuladores neumáticos. Se representan por el símbolo K.

$$\begin{array}{c} e \\ \text{-----} \\ f \end{array} \begin{array}{l} \diagdown \\ \text{K} \end{array} \quad e = K \int_0^t f(t) \cdot dt = K \cdot q(t)$$

El tercer elemento es el llamado PUERTA INERCIA, en el que las variables generalizadas momento $P(t)$ y flujo $f(t)$ están relacionadas por una función matemática. Se representa por el símbolo I.

$$\begin{array}{c} e \\ \text{-----} \\ f \end{array} \begin{array}{l} \diagdown \\ \text{I} \end{array} \quad p = I \cdot f = \int_0^t e(t) \cdot dt$$

El elemento INERCIA se usa para modelizar efectos de inductancias en sistemas eléctricos y masas o inercias en sistemas mecánicos e hidráulicos.

Los elementos FUENTE DE ESFUERZO son aquellos que provocan una entrada de esfuerzo al sistema. Se representan por Se. Ejemplos físicos son las fuerzas de excitación en sistemas mecánicos o los generadores en sistemas eléctricos.

$$S_e \text{-----} \diagdown$$

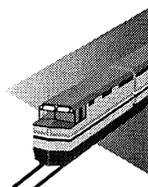
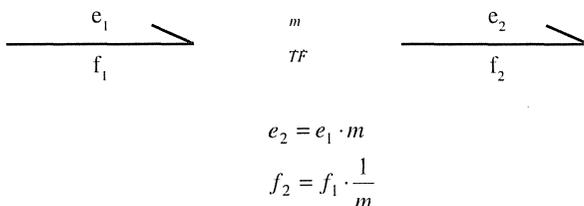


Finalmente, los elementos FUENTES DE FLUJO son aquellos que suministran flujo al sistema. Se representan por S_f , y ejemplos físicos son las fuentes de intensidad y las bombas hidráulicas.



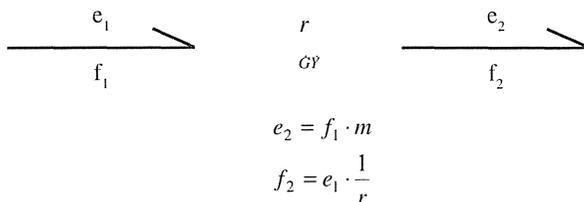
Existen otros elementos que están constituidos por dos “bonds” y transmiten la potencia entre el bond de entrada y el de salida. Se cumple que la potencia que entra es igual a la que sale. Los dos elementos pertenecientes a esta clase son los TRANSFORMERS Y GIRATORS.

El primer elemento considerado es el TRANSFORMER, se representa por -TF- y cuya sus ecuaciones constitutivas son :



donde el parámetro m se denomina módulo del transformer. Ejemplos físicos de elementos transformer son las palancas, los reductores de engranajes y los transformadores eléctricos. El módulo “ m ” del transformer puede ser constante o variable. Los transformers relacionan esfuerzos de entrada con esfuerzos de salida y flujos de entrada con flujos de salida.

El segundo elemento considerado es el GIRATOR representado por -GY- y sus ecuaciones son :

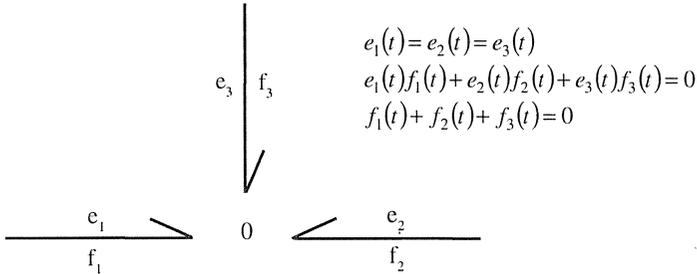


en donde “ r ” es el módulo del girator. Ejemplos de girator aparecen al simular el efecto Hall en electromagnetismo y las fuerzas de inercia con bases móviles en mecánica. Los

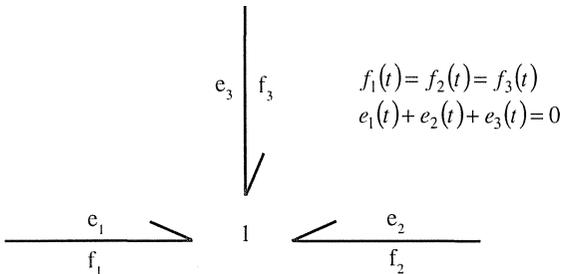
Girator relacionan esfuerzos de entrada con flujos de salida y flujos de entrada con esfuerzos de salida.

Por último existen los elementos unión y sirven par interconectar otros elementos entre sí, dentro de los sistemas o subsistemas. Estas uniones son las llamadas UNION-0 y UNION-1.

El elemento de UNION-0, También llamado Unión de esfuerzo común, tiene la siguiente representación gráfica y ecuaciones :

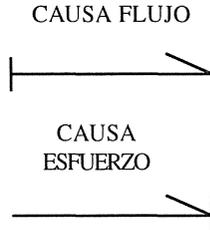


El elemento de UNION-1 , o unión de flujo común se caracteriza de la manera siguiente :



Otro de los aspectos en los que ayuda la visión del Bond Graph es la forma tan clara en que se representa la causalidad entre los distintos elementos interconectados. La causalidad es el concepto que refleja el hecho físico de que cuando un sistema intercambia energía con el entorno, solo una de las dos variables que forman el par esfuerzo-flujo puede ser considerada como entrada al sistema, obligando a la otra a ser un respuesta del propio sistema.





El trazo perpendicular al “bond” de la figura muestra el mecanismo de la causalidad según sea la causa -flujo o esfuerzo- en la dirección del “bond”.

Dado el esquema de la figura 2, el trazo perpendicular indica que los sistemas A y B interactúan de forma que el sistema A introduce un esfuerzo en el sistema B, y éste le responde introduciendo en A un flujo. De esta forma el esfuerzo es una entrada y el flujo una salida para el sistema B.

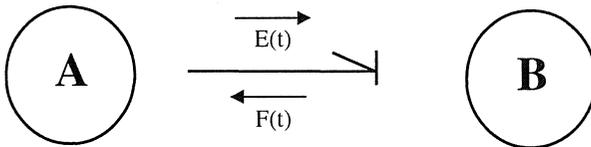
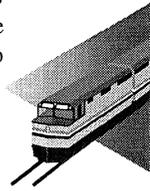


Figura 2

En la figura 3, ocurre justamente lo contrario, el sistema A actúa sobre B introduciendo flujo y B responde a A con esfuerzo.

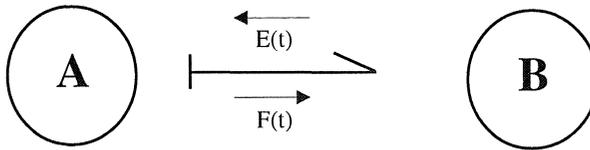


Figura 3.

Del planteamiento de la causalidad del sistema, depende en gran medida la obtención de las ecuaciones de estado de una forma cómoda, y la determinación de las variables de entrada y salida en la conexión de subsistemas.

En nomenclatura de Bond Graph, las variables de estado del sistema son los momento $p(t)$ y desplazamiento $q(t)$ asociados con los respectivos elementos inercia -I- y rigidez -K-.

MODELIZACION CONCEPTUAL EN BOND GRAPH PARA BOGIES Y CAJAS

En la figura 4, se muestra esquemáticamente el modelo de un bogie en donde se distinguen los dos ejes, la estructura del bogie y las rigideces verticales, longitudinales y transversales con los que se simula la unión de los ejes al bogie. Para estudiar la dinámica

ferroviaria, tanto los ejes como el bogie se consideran como sólidos rígidos que se mueven en el espacio con sus seis grados de libertad.

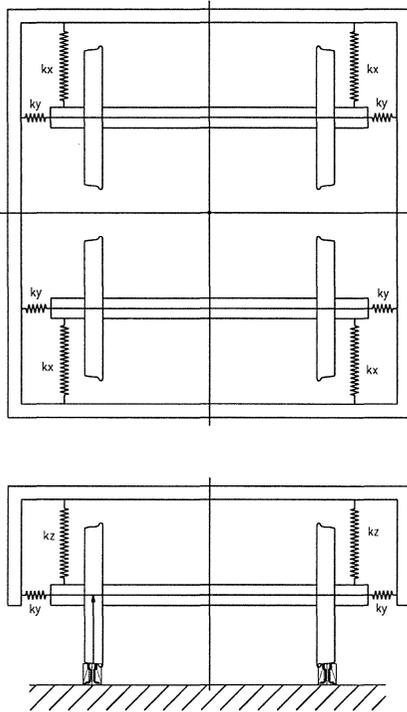


Fig. 4. Esquema bogie

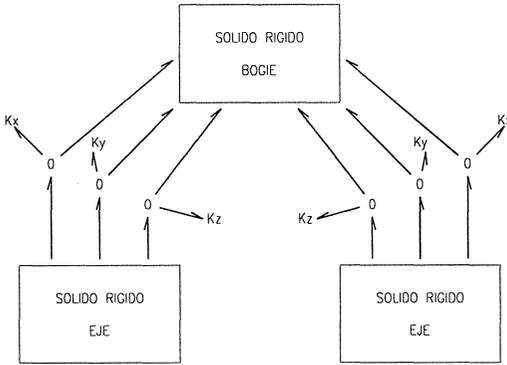
Si como sistema de referencia se utiliza uno situado en el centro de masas del sólido rígido, que se mueve igual que este, la representación en Bond Graph de los seis grados de libertad, se realiza mediante dos triángulos. El primero de ellos tiene en cada uno de sus vértices la masa del sólido y están asociadas a los tres movimientos de desplazamiento longitudinales. Los lados del triángulo se construyen mediante girator de razón el producto de la masa por la velocidad angular de vector perpendicular al lado plano formado por las dos velocidades longitudinales, y son los encargados de hallar las fuerzas centrífugas que aparecen en la dinámica de la marcha.

El otro triángulo tiene en sus vértices, los momentos de inercia asociados a las tres velocidades angulares del balanceo, el cabeceo y el lazo. Los elementos girator que unen los vértices del triángulo se necesitan para considerar los pares giroscópicos

que se inducen sobre los movimientos angulares.

Las fuerzas que actúan sobre el sólido rígido que pueden provenir de los elementos de suspensión, de rigideces de unión o incluso de fuerzas externas provocadas por el aire, una vez descompuestas en las direcciones del sistema de referencia, actúan cada una de estas componentes sobre un movimiento longitudinal y dos movimientos angulares, en este último caso por medio de un elemento transformer que calcula los pares generados por los esfuerzos.





ESQUEMA DEL BOND GRAPH DEL BOGIE

Fig. 5. Bond Graph de los seis grados de libertad del sólido rígido.

En la figura 5, se muestra el Bond Graph de un sólido rígido con los seis grados de libertad, el sistema de referencia situado en su centro de gravedad y tres fuerzas F_{x1} , F_{y1} , F_{z1} , que actúan en un punto cualquiera del sólido rígido.

En la modelización de un vehículo ferroviario cada eje estaría representado por el Bond Graph mostrado en la figura 5, y así mismo la estructura del bogie necesitaría la misma representación.

Las uniones entre los sólidos rígidos se realizan mediante las rigideces y amortiguamiento de los elementos de unión. Para construir el modelo global del bogie, basta con situar los tres sólidos rígidos y sustituir las fuerzas que actuaban sobre ellos por medio de los grafos que modelicen el comportamiento de las uniones. En el caso de considerar solamente las rigideces de las uniones, en la figura 6, se muestra el esquema del Bond Graph del bogie.

En el planteamiento realizado hasta ahora, cada sólido rígido tiene desarrolladas sus ecuaciones respecto a un sistema de referencia que es fijo a él y que por lo tanto, se mueve lo mismo que el sólido rígido.

Para transferir las fuerzas y momentos desde un sistema de referencia fijo en la vía y por lo tanto inercial, al sistema de referencia fijo a cada sólido, es necesario conocer la posición y orientación de estos últimos con respecto al sistema de referencia inercial.

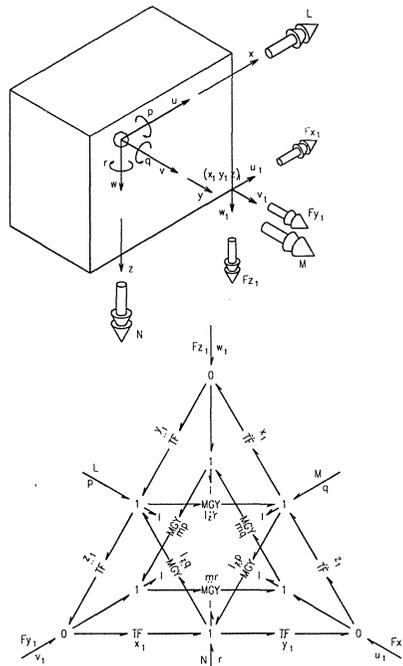
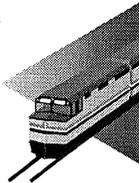


Fig.6. Esquema del Bond Graph del bogie



El movimiento de rotación de los sólidos es definido por medio de un conjunto de ángulos de cardan. (Figura 7).

Las rotaciones sucesivas se producen primero respecto al eje Z un ángulo ψ (lazo), después respecto al nuevo eje Y_1 un ángulo θ (cabeceo) y por último respecto al nuevo eje longitudinal X_2 , un ángulo ϕ (balanceo).

En la figura 8, se pueden ver los tres estados de la transformación de coordenadas, en los cuales los vectores de velocidad se transforman desde el sistema móvil al inercial, y a la inversa los esfuerzos se transforman desde el sistema inercial al móvil.

La conservación de la potencia, requiere que las fuerzas y momentos correspondientes a cada velocidad longitudinal y angular, sean transformados mediante las matrices de cambio de referencia.

En cuanto se refiere a la caja de los vehículos ferroviarios, si se considera como un sólido rígido se representa mediante el Bond Graph de la figura 5, y sus uniones al bogie se realizan mediante el modelo que simula el comportamiento de la suspensión.

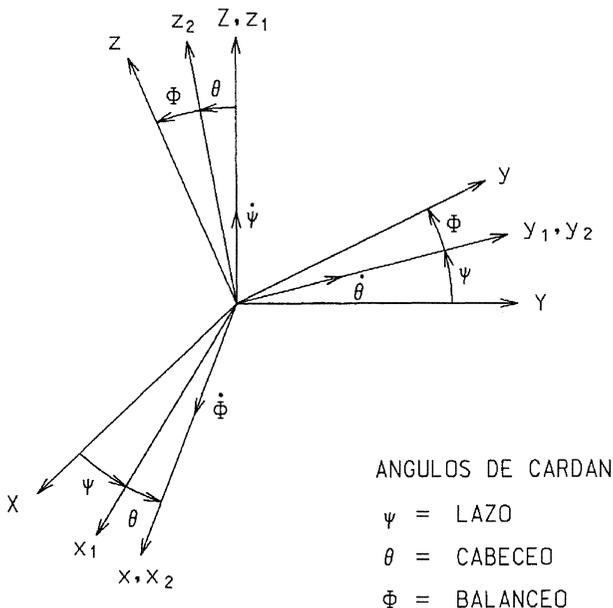
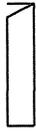


Fig. 7. Transformación de coordenadas desde el sistema de referencia inercial, al sistema fijo en los sólidos rígidos.



REFERENCIA MÓVIL



$$\text{MTF: } \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\phi) & -\sin(\phi) \\ 0 & \sin(\phi) & \cos(\phi) \end{bmatrix} \text{ BALANCEO}$$



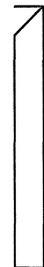
$$\text{MTF: } \begin{bmatrix} \cos(\theta) & 0 & \sin(\theta) \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin(\theta) & 0 & \cos(\theta) \end{bmatrix} \text{ CABECEO}$$



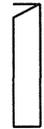
$$\text{MTF: } \begin{bmatrix} 1/\cos(\theta) & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ \tan(\theta) & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

LAZO

$$\begin{bmatrix} \cos(\psi) & -\sin(\psi) & 0 \\ \sin(\psi) & \cos(\psi) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \text{ :MTF}$$



\cdot
 θ
 \cdot
 ϕ
 \cdot
 ψ



Se=0

REFERENCIA FIJA

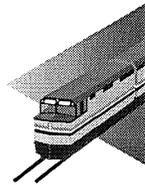


Fig. 8. Representación en Bond Graph de la transformación de coordenadas.

INTRODUCCION A LA MODELIZACION DE LOS SISTEMAS DE SUSPENSION

Los elementos del sistema de suspensión entre los bogies y la caja constituyen la unión que permite configurar el modelo global del vehículo ferroviario.

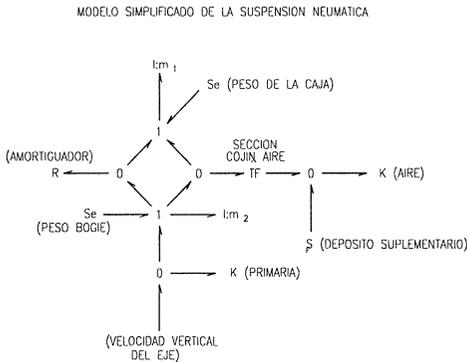
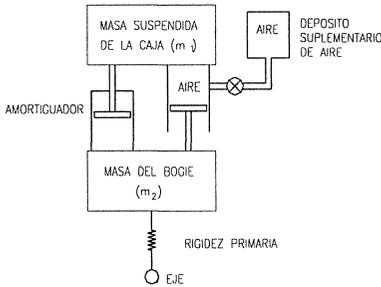


Fig. 9. Modelo simplificado de la suspensión neumática.

La representación empieza con la velocidad vertical del eje que se introduce en el extremo inferior de la suspensión primaria idealizada en este modelo por un resorte. Este en su parte superior mueve a la masa del bogie. La rigidez de la suspensión primaria se representa por una puerta resorte y el movimiento vertical del bogie mediante una inercia de valor la masa m_2 . Sobre esta masa m_2 actúa su peso propio y por encima de ella aparecen dos grafos, uno transmite el esfuerzo hacia arriba pasando por el amortiguador viscoso y el otro representa el esfuerzo que pasa por el cojín de aire. Como este último funciona con presiones y caudales, es necesario cambiar de dominio físico de la mecánica a la hidráulica. Este cambio se realiza en el transformer que tiene de razón la sección efectiva del cojín de aire. A la derecha del transformer ya hay presión y caudal de aire, que llega a una unión o en

Dada la importancia de la suspensión, su modelización detallada suele ser bastante compleja y se escapa al objetivo de esta ponencia. Por este motivo, se planteará un modelo bastante sencillo con el único propósito de que el lector pueda analizar las ventajas que supone la utilización de la técnica del Bond Graph de la dinámica ferroviaria.

Simplificado al movimiento vertical, la suspensión neumática de los ferrocarriles puede representarse esquemáticamente tal y como se muestra en la figura 9 y está formada esencialmente por un cojín de aire y un amortiguador viscoso situado en paralelo. En la misma figura se muestra el Bond Graph del modelo.

La representación empieza con la velocidad vertical del eje que se introduce en el extremo inferior de la suspensión primaria idealizada en este modelo por un resorte. Este en su parte superior mueve a la



donde se suma con el caudal procedente del depósito suplementario. Este último se representa mediante una fuente de caudal.

Por último arriba del todo se encuentra la inercia que tiene la masa de la caja y la fuente de esfuerzo con su peso propio.

EJEMPLOS DE OTROS SISTEMAS

En los párrafos anteriores, se han plateado las representaciones en Bond Graph de los sólidos rígidos tales como los ejes, las estructuras de los bogies e incluso la de las cajas, así como el comportamiento de la suspensión neumática. En los ferrocarriles modernos existen diversos sistema cuyo funcionamiento interactúa en la dinámica ferroviaria, y la modelización completa de estos sistemas se hace imprescindible a la hora de optimizar el comportamiento de los ferrocarriles a altas velocidades.

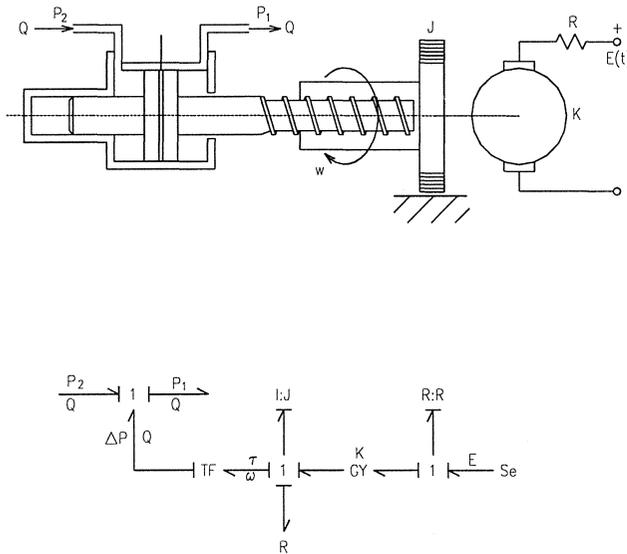
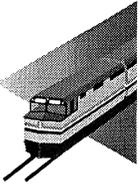


Fig. 10. Esquema y Bond Graph de un conjunto motor-bomba.

El modelo del motor eléctrico, es el estándar de un motor eléctrico de corriente continua con imán permanente e incluye la resistencia de la armadura pero no su inductancia. El girator representa la transforma-

La técnica del Bond Graph constituye una herramienta muy poderosa para la simulación de estos sistemas, además debido a su facilidad para unir posteriormente todo tipo de submodelos que constituyan un modelo global, los esfuerzos dedicados a la modelización de un sistema concreto, nunca son desperdiciados.

Como ejemplo en la figura 10, se muestra el diagrama esquemático y al Bond Graph de una unidad bomba-motor.



ción de la tensión y la intensidad en el par y la velocidad angular a la salida del motor. Posteriormente, aparece la inercia de las masas rotatorias y el par de rozamiento del mecanismo.

El transformer es el encargado de pasar del par-velocidad angular a la presión y caudal del líquido del circuito hidráulico. La razón del transformer, depende del índice de reducción del mecanismo sinfín y de la sección del pistón de la bomba. Por último la fuente de esfuerzo representa la alimentación de tensión eléctrica al motor.

Este modelo aunque se ha presentado como ejemplo, puede ser muy similar al utilizado para la elevación del mecanismo de captación de corriente de la catenaria, o bien como actuador de ayuda en el sistema de suspensión.

MODELIZACION DE LA VIA

Uno de los elementos mas importantes en la modelización del comportamiento dinámico de los ferrocarriles, lo constituye la vía. La técnica del Bond Graph, presenta ventajas importantes en el tratamiento de la vía, ya que permite modelizarla como un subsistema independiente que posteriormente podrá se ensamblado en un modelo global, en donde se encuentren los vehículos ferroviarios con sus diferentes sistemas e incluso los elementos de tracción, así como la captación de corriente y las instalaciones fijas encargadas del suministro de esta.

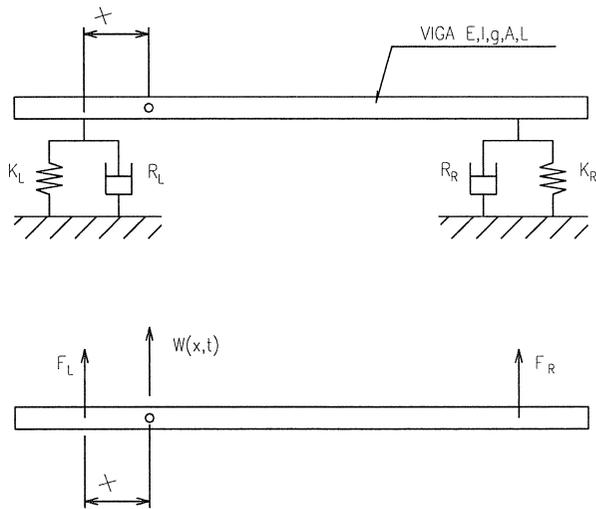


Fig. 11. Viga soportada por resortes y amortiguadores en sus extremos.

En la figura 11, se muestra una viga uniforme soportada por resortes y amortiguadores en sus extremos, así como la sustitución de estos elementos por las fuerzas F_L y F_R que



ejercen. Este segundo planteamiento constituye un sistema distribuido con fuerzas externas.

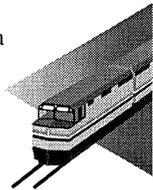
Considerando solamente los movimientos de flexión y despreciando las deformaciones debidas a los esfuerzos cortantes y las inducidas por la inercia rotatoria, la solución de los desplazamientos verticales de la viga en cada punto X de la misma es de la forma :

$$W(x,t) = \sum_{n=1}^{\infty} Y_n(x) \cdot \gamma_n(t)$$

En donde $Y_n(x)$, son las deformaciones modales que se obtienen resolviendo las ecuaciones en derivadas parciales que gobiernan la flexión de las vigas.

En el caso particular de que F_L y F_R fueran nulas, es decir en la consideración de la viga libre-libre, se tiene que :

$$Y_n(x) = A_n \cdot \text{sen}(\beta_n \cdot x) + B_n \cdot \text{cos}(\beta_n \cdot x) + C_n \cdot \text{senh}(\beta_n x) + D_n \cdot \text{cosh}(\beta_n x)$$



Siendo A_n, B_n, C_n, D_n , constantes que dependen de las condiciones de contorno del amarre de la viga, y β_n viene dada por la expresión :

$$\beta_n = \frac{\alpha_n}{L}$$

en donde α_n , es un coeficiente que depende de la frecuencia natural que se esté considerando y L la longitud de la viga.

Las infinitas frecuencias naturales de la viga, se obtienen de la expresión :

$$\omega_n = \frac{\alpha_n^2}{L^2} \sqrt{\frac{EI}{\varphi A}}$$

Siendo E el modelo de Young, I el momento de inercia, φ la densidad de la viga y A la sección transversal de la misma.

En cuanto se refiere a la función del tiempo $\gamma_n(t)$, se obtiene de la ecuación:

$$m_n \gamma_n + k_n \gamma_n = F_L Y_n(0) + F_R Y_n(L)$$

donde m_n es la masa modal que se obtiene como :

$$m_n = \int_0^L \phi A Y_n^2(x) dx$$

y k_n es la rigidez modal.

$$k_n = m_n \omega_n^2$$

La representación de los carriles y las traviesas considerados como medio continuos, se hace mediante puertas inercias que tienen como valor las masas modales y puertas resorte de características la rigidez modal.

Los puntos de unión entre los diferentes elementos, así como los puntos de actuación de las fuerzas, se unen a las puertas inercia y resorte mediante transformers de valor los coeficiente de participación modal particularizados para el punto de unión o de actuación de la fuerza.

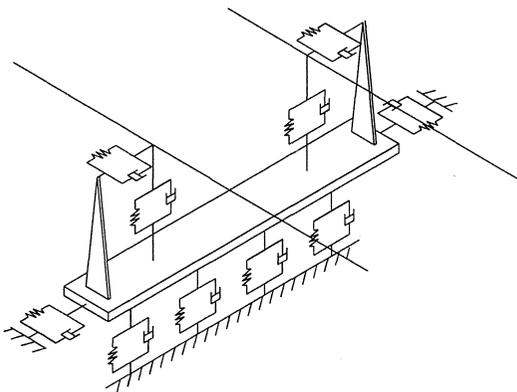


Figura 12. Esquema de un modelo tridimensional de vía.

En general, un modelo tridimensional de vía puede ser representado mediante el esquema que se muestra en la figura 12. Los carriles se van a considerar como un medio continuo al igual que las traviesas, mientras que las uniones, carril-traviesa así como el comportamiento del balasto, se modelizan mediante sus rigideces y amortiguamiento en dirección vertical y transversal.

La modelización en Bond Graph en su comportamiento vertical para cada uno de los carriles se muestra en la figura 13, siendo las dos primeras inercias las correspondientes a los movimientos de sólido rígido y las n siguientes las masas modales, tantas como frecuencias naturales se quieran considerar. En cuanto se refiere a la rigidez k_c y al amortiguamiento R_c representan la rigidez y el amortiguamiento vertical de la placa de unión entre el carril y una traviesa, y como es lógico, existirán tantas k_c y R_c como puntos de unión entre el carril y las traviesas.



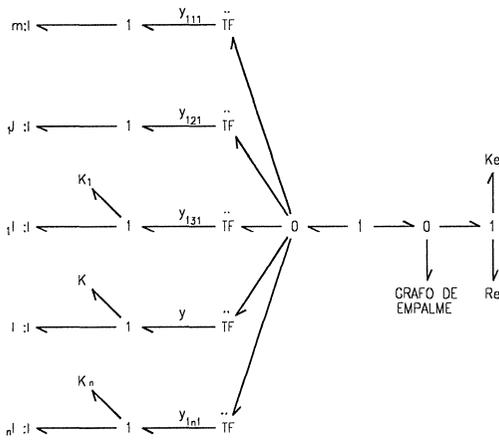
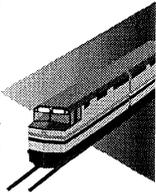


DIAGRAMA DE GRAFOS DEL RAIL IZQUIERDO

Fig. 13. Modelización del carril.

Las traviesas al ser consideradas como un medio continuo, tendrán también una representación en Bond Graph muy parecida a la mostrada para el carril, con la diferencia de que tendrán dos conjuntos resorte amortiguador de unión vertical a los dos carriles, mas n conjuntos de unión al balasto.

En la figura 14, se muestra el Bond Graph global del comportamiento vertical de ambos carriles y una traviesa con cuatro uniones verticales al balasto. La interacción de las ruedas sobre los carriles, se representan en el modelo de vía



mediante fuentes de esfuerzo cuyos coeficientes de participación modal son variables, en función de la posición que la rueda va tomando debido a la velocidad de los vehículos.-

Cuando el subsistema vía se acople al modelo global de la dinámica ferroviaria, estas últimas fuentes de esfuerzos serán sustituidas por el Bond Graph que representa los vehículos ferroviarios.

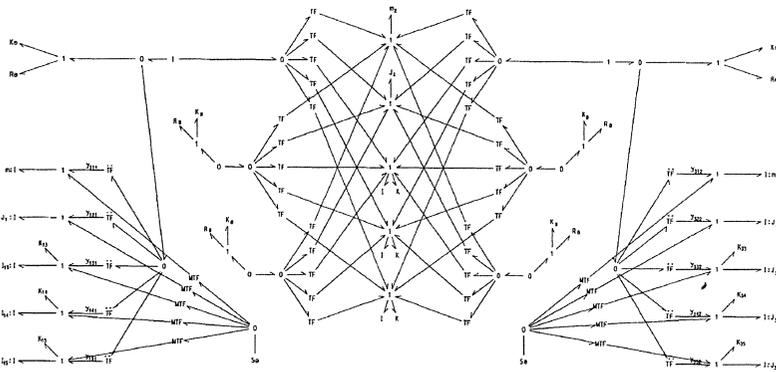


Fig. 14. Modelo Global de vía.

En cuanto se refiere al comportamiento transversal de la vía el planteamiento es muy parecido al vertical con la diferencia de que la traviesa suele considerarse como un elemento rígido y por lo tanto, su representación es mas sencilla y se realiza mediante una puerta de inercia asociada al movimiento transversal de la traviesa mas las rigideces y amortiguamientos transversales de unión al balasto.

CONCLUSIONES

La técnica del Bond Graph, ha sido aplicada por numerosos investigadores en campos tan diversos como la robótica, el control de mecanismos, y dentro de los vehículos automóviles tanto en el estudio de sistemas concretos, como en el análisis de la dinámica vehicular.

No obstante en cuanto se refiere a los ferrocarriles, apenas existen artículos de su aplicación. Los ejemplos presentados en esta ponencia, permiten enunciar algunas de las ventajas en esta técnica que puede ser de gran ayuda, no solo a los ingenieros encargados de simular por ordenador, si no también a aquellos que necesitan profundizar en el comportamiento dinámicos de los sistemas individuales o en la dinámica ferroviaria global.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

Blundell, A. Bond Graphs for Modeling Engineering Systems. Ellis Horword Publishers. 1982

Karnopp, D. Using Bond Graphs in Nonlinear Simulation Problems. SIMULATION. June 1981 pp. 183-192.

Margolis, D. Introduction into Bond Graphs. 3rd Seminar on Advanced Vehicle Dynamics. May 1986. Amalfi.

Pacejka , H. B. Bond Graphs. TOPA Summer Seminar. Unit n° 7 : Vibrations Packaging Transports. 1985

Rosenberg, R. Karnopp, D. INTRODUCTION TO PHYSICAL SYSTEM DYNAMICS. Mc Graw Hill, 1984.

Rosenberg, R.C. Exploiting Bond Graph Causality in Physical System Modeling. Trans. ASME Journal of Syst. Dyn., Means & Control. Vol 109, December 1987, pp. 378-383.

