



UNIVERSIDAD MICHOANA DE SAN NICOLÁS
DE HIDALGO

FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA

TESIS

LA RELACION DE BOND GRAPH

Y DIAGRAMA DE BLOQUES

Para obtener el título de

INGENIERO ELÉCTRICISTA

Presenta:

ALEJANDRO ALBARRAN LEYVA

Asesor de Tesis

DOCTOR EN CIENCIAS GILBERTO GONZÁLEZ AVALOS

MORELIA, MICHOACÁN, NOVIEMBRE 2013



Agradecimientos

Agradezco primeramente a Dios por darme la vida y todas las oportunidades que me ha brindado en mi existencia, a mis padres, hermanos y familia en general que formaron los pilares en mi formación como persona y están conmigo apoyándome siempre en todos los sentidos.

A mi asesor el Dr. Gilberto Gonzáles Avalos por apoyarme en esta investigación y por preocuparse por el buen desempeño académico de los alumnos. A mi novia Lucero que estuvo a mi lado en esta parte tan importante de mi vida apoyándome incondicionalmente en mis aciertos y errores.

También agradezco a todos mis compañeros y maestros de la comunidad de la FIE que tantos consejos, lecciones y vivencias aprendí de cada uno de ellos, tanto en las aulas como fuera del instituto.

A mis mejores amigos que en su momento estuvieron ahí para apoyarme moralmente en situaciones desesperadas, por escucharme y darme ánimos para seguir luchando y superarme como persona y como profesionista.

A todos aquellos que directamente e indirectamente confiaron en que podía lograr todo lo que me propusiera si realmente lo deseaba y que no hay límites sino los que uno se pone. Agradezco también a las personas que me pusieron infinidad de piedras en el camino porque de esos obstáculos se aprende.

Dedicatoria

Esta culminación de mis estudios de licenciatura la dedico a mis padres que confiaron en mí, que con tantos esfuerzos me hicieron posible llegar hasta este punto de mi vida. A mi hermana Aurea y mi hermano Fredy que también con su apoyo logre llegar.

A mis padrinos que en mi llegada a esta ciudad me brindaron su techo y su apoyo y que hasta la fecha siguen viendo por mí.

A mi novia Lucero que desde que la conocí ha sido una luz en mi camino que me ayudó a llegar a la cima y que en tantas ocasiones buenas y malas estuvo ahí conmigo, que también fue para mí un ejemplo a seguir y al mismo tiempo motivación para llegar a realizarme como individuo.

A la sociedad que me dio enseñanza y carácter en esta vida y aportó en mi formación y espero poder regresarle en abundancia todo el conocimiento que recibí.

A la Facultad de Ingeniería Eléctrica, que en ella viví mis mejores años de estudiante y que solo se viven una sola vez, que son únicos e inolvidables.

Resumen

En este trabajo se presenta el método de Bond Graph y sus características que lo definen, sus nociones básicas y conceptos, también se explica las características de Diagrama de Bloques, su utilización en el área de la ingeniería y su implementación.

La forma en que estas dos herramientas son comparables es un aspecto importante en este caso de estudio, ya que esto nos lleva a concluir los aspectos más relevantes de cada sistema y a poder decidir que herramienta utilizar en cualquier tipo de circuito que se desee estudiar.

Se explica las diferentes etapas del modelado tanto en Bond Graph como en Diagrama de Bloques, obteniendo también las ecuaciones de estado de cada circuito, para posteriormente tener el modelo matemático.

Cuando se tienen los dos modelos de cada circuito se modelan simultáneamente y se obtienen las gráficas correspondientes de cada circuito corroborando que en efecto escogiendo ambos sistemas gráficos se llega a el mismo resultado, solo que en esta parte cuando los circuitos a estudiar son muy robustos tanto en nodos, mallas y elementos, es mas viable elegir la herramienta de Bond Graph. Ya que esta herramienta nos facilita de una manera considerable la simulación.

Índice general

1. Introducción	1
1.1. La importancia del modelado	1
1.2. Objetivo	2
1.3. Justificación	2
1.4. Metodología	2
1.5. Contenido de la tesis	3
2. Antecedentes de Diagrama y bloques de Bond Graph	4
2.1. Introducción	4
2.2. Diagrama de bloques	4
2.2.1. Elementos que conforman la construcción de diagrama de bloques	5
2.3. Modelado en Bond Graph	8
2.3.1. Componentes Básicos de un Bond Graph	8
2.3.2. Elementos básicos en el modelado de un circuito eléc- trico en Bond Graph	10
2.3.3. Puestos-1 pasivos	10
2.3.4. Puertos -1 activos o fuentes	11
2.3.5. Elementos ideales de puerto -2	12
2.3.6. Elementos de unión puerto -3	14
2.3.7. Tipos de uniones	15
2.3.8. Bond Activo	16
2.3.9. Causalidad para los multipuertos básicos	17
2.3.10. Asignación de causalidad de un multipuerto	19
2.3.11. Modelo matemático en Bond Graph	20
3. Relación de diagrama de bloques y Bond Graph	30
3.1. Introducción	30

ÍNDICE GENERAL

3.2. Equivalencia de BG y DB	30
3.3. Circuito de una malla	35
3.4. Circuito de dos mallas	41
3.5. Circuito de tres mallas	44
4. Casos de estudio	50
4.1. Introducción	50
4.2. Sistema básico	51
4.3. Sistema con un transformador	54
4.4. Sistema con dos transformadores	58
4.5. Sistema tipo motor de CD	61
5. Conclusiones y recomendaciones	65
5.1. Conclusiones	65
5.2. Recomendaciones	66
Bibliografía	67

Índice de figuras

2.1. Elemento de un diagrama de bloques	5
2.2. Punto de suma	6
2.3. Diagrama de bloques de un sistema en lazo cerrado	7
2.4. Sistema en lazo cerrado	7
2.5. Bond de energía	9
2.6. Bond con sus variables de potencia	9
2.7. Elemento R	10
2.8. Elemento C	11
2.9. Elemento L	11
2.10. Elemento de fuente de energía	12
2.11. Elemento de fuente de flujo	12
2.12. Elemento transformador	13
2.13. Elemento girador	13
2.14. Unión puerto-3.	14
2.15. Unión de esfuerzo o flujo común	15
2.16. Unión de flujo o de esfuerzo común	16
2.17. Bond activo	16
2.18. Bond activo como señal de diagramas de bloque	17
2.19. Causalidad de los elementos	18
2.20. Reducción de bonds	20
2.21. Diagrama de bloques de la estructura de unión de un Bond Graph	21
2.22. Valores de co-energía	22
2.23. Circuito eléctrico	25
2.24. Primer modelo en Bond Graph	25
2.25. Modelo final del circuito eléctrico en Bond Graph	26
2.26. Enumeración de bonds	26
2.27. Relación de vectores clave con los elementos del sistema eléctrico	27

ÍNDICE DE FIGURAS

3.1.	Diagramas de bloques para puertos -1	33
3.2.	Diagrama de bloques para puertos -2	34
3.3.	Diagrama de bloques para puertos -3	35
3.4.	Circuito eléctrico de una malla	36
3.5.	Bond Graph del circuito de una malla	36
3.6.	Colocación de nodo en circuito de una malla	38
3.7.	Agregando el elemento C1 al diagrama de bloques	38
3.8.	Colocación del elemento L1 al diagrama de bloques	39
3.9.	Colocación del elemento R1 al diagrama de bloques	40
3.10.	Diagrama de bloques del circuito de una malla	40
3.11.	Circuito Eléctrico de dos mallas	41
3.12.	Bond Graph del circuito de dos mallas	41
3.13.	Diagrama de bloques del circuito de dos mallas	44
3.14.	Circuito eléctrico de tres mallas	45
3.15.	Bond Graph del circuito de tres mallas	46
3.16.	Diagrama de bloques del circuito de tres mallas	48
4.1.	Circuito de dos mallas	51
4.2.	Bond Graph del circuito de dos mallas	51
4.3.	Diagrama de bloques del circuito de dos mallas	52
4.4.	Gráficas del circuito de dos mallas	53
4.5.	Circuito de un transformador	54
4.6.	Bond Graph del circuito de un transformador	55
4.7.	Diagrama de bloques del circuito de un transformador	56
4.8.	Gráficas del circuito de un transformador	57
4.9.	Circuito con dos transformadores tres mallas	58
4.10.	Bond Graph del circuito con dos transformadores	59
4.11.	Diagrama de bloques del circuito de dos transformadores	59
4.12.	Gráficas del circuito de dos transformadores	60
4.13.	Circuito del motor de CD	61
4.14.	Bond Graph de la máquina de CD	62
4.15.	Diagrama de bloques de la máquina de CD	62
4.16.	Gráficas del circuito de la máquina de CD	63

Capítulo 1

Introducción

1.1. La importancia del modelado

Un modelo es una representación simplificada de la realidad, esta herramienta nos permite visualizar nuestro sistema sin tener que llegar a la experimentación física del mismo.

A través de este modelo nosotros podemos comprender de una mejor manera como se comporta algún sistema. Nos puede ayudar a visualizar como es ó como queremos que sea un sistema, ya sea que el sistema existe físicamente o sea un prototipo y especifica la estructura o el comportamiento de dicho sistema, a poder visualizar a sus usuarios el producto final entre otros aspectos.

El modelado es útil tanto en pequeños como en grandes sistemas, de hecho si el sistema es muy grande y complejo el modelo se hace de alguna manera más importante.

Entre más complejo sea el sistema, requiere de más modelaje, si se construye un sistema simple y sencillo, al principio puede ser de esta manera, pero puede tener variables que lo hagan ser mas complejo al transcurso del tiempo, si no se hizo un modelado desde el principio se podría uno lamentar en un futuro.

A través del modelado, podemos llegar a reducir el problema que se está planteando o estudiando, centrándonos en un sólo aspecto a la vez. Se puede modelar formal o informalmente, pero este último nos proporciona un lenguaje común que se pueda compartir fácilmente con otras personas.

1.2. Objetivo

En el presente trabajo, se va a demostrar la manera en que se llegará a el mismo resultado final de un sistema, ya sea mecánico, eléctrico o electro-mecánico. Utilizando el método de Bond Graph y el método de diagrama de bloques.

Bond Graph es una representación gráfica de un sistema físico dinámico, en el cual nos vamos a apoyar para realizar nuestro caso de estudio. Con el cual vamos a corroborar que al tener un sistema físico, podemos obtener su Bond Graph y simularlo, y del mismo Bond Graph se puede obtener su diagrama de bloques y después simularlo.

También podemos obtener su modelo matemático, ya que con este, para las personas que desconocen la herramienta Bond Graph, pueden llegar a comprobar que si es correcta la simulación del sistema.

1.3. Justificación

Hoy en día, hay muchas herramientas que nos facilitan o reducen de una manera considerable el trabajo a realizar sobre dicho caso de estudio de cualquier sistema. En este trabajo que se está presentando, se utilizará esta herramienta muy eficaz y amigable con el usuario, llamada Bond Graph que tenemos a nuestro alcance. Apoyándonos en esta herramienta nosotros podremos llegar a un modelo de un circuito eléctrico de una manera relativamente simple. Y así promover esta herramienta relativamente nueva, ya que tiene muchas ventajas. Con esto, se pretende comprobar que mediante este método, podemos llegar a simular cualquier sistema, de una manera mucho mas sencilla, y corroborar que se llega al mismo fin utilizando el método de diagrama de bloques.

Ya que los diagramas de bloques, son una herramienta muy conocida y utilizada en diferentes áreas de las ingenierias. Tanto en procesos como en sistemas que se requieren modelar, para poder solucionar una problemática o para simplemente ver como se comporta o comportará nuestro sistema.

1.4. Metodología

La manera en que vamos a empezar nuestro caso de estudio es, primeramente nos vamos a documentar en lo que es la herramienta de Bond Graph,

saber su origen, quien y porqué fue la motivación a desarrollar esta herramienta y porqué nosotros la vamos a utilizar en este estudio que se va a realizar.

Después empezaremos a aplicar esta herramienta en nuestros casos de estudio, desde empezar a obtener el Bond Graph de cada circuito, teniendo en cuenta las reglas a seguir para no cometer errores en un futuro o saber como identificarlos de la mejor y mas rápida manera.

Posteriormente, empezaremos a obtener las ecuaciones y ya con esto empezar nosotros a simular nuestro sistema, ya con esto nosotros podremos llegar a verificar con el método de diagrama de bloques nuestros resultados, y poder compararlos para verificar que se hizo de manera correcta, y poder comprobar nuestro caso de estudio.

1.5. Contenido de la tesis

En el capítulo 1, se presenta una breve introducción sobre este trabajo, la importancia que representa modelar un sistema y lo que representa un diagrama de bloques de un sistema, nuestro caso de estudio en lo que se basa y porque se decidió tomar este tema en particular, ademas de abordar de manera muy general lo que es Bond Graph, en que consiste y porque es importante conocer esta herramienta.

En el capítulo 2, se explica la manera de obtener un Bond Graph de un circuito, las reglas que se deben tomar en cuenta para este proceso, y todos los componentes que contiene un Bond Graph, así como sus ecuaciones que se necesitan para llegar a obtener su modelo.

En el capítulo 3, se va a comprobar la relación que existe entre diagrama de bloques y Bond Graph, y corroborar que por los dos métodos es posible llegar al mismo resultado.

En el capítulo 4, se van a presentar los casos de estudio, ejemplos de sistemas eléctricos en los que se han trabajado y poder corroborar los resultados de los mismos, con Bond Graph y diagrama de bloques.

En el capítulo 5, se presentan las conclusiones y recomendaciones que en el desarrollo de esta tesis han dejado, tanto para poder seguir estudiando esta herramienta mas a detalle.

Capítulo 2

Antecedentes de Diagrama y bloques de Bond Graph

2.1. Introducción

En este capítulo vamos a ver lo que significa y que representan los diagramas de bloques en los sistemas que se van a simular, se va a explicar de forma breve en que consisten y los componentes que se requieren para poder hacer un diagrama de bloques. También vamos a explicar la manera de como utilizar Bond Graph, para obtener de un sistema su Bond graph, y los fundamentos en los que se basa esta herramienta.

2.2. Diagrama de bloques

En un sistema de control podemos tener infinidad de componentes, para poder mostrar las funciones que lleva a cabo cada componente en la ingeniería, se utiliza una representación denominada diagrama de bloques.

Un diagrama de bloques de un sistema, es una representación gráfica de las funciones existentes entre los diversos componentes. A diferencia de una representación matemática, un diagrama de bloques tiene la ventaja de indicar en forma mas realista el flujo de las señales del sistema real.

En un diagrama de bloques se enlazan una con otra todas las variables del sistema, mediante bloques funcionales. El bloque funcional, es un símbolo para representar la operación matemática que sobre la señal de entrada hace el bloque para producir la salida. Las funciones de transferencia de los

CAPÍTULO 2. ANTECEDENTES DE DIAGRAMA Y BLOQUES DE BOND GRAPH

componentes por lo general se introducen en los bloques correspondientes, que se conectan mediante flechas para indicar la dirección de flujo de señales.

La señal sólo puede pasar en la dirección de las flechas, por lo tanto un diagrama de bloques de un sistema muestra explícitamente una propiedad unilateral.

En la figura 2.1, muestra un elemento del diagrama de bloques. La punta de flecha que señala el bloque indica la entrada, y la punta de flecha que se aleja del bloque representa la salida. Tales flechas son conocidas como señales.



Figura 2.1: Elemento de un diagrama de bloques

La ventaja de la representación mediante diagramas de bloques de un sistema estriba en que es fácil formar el diagrama de bloques general de todo el sistema con solo conectar los bloques de los componentes de acuerdo con el flujo de señales del sistema.

Un diagrama de bloques contiene información relacionada con el comportamiento dinámico, pero no incluye información de la construcción física del sistema. Por lo tanto, muchos sistemas diferentes y no relacionados pueden representarse mediante el mismo diagrama de bloques. Es posible dibujar varios diagramas de bloques diferentes para un sistema, dependiendo del punto de vista del análisis.

2.2.1. Elementos que conforman la construcción de diagrama de bloques

a) Punto de suma, la representación de éste como se puede observar en la figura 2.2, es un círculo con una cruz indicando una operación de suma.

El signo de más o de menos en cada punta de la flecha indica si la señal se suma o se resta. Las cantidades que se sumen o se resten deben tener las mismas dimensiones y unidades.

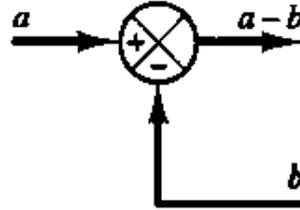


Figura 2.2: Punto de suma

b) Punto de ramificación. Un punto de ramificación es aquel a partir del cual la señal de un bloque va de modo concurrente a otros bloques o puntos suma.

c) Diagramas de bloques de un sistema en lazo cerrado.

La figura 2.3, muestra un ejemplo de un diagrama de bloques de un sistema en lazo cerrado, la salida $C(s)$ se realimenta al punto suma, en donde se compara con la entrada de referencia $R(s)$. La naturaleza en lazo cerrado del sistema se indica con claridad en la figura 2.3. La salida del bloque, $C(s)$ en este caso, se obtiene multiplicando la función de transferencia $G(s)$ por la entrada al bloque, $E(s)$. Cualquier sistema lineal puede representarse mediante un diagrama de bloques formado por puntos suma, bloques y puntos de ramificación.

Cuando la salida se realimenta al punto de suma para compararse con la entrada, es necesario convertir la forma de la señal de salida en la de de la señal de entrada.

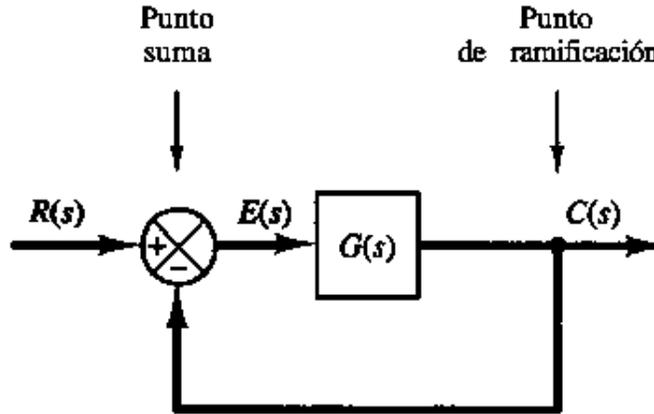


Figura 2.3: Diagrama de bloques de un sistema en lazo cerrado

Por ejemplo, en un sistema de control de temperatura, por lo general la señal de salida es la temperatura controlada. La señal de salida, que tiene la dimensión de la temperatura, debe convertirse a una fuerza, posición o voltaje antes de que pueda compararse con la señal de entrada. Esta conversión se consigue mediante el elemento de reglamentación, cuya función de transferencia es $H(s)$ como se aprecia en la figura 2.4.

La función del elemento de realimentación es modificar la salida antes de compararla con la entrada.

En este ejemplo, la señal de realimentación que retorna al punto suma para compararse con la entrada es $B(s) = H(s) * C(s)$.

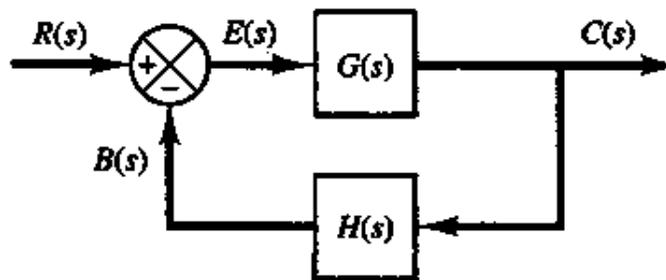


Figura 2.4: Sistema en lazo cerrado

2.3. Modelado en Bond Graph

La herramienta de Bond Graph fue definida por Paynter (1961), formalizada por Karnopp (1983), Rosenberg (1990), Thomas (1991) y Breedveld (1984), esta situada entre el sistema físico y los modelos matemáticos asociados. Esta técnica no tiene la pretensión universal, sin embargo ha demostrado su eficiencia en una gran gama de aplicaciones, para el diseño de sistemas, simulación y determinación de leyes de control, por esta manera se considera entre los métodos necesarios para la construcción de modelos.

Uno de los primeros pasos para el análisis de cualquier sistema dinámico, es obtener su modelo. Los modelos pueden tomar muchas formas distintas, según el sistema del que se valla a estudiar y de las circunstancias. Con estos modelos podemos nosotros resolver o tratar de resolver un problema propuesto.

El modelado en Bond Graph representa un enfoque unificado para el modelado y manipulación de sistemas dinámicos de ingeniería que permite obtener sus ecuaciones de estado y conocer sus propiedad de observabilidad, controlabilidad y dependencia lineal de sus elementos, basado en una representación gráfica y la generalización de los conceptos de variable de flujo y esfuerzo.

Un Bond Graph es una representación gráfica de un sistema dinámico donde una colección de componentes (como pueden ser resistencias, inductores, capacitores, transformadores, etc) interactúan unos con otros a través de puertos de energía. Estos componentes colocados en el sistema describe como fluye la potencia a través del sistema, también nos permite construir modelos de sistemas eléctricos, magnéticos, mecánicos, hidráulicos, neumáticos, y térmicos utilizando solamente un pequeño conjunto de elementos ideales.

2.3.1. Componentes Básicos de un Bond Graph

El componente básico de un Bond Graph es un bond de energía utilizado para acoplar los puertos de energía de los componentes del sistema.

El bond es representado por una semiflecha indicando en la dirección de esta como fluye la energía entre los puertos al cual está conectado, como se muestra en la figura 2.5.

CAPÍTULO 2. ANTECEDENTES DE DIAGRAMA Y BLOQUES DE BOND GRAPH



Figura 2.5: Bond de energía

Para modelar un sistema, es necesario dividir un sistema en partes más pequeñas que puedan ser modeladas y estudiadas experimentalmente, y después ensamblarlas al modelo del sistema. Así, las partes principales de un sistema son llamadas subsistemas y las partes no reducibles son llamadas componentes y básicamente, un subsistema es una parte de un sistema que es modelado como un sistema en si mismo, donde un componente es modelado como una entidad.

Los lugares en los cuales los subsistemas pueden ser interconectados, son lugares en los cuales la energía puede fluir, tales lugares son llamados puertos.

Los sistemas con un puerto sencillo es denotado puerto-1, un sistema con dos puertos es llamado puerto-2. Los sistemas multipuertos son denotados por puertos-n, donde n es el número de puertos.

Las variables que describen la unión de dos multipuertos que son conectados son llamadas variables de potencia a causa de que el producto de las variables consideradas como funciones del tiempo es la potencia instantánea fluyendo entre los dos multipuertos.

Dado que existen interconexiones de potencia cuando dos puertos son conectados, es útil clasificar la variedad de variables de potencia en un esquema universal y describir todos los tipos de multipuerto en un lenguaje común. Las variables de potencia son llamadas esfuerzo $e(t)$ y flujo $f(t)$.

Estas variables son llamadas variables de bond generalizadas debido a que pueden ser utilizadas en todos los dominios de energía. En la figura 2.6 se muestra la representación de un bond con las variables de potencia asociadas.

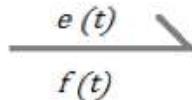


Figura 2.6: Bond con sus variables de potencia

Para el análisis de los circuitos eléctricos en Bond Graph, consideraremos como sistema a un circuito eléctrico, los puertos de energía como los nodos

y los bonds como unión de los nodos.

2.3.2. Elementos básicos en el modelado de un circuito eléctrico en Bond Graph

En los siguientes apartados se presentan un conjunto de elementos básicos que serán utilizados para poder modelar un circuito eléctrico.

2.3.3. Puestos-1 pasivos

Consideramos que los elementos ideales, los cuales representan disipación de potencia y dos formas de almacenamientos de energía; llamados a estos elementos pasivos.

Se denominan Puertos-1 pasivos, a aquellos elementos que intercambian potencia en un puerto o elemento sencillo pasivo.

Puertos pasivos R: la disipación de energía en Bond Graph representa a aquellos elementos donde exista pérdida de energía y se representa mediante el elemento R.

El ejemplo claro que tenemos es la resistencia, que al paso de la intensidad de corriente que fluye a través de esta, produce una caída de tensión.

Este elemento se representa en Bond Graph de la siguiente manera en la figura 2.7.

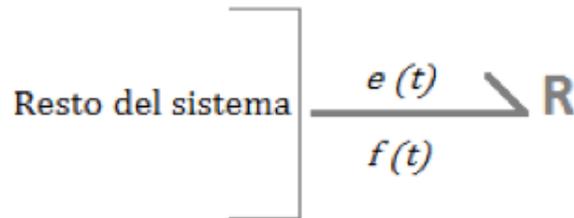


Figura 2.7: Elemento R

Puertos pasivos C: Una de las formas de almacenamiento de energía se representa mediante el elemento C, en el caso del análisis de circuitos eléctricos es el capacitor.

Este elemento se representa en Bond Graph como se muestra en la siguiente figura 2.8.

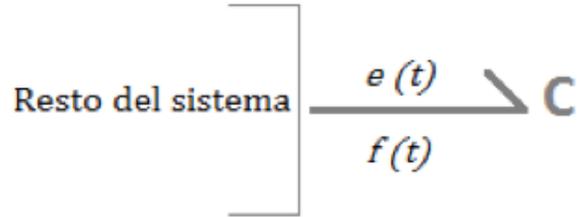


Figura 2.8: Elemento C

Puertos pasivos L: Otro caso de estudio de almacenamiento de energía se representa mediante el elemento L, en el caso de los circuitos eléctricos es el almacenamiento de energía en forma de campo magnético.

Este elemento se representa en Bond Graph como se muestra en la siguiente figura 2.9.

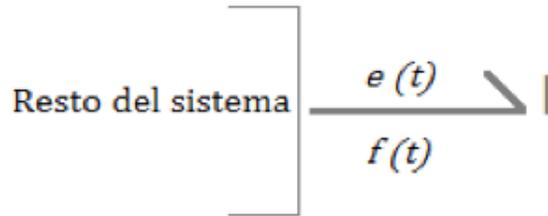


Figura 2.9: Elemento L

2.3.4. Puertos -1 activos o fuentes

Los elementos fuente son aquellos que proporcionan potencia al mismo sistema. Esta potencia puede ser suministrada mediante un flujo o un esfuerzo.

Una de las formas de generación de energía se presenta mediante el elemento MSe (fuente de esfuerzo) como se muestra en la figura 2.10.

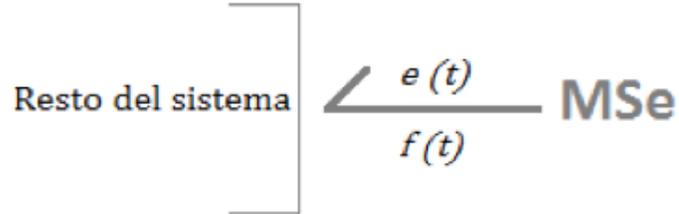


Figura 2.10: Elemento de fuente de energía

El elemento Mse, puede representar el ingreso de energía por la presencia de una fuente ideal de tensión, en el caso de los circuitos eléctricos.

La generación de energía se representa en otros casos mediante el elemento MSf (fuente de flujo) como se puede apreciar en la figura 2.11.

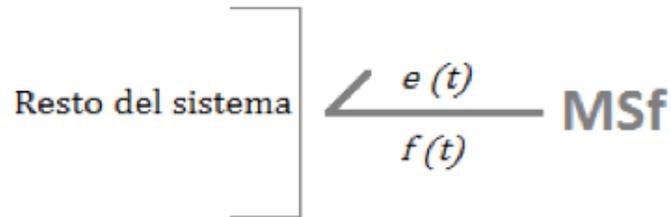


Figura 2.11: Elemento de fuente de flujo

El elemento MSf, puede representar el ingreso de energía por la presencia de una fuente ideal de corriente, en el caso de los circuitos eléctricos.

2.3.5. Elementos ideales de puerto -2

El acople entre subsistemas también suele darse de forma tal que ambas variables (esfuerzo y flujo) se ven afectadas. En algunos casos, esto se representa mediante un transformador TF, como se muestra en la figura 2.12.

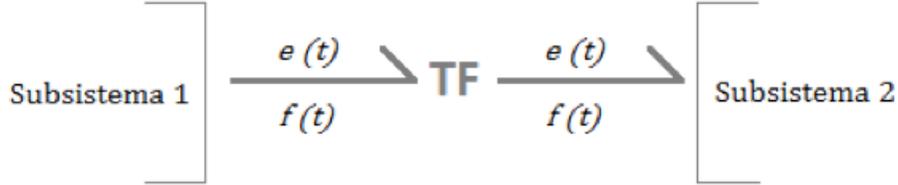


Figura 2.12: Elemento transformador

Las relaciones en ambos lados del transformados son:

$$m * f1(t) - f2(t) = 0 \quad (2.1)$$

y

$$m * e2(t) - e1(t) = 0 \quad (2.2)$$

El elemento TF puede representar un transformador eléctrico en el análisis de circuitos eléctricos.

El elemento girador es similar al transformador, pero cuando las variables se relacionan de manera cruzada, el elemento estructural se denomina girador GY y se representa como se muestra en la figura 2.13.

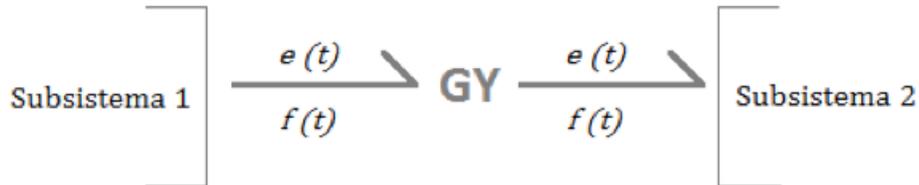


Figura 2.13: Elemento girador

$$m * f1(t) - e2(t) = 0 \quad (2.3)$$

y

$$m * f2(t) - e1(t) = 0 \quad (2.4)$$

El elemento GY puede representar la conversión electromecánica de energía, es decir, que en el análisis de circuitos eléctricos representa a motores y generadores.

2.3.6. Elementos de unión puerto -3

Estos puertos-3 son llamados uniones dado que sirven para interconectar tres o mas puertos de energía dentro de un subsistema. Estos puertos-3 representan en forma de multipuerto los dos tipos de conexiones en serie y paralelo.

En aquellos puntos donde existen una o varias entradas de energía y una o varias salidas de esta misma, se forma un nodo, cuya característica fundamental es que se cumple el principio de la conservación de la energía.

La representación de dicho punto se muestra en la figura 2.14.

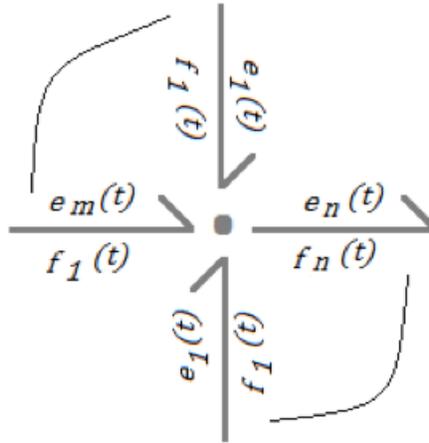


Figura 2.14: Union puerto-3.

Debido al principio de conservación de la energía se cumplirá que:

$$\sum_{i=1}^m e^i * f_1 = \sum_{j=1}^m e_j * f_j \quad (2.5)$$

La suma de los productos $e * f$ asociados a cada nodo de entrada es igual a la suma de los productos de salida, lo que equivale a decir que no ha habido perdida de energía en el nodo.

Por lo tanto en los nodos se cumple que.

$$\sum (e * f)_{entrada} = \sum (e * f)_{salida} \quad (2.6)$$

2.3.7. Tipos de uniones

Existen dos tipos de uniones que se denominan unión 0 y unión 1.

La unión de esfuerzo, unión 1 o de flujo común para la conexión serie se representa como se muestra en la figura 2.15.

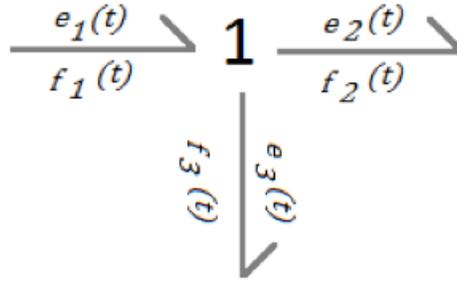


Figura 2.15: Unión de esfuerzo o flujo común

La relación de interconexión para este elemento es:

$$f_1(t) = f_2(t) = f_3(t) \quad (2.7)$$

Por conservación de la energía:

$$e_1(t) * f_1(t) = (e_2(t) * f_2(t)) + (e_3(t) * f_3(t)) \quad (2.8)$$

$$e_1(t) * f_1(t) = (e_2(t) * f_1(t)) + (e_3(t) * f_1(t)) \quad (2.9)$$

$$e_1(t) = e_2(t) + e_3(t) \quad (2.10)$$

La unión de flujo, unión 0 o unión de esfuerzo común para conexión en paralelo, la representación de esta unión se muestra en la figura 2.16.

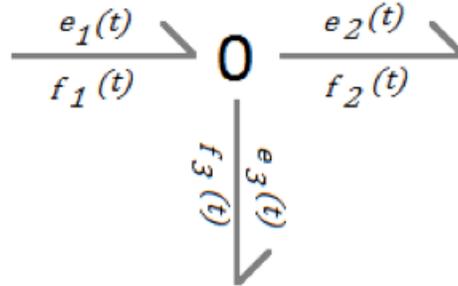


Figura 2.16: Unión de flujo o de esfuerzo común

Por ser unión 0 se cumple que:

$$e_1(t) = e_2(t) = e_3(t) \quad (2.11)$$

y debido a la conservación de la energía, se tiene que:

$$e_1(t) \cdot f_1(t) = (e_2(t) \cdot f_2(t)) + (e_3(t) \cdot f_3(t)) \quad (2.12)$$

En consecuencia se tiene que:

$$e_1(t) \cdot f_1(t) = (e_1(t) \cdot f_2(t)) + (e_1(t) \cdot f_3(t))$$

$$e_1(t) \cdot f_1(t) = e_1(t) \cdot (f_2(t) + f_3(t))$$

$$f_1(t) = f_2(t) + f_3(t) \quad (2.13)$$

Lo que significa que en las uniones tipo 0, la suma de los flujos de entrada es igual a la suma de los flujos de salida.

2.3.8. Bond Activo

Un bond normal tiene dos señales, esfuerzo $e(t)$ y flujo $f(t)$ a diferencia, un bond activo comunica una de las señales posibles en una sola dirección.

Un bond activo se representa por una flecha completa, como se muestra en la figura 2.17, indicando un flujo de señal de potencia cero.



Figura 2.17: Bond activo

CAPÍTULO 2. ANTECEDENTES DE DIAGRAMA Y BLOQUES DE BOND GRAPH

Un bond activo se utiliza como una señal en un diagrama de bloques, la cuál conecta a otro sin consumir energía como se ilustra en la figura 2.18.

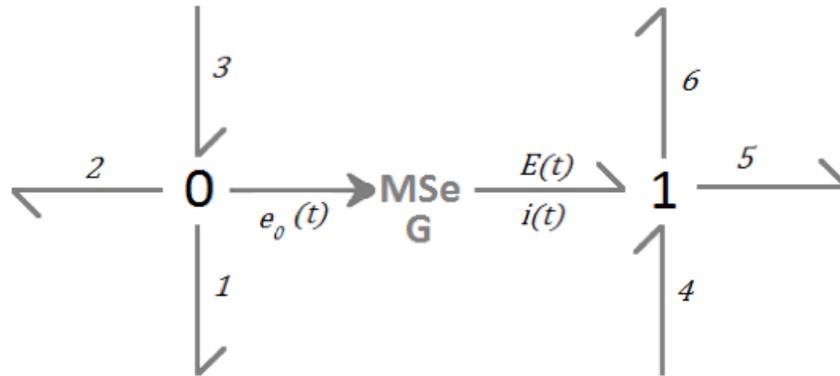


Figura 2.18: Bond activo como señal de diagramas de bloque

El bond activo que entra a Mse indica que $E(t)$ es modulada por $e_0(t)$, así, $E(t) = Ge_0(t)$, donde G es la ganancia de voltaje.

El bond activo viene de una unión -0 el $e_0(t)$ es el mismo que e_1 , e_2 y e_3 .

Además el bond activo tiene potencia cero debido a que se considera que la corriente correspondiente a $e_0(t)$ es despreciable. La suma de corrientes en la unión -0 se debe únicamente a i_1 , i_2 y i_3 .

2.3.9. Causalidad para los multipuertos básicos

Para organizar las leyes constitutivas de los componentes en conjuntos de ecuaciones diferenciales necesitamos definir relaciones de causa y efecto. Las relaciones de causa-efecto para esfuerzos y flujos son representadas en direcciones opuestas. Una marca en bond, llamado trazo causal, indica como $e(t)$ y $f(t)$, simultáneamente son determinados causalmente en un bond. El trazo causal indica un sentido de entrada para $e(t)$ y salida para $f(t)$ en cada puerto de los dos componentes juntos, es decir el esfuerzo entra en un bond en el mismo sentido del trazo causal. Las reglas que se deben cumplir en los trazos causales se presentan en la tabla de la figura 2.19.

CAPÍTULO 2. ANTECEDENTES DE DIAGRAMA Y BLOQUES DE BOND GRAPH

<i>Causalidad Necesaria</i>	$MSe \text{ --- }$	$MSf \text{ ---}$
<i>Causalidad Restrictiva</i>	--- TF--- --- GY--- 	 ---TF--- ---GY---
	--- 0--- 	 ---0---
	 ---1--- 	--- 1---
	 ---1--- 	--- 1---
<i>Causalidad Integral</i>	--- I	 ---C
<i>Causalidad Derivativa</i>	 ---I	--- C
<i>Causalidad Arbitraria</i>	--- R	 ---R

Figura 2.19: Causalidad de los elementos

El concepto de causalidad y el uso de esta idea con respecto a multipuertos básicos, algunos de ellos son fuertemente afectados, otros se mantienen relativamente indiferentes a la causalidad y otros actúan de diferentes formas para diferentes casualidades.

2.3.10. Asignación de causalidad de un multipuerto

Procedimiento 1

1. Considerar cualquier MSe o MSf y asignar una causalidad requerida e inmediatamente extender las implicaciones causales, usando las restricciones de 0,1,TF y GY. (Ver tabla 2.1)
2. Asignar causalidad integral o derivativa a los elementos C e I respetando las restricciones de la tabla 2.1
3. Escoger cualquier R que no esté asignado y dar una causalidad arbitraria a R. Extender las implicaciones usando 0,1,TF y GT. (Ver tabla 2.1).

Los componentes básicos para el modelado de sistemas físicos han sido estudiados en esta sección, así, a continuación se proporcionan un procedimiento general para modelado de sistemas eléctricos, el cual es la base para la construcción de modelos y determinación de la ecuación de estado o modelo matemático.

Procedimiento para el modelado de sistemas eléctricos

Con los antecedentes vistos en el apartado anterior, ahora se puede adentrar al modelado, usando los elementos básicos. En esta sección, se explica como representar sistemas físicos en Bond Graph utilizando un procedimiento de modelado simple y directo.

Posteriormente se estudia una metodología para obtener el modelo matemático de un sistema en Bond Graph utilizando su estructura de unión.

Procedimiento 2

1. Dibujar una unión -0 para cada punto en el esquema donde las trayectorias paralelas coincidan.
2. Dibujar una unión -1 para cada componente en una trayectoria serie y conectar el componente apropiado de Bond Graph por un Bond en esa unión. La dirección de la semiflecha en cada bond indica la dirección asumida del flujo de potencia, es decir, a partir de fuentes y hacia elementos almacenadores y elementos disipadores.

CAPÍTULO 2. ANTECEDENTES DE DIAGRAMA Y BLOQUES DE BOND GRAPH

3. Dibujar bonds entre uniones adyacentes, nuevamente indicando la dirección de flujo de potencia.
4. Remover la unión -0 que representa el punto de referencia y remover todos los bonds conectados a esta unión.
5. Simplificar la gráfica de acuerdo a las siguientes reglas mostradas en la figura 2.19.
6. Finalmente asignar la causalidad del procedimiento 1, respetando las restricciones de la figura 2.1



Figura 2.20: Reducción de bonds

2.3.11. Modelo matemático en Bond Graph

Cuando se tiene el modelo en Bond Graph de un sistema físico, se puede conocer el modelo matemático que define las relaciones de los elementos que conforman el sistema físico.

Vectores clave o vectores significativos

En un Bond Graph en forma convencional, todos los bonds pueden ser clasificados en Bonds externos, que conectan a los elementos o puertos R,C,I,MSe y MSf, y en bonds internos que conectan 0,1,TF y GY. Así mismo, los bonds externos pueden ser clasificados de acuerdo a su forma de manifestación de energía. En la figura 2.20 se muestra el diagrama a bloques de la estructura unió de un Bond Graph.

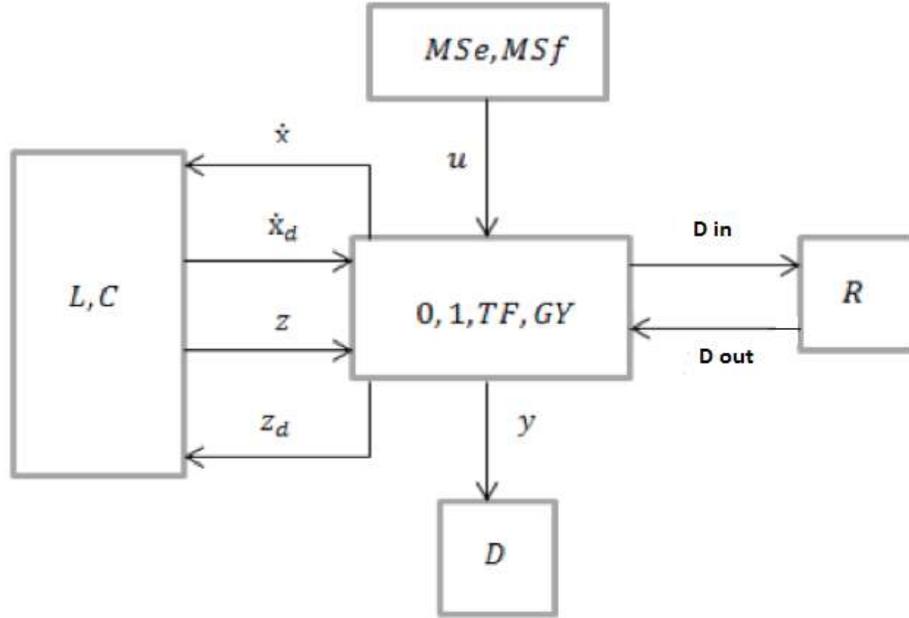


Figura 2.21: Diagrama de bloques de la estructura de unión de un Bond Graph

En la figura 2.21, las variables MSe , MSf , y L , C y R denotan los campos de fuente de almacenamiento y de disipación respectivamente, D el detector y $0, 1, TF, GY$ la estructura de unión con transformadores, TF , giradores, GY , uniones -0 y uniones -1 .

Los vectores que representan el sistema, llamados vectores clave están representados en la figura 2.20 donde $u(t)$ contiene las variables de potencia o los esfuerzos y flujos impuestos por los elementos de las fuentes en la estructura de unión. Los estados $x(t)$ y $x_d(t)$ están compuestos de variables de energía, momento generalizado $p(t)$ en elementos C en causalidad integral y derivativa respectivamente. $z(t)$ y $z_d(t)$ son variables clave de co-energía en causalidad integral derivativa respectivamente, $D_{in}(t)$ y $D_{out}(t)$ son mezcla de esfuerzos y flujos que muestran los intercambios energéticos entre el campo y disipación y la estructura de unión.

La tabla de la figura 2.22 de co-energía para formar las matrices es la siguiente.

Elemento	x	x^0	z
I	p	e	f
C	q	f	e

Figura 2.22: Valores de co-energía

Las matrices quedan de la siguiente manera dependiendo de los elementos que compongan nuestro sistema, y así mismo tendrán los subíndices debidos dependiendo de cada elemento.

$$x = \begin{bmatrix} p \\ q \end{bmatrix}; \frac{dx}{dt} = \begin{bmatrix} e \\ f \end{bmatrix}; z = \begin{bmatrix} f \\ e \end{bmatrix}; Din = \begin{bmatrix} e \\ f \end{bmatrix}; Dout = \begin{bmatrix} f \\ e \end{bmatrix} \quad (2.14)$$

Relaciones constitutivas

El comportamiento de un elemento específico está descrito por una ley física, la cual es llamada como sus relaciones constitutivas. Si las relaciones constitutivas son lineales tenemos:

$$z(t) = Fx \quad (2.15)$$

$$z_d(t) = F_d x_d(t) \quad (2.16)$$

$$Dout = LDin \quad (2.17)$$

Donde L, F y F_d son matrices reales de dimensiones $r \times r$, $n \times n$ y $m \times m$, respectivamente.

$$\begin{bmatrix} x^0(t) \\ Din(t) \\ y(t) \end{bmatrix} = S \begin{bmatrix} z(t) \\ Dout(t) \\ u(t) \\ x_d^0(t) \end{bmatrix} \quad (2.18)$$

Donde la estructura de unión está formada por:

$$s = \begin{bmatrix} s_{11} & s_{12} & s_{13} \\ s_{21} & s_{22} & s_{23} \\ s_{31} & s_{32} & s_{33} \end{bmatrix} \quad (2.19)$$

CAPÍTULO 2. ANTECEDENTES DE DIAGRAMA Y BLOQUES DE BOND GRAPH

Los elementos de S toman valores dentro de un conjunto $\{0, \pm 1, \pm n, \pm r\}$ donde n y r son los módulos del transformador y el girador. La matriz S está particionada de acuerdo a la dimensión de sus vectores clave. Las submatrices s_{ij} tienen las siguientes propiedades:

1. La propiedad de que S_{11} y S_{22} son matrices cuadradas asimétricas.
2. La propiedad de que S_{12} es la matriz transpuesta negativa de S_{21} y viceversa.

Las propiedades 1 y 2 están basadas en el principio de la conservación de la energía.

Para llegar a obtener los valores de $x^0 = Ax + Bu$ vamos a hacer el siguiente desarrollo.

$$Din = S_{21}Z + S_{22}Dout + S_{23}U$$

$$Din = S_{21}Z + S_{22}LDin + S_{23}U$$

$$Din - S_{22}LDin = S_{21}Z + S_{23}U$$

$$(I - S_{22}L)Din = S_{21}Z + S_{23}U$$

$$Din = (I - S_{22}L)^{-1}(S_{21}Z + S_{23}U)$$

Sustituyendo Din en la siguiente ecuación nos queda:

$$x^0 = S_{11}Z + S_{12}Dout + S_{13}U = S_{11}Z + S_{12}LDin + S_{13}U$$

$$x^0 = S_{11}Z + S_{12}L(I - S_{22}L)^{-1}(S_{21}Z + S_{23}U) + S_{13}U$$

Factorizando términos nos queda lo siguiente:

$$x^0 = S_{11}Z + S_{12}L(I - S_{22}L)^{-1}S_{21}Z + S_{12}L(I - S_{22}L)^{-1}S_{23}U + S_{13}U$$

De donde podemos obtener los valores de:

CAPÍTULO 2. ANTECEDENTES DE DIAGRAMA Y BLOQUES DE BOND GRAPH

$$A = [S_{11} + S_{12}MS_{21}]F \quad (2.20)$$

$$B = [S_{13} + S_{12}MS_{23}] \quad (2.21)$$

$$M = L(I - S_{22}L)^{-1} \quad (2.22)$$

En algunos casos cuando $S_{22} = 0 = M = L$.

En el caso de que no sean iguales se utiliza la siguiente fórmula.

$$S_{22} \neq 0; M = L(I - S_{22})^{-1}$$

Donde la matriz I, es la matriz identidad.

De la siguiente manera, solo nos falta obtener los valores de Y, para completar nuestro sistema de matrices.

Lo obtenemos de la siguiente manera:

$$Din = (I - S_{22}L)^{-1}(S_{21}Z + S_{23}U)$$

$$Y = S_{31}Z + S_{23}Dout + S_{33}U = S_{31}Z + S_{32}LDin + S_{33}U$$

$$Y = S_{31}Z + S_{32}L(I - S_{22}L)^{-1}(S_{21}Z + S_{23}U) + S_{33}U$$

$$Y = [S_{31} + S_{32}L(I - S_{22}L)^{-1}S_{21}]Z + [S_{33} + S_{32}L(I - S_{22}L)^{-1}S_{23}]U$$

$$Y = LX + DU \left\{ \begin{array}{l} C = [S_{31} + S_{32}MS_{21}]F \\ D = S_{33} + S_{32}MS_{23} \end{array} \right\} \quad (2.23)$$

Ya teniendo nuestros valores de A,B,C y D, podemos llegar a obtener las siguientes ecuaciones, que son las variables de estado que definen a un sistema físico.

$$\frac{dx}{dt} = Ax + BU \quad (2.24)$$

$$y = CX + DU \quad (2.25)$$

CAPÍTULO 2. ANTECEDENTES DE DIAGRAMA Y BLOQUES DE BOND GRAPH

En la siguiente figura 2.2, se presenta un ejemplo del modelado y la solución de un circuito eléctrico.

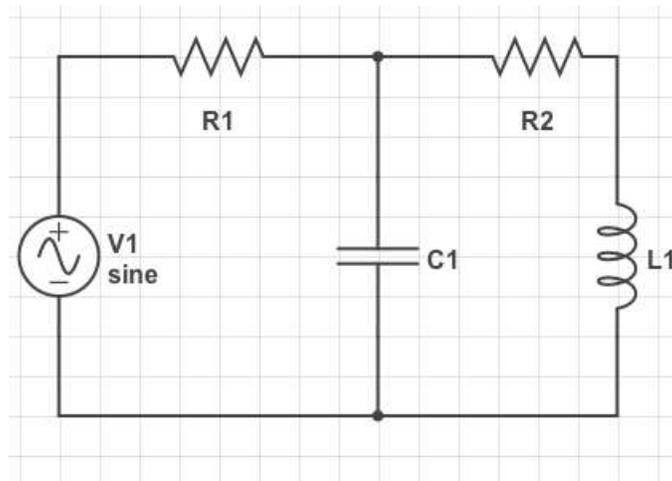


Figura 2.23: Circuito eléctrico

Los pasos a seguir (1,2,3) del procedimiento 2, antes mencionado en el capítulo pasado, se ilustran en la figura 2.23.

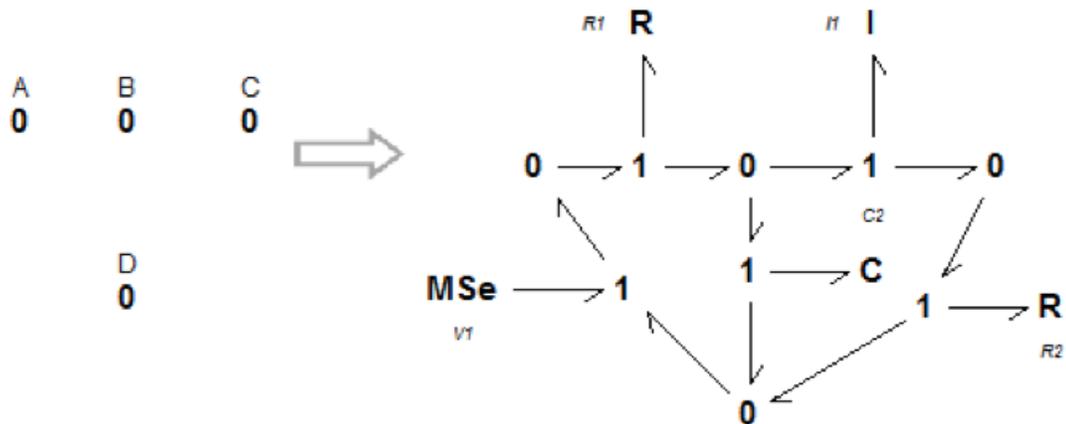


Figura 2.24: Primer modelo en Bond Graph

CAPÍTULO 2. ANTECEDENTES DE DIAGRAMA Y BLOQUES DE BOND GRAPH

Finalmente, reduciendo y agregando los trazos causales, utilizando el paso 4,5 y 6 del procedimiento 2, se obtiene el Bond Graph mostrado en la figura 2.24

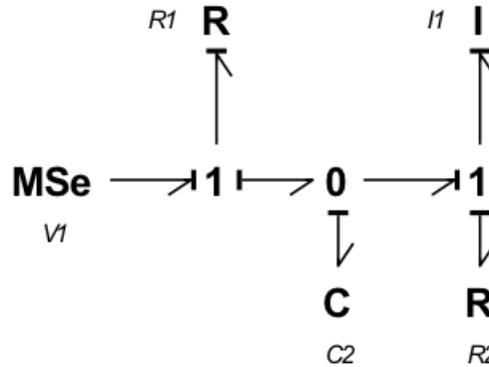


Figura 2.25: Modelo final del circuito eléctrico en Bond Graph

A partir de este modelo en Bond Graph mostrado anteriormente en la figura 2.24, se obtiene el modelo matemático, comenzando por enumerar los bonds que unen los elementos del circuito como se muestra en la figura 2.25

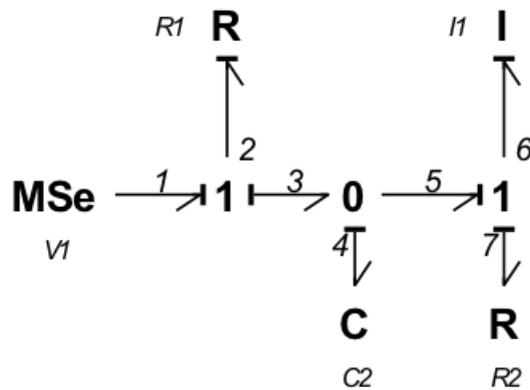


Figura 2.26: Enumeración de bonds

Se tiene una relación de los vectores clave, asociados con las variables de cada uno de los elementos, para obtener las ecuaciones de estado. Como se muestra en la siguiente tabla. 2.26

CAPÍTULO 2. ANTECEDENTES DE DIAGRAMA Y BLOQUES DE BOND GRAPH

Relacion de vectores clave			
q	x	\dot{x}	z
p	q	f	e
l	p	e	f
R			$D_{in} = f$ $D_{out} = e$
			$D_{in} = e$ $D_{out} = f$

Figura 2.27: Relación de vectores clave con los elementos del sistema eléctrico

Proseguimos a asignar la entrada a nuestro sistema $u(t) = e_1$ que es el voltaje que entra al sistema eléctrico y como salida a $y(t) = f_7$ que es la corriente que fluye en el inductor se tiene entonces que:

$$x = \begin{bmatrix} q_4 \\ p_7 \end{bmatrix}; \frac{dx}{dt} = \begin{bmatrix} f_4 \\ e_7 \end{bmatrix}; z = \begin{bmatrix} e_4 \\ f_7 \end{bmatrix}$$

Para los elementos resistivos se tiene que:

$$D_{in} = \begin{bmatrix} e_2 \\ f_6 \end{bmatrix}$$

$$D_{out} = \begin{bmatrix} f_2 \\ e_6 \end{bmatrix}$$

Para obtener las demás ecuaciones y poder completar la matriz de estructura unión, usamos las reglas básicas en las uniones 0 y uniones 1, el flujo en

CAPÍTULO 2. ANTECEDENTES DE DIAGRAMA Y BLOQUES DE BOND GRAPH

una unión 1, será igual y el esfuerzo diferente, y en la unión 0 el esfuerzo es igual y el flujo diferente, de lo cual obtenemos que:

$$f_4 = f_3 - f_5; f_3 = f_2$$

$$f_4 = f_2 - f_5$$

$$e_7 = e_5 - e_6; e_4 = e_5$$

$$e_7 = e_4 - e_6$$

$$e_2 = e_1 - e_3; e_3 = e_4$$

$$e_2 = e_1 - e_4$$

$$f_6 = f_7$$

Con lo anterior formamos la matriz de estructura unión.

$$\begin{bmatrix} f_4 \\ e_7 \\ e_2 \\ f_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & -1 & 0 \\ -1 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e_4 \\ f_7 \\ f_2 \\ e_6 \\ e_1 \end{bmatrix}$$

Se cumplen las propiedades 1 y 2 de las submatrices.

Para obtener las matrices L y F se tiene lo siguiente.

$$z = Fx; \begin{bmatrix} e_4 \\ f_7 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1/C_1 & 0 \\ 0 & 1/L_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} q_4 \\ p_7 \end{bmatrix}$$

$$Dout = LDin; \begin{bmatrix} f_2 \\ e_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1/R_1 & 0 \\ 0 & R_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e_2 \\ f_6 \end{bmatrix}$$

Para la matriz M tenemos:

CAPÍTULO 2. ANTECEDENTES DE DIAGRAMA Y BLOQUES DE BOND GRAPH

$$M = L(I - S_{22}L)^{-1}; S_{22} = 0; M = L$$

Para poder encontrar el valor de los coeficientes de A,B,C y D se realizan las operaciones indicadas en las ecuaciones 20,21,22y 23, los resultados finales son:

$$A = \begin{bmatrix} -1/R_1C_1 & -1/L_1 \\ 1/C_1 & R_2/L_1 \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} 1/R_1 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$C = [0 \quad 1/L_1]$$

$$D = 0$$

Cuando ya se tienen los coeficientes anteriores se pueden formar las ecuaciones de estado del circuito eléctrico.

$$\frac{dx}{dt} = AX + BU$$

$$\begin{bmatrix} \dot{f}_4 \\ \dot{e}_7 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -1/R_1C_1 & -1/L_1 \\ 1/C_1 & R_2/L_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_4 \\ e_7 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1/R_1 \\ 0 \end{bmatrix} e_1$$

$$y = CX + DU$$

$$f_7 = [0 \quad 1/L_1] \begin{bmatrix} q_4 \\ p_7 \end{bmatrix} + 0$$

Las ecuaciones anteriores son llamadas ecuaciones de estado que son las que definen un sistema físico, que en este caso es un circuito eléctrico. Se puede notar que el procedimiento es simple y claro.

Con lo presentado anteriormente quedan las bases para poder construir el modelo de un circuito eléctrico así como su modelo matemático.

Capítulo 3

Relación de diagrama de bloques y Bond Graph

3.1. Introducción

En este capítulo se va a describir la manera de obtener un diagrama de bloques a partir de un Bond Graph, siguiendo con la metodología adecuada a estas técnicas.

También se va a explicar, como fué que se obtuvieron los diagramas de bloques de los circuitos, de forma breve, se realizarán una serie de pasos para ir formando nuestro diagrama de bloques y así llegar a el diagrama final de cada circuito.

Ya que con esto, podemos observar la equivalencia que existe entre estas dos herramientas, y con esto poder llegar a elegir, que herramienta es más adecuada dependiendo de los casos de estudio que se lleguen a tener.

3.2. Equivalencia de BG y DB

Los diagramas de bloques (**DB**), indican cantidades de entrada y salida para cada bloque, y por lo tanto son causales inherentemente.

Cuando los trazos causales son añadidos a un Bond Graph (**BG**), uno puede representar la información para un diagrama de bloques.

Las versiones de diagramas de bloques de las formas causales para los puertos -1,R,C e I son dados de la figura 3.1.

CAPÍTULO 3. RELACIÓN DE DIAGRAMA DE BLOQUES Y BOND GRAPH

Podemos observar el elemento uno de la figura 3.1, es una resistencia donde el esfuerzo va saliendo del bloque de la resistencia y entra flujo, esto es consecuencia de que la causalidad va en la parte inicial del bond, en este caso hacia la izquierda va el sentido del esfuerzo y hacia la derecha el flujo, tal como se indica en el diagrama de bloques.

En los casos contrarios que la causalidad va en sentido opuesto, como es el elemento dos de la figura 3.1, sucede de igual manera sólo en sentido opuesto para el esfuerzo y el flujo, observar también que en el diagrama de bloques es la inversa de la resistencia.

En el elemento numero tres, tenemos el capacitor. Este elemento, por lo general y de preferencia se trata que su causalidad de como resultado integrativa, ya que si da derivativa como en el número cuatro, puede llegar a ser un poco más complicado trabajar con este tipo de elementos en esa forma.

Se puede observar, como en el caso anterior que el esfuerzo en el número 3 sale, y es la inversa de el capacitor. Por consecuencia en el número cuatro pasa lo contrario. Esto es debido a que como en el caso de la resistencia y su inversa, una integral es la operación inversa de una derivada

El elemento seis de la figura 3.1, es el inductor. En este dispositivo, la manera en que se utilizará es muy similar a la del capacitor, tomando en cuenta la causalidad de este elemento, de preferencia procurar siempre que quede de manera integrativa. Donde podemos observar que el esfuerzo entra y el flujo sale de los bloques, y se utiliza también el inverso del inductor.

Similarmente, diagramas de bloques para puertos -2 y puertos -3, correspondiente son mostrados en las figuras 3.2, 3.3.

En este caso en particular, en los elementos número 7 y 8 de la figura 3.2, se puede observar que existe cierta simetría en las causalidades que se le deben de asignar a los transformadores. Ya sea que los esfuerzos entren al sistema como en el número 8, que es el inverso, o que el esfuerzo salga de los bloques como en el caso numero 7.

De la misma manera, existen los elementos giradores para Bond Graph y diagrama de bloques. Como los podemos observar en la figura 3.2, el caso es totalmente asimétrico respecto a los transformadores, respetando siempre la causalidad correspondiente y tomando en cuenta la dirección que se le asigne al flujo y esfuerzo.

Por último nos quedan los puertos -3, mostrados en la figura 3.3, que estos son los nodos con los que vamos a enlazar los elementos que se tengan en cualquier circuito, diagrama de bloques, o Bond Graph.

CAPÍTULO 3. RELACIÓN DE DIAGRAMA DE BLOQUES Y BOND GRAPH

Siguiendo las reglas respectivas para la causalidad, el número once es la unión paralelo, la cual se puede observar que existe un punto de suma de flujos, dependiendo de el sentido que tome cada uno, así será el signo que se aplique en el.

Posteriormente, se tiene el número, 12, que es la unión serie, se puede observar de la misma manera la existencia de asimetría en este nodo respecto al pasado. Notar que el punto de suma existente en este diagrama de bloques ahora es para los esfuerzos que existan en cada Bond Graph.

Debería de ser posible correlacionar las trayectorias de flujo de señal en los diagramas de bloques, con las ecuaciones en las tablas y con la representación de Bond Graph.

Notar que cuando uno mantiene rigurosamente los arreglos espaciales con esfuerzos arriba y a la izquierda de bonds y de flujos abajo y a la derecha, los diagramas de bloques tienen modelos adaptados.

También, puede ser visto que los diagramas de bloques son más complejos gráficamente que Bond Graph, debido a que un bond sencillo tiene dos señales de flujo.

Inicialmente, diagramas de bloques son más fácil de comprender que bond graphs porque ellos contienen información redundante.

Para sistemas con alguna complejidad, sin embargo, diagramas de bloques rápidamente llegan a ser muy complejos que lo concreto de bond graphs, esto es una gran ventaja significativa.

La cual podemos observar en los ejemplos, que se desarrollan en las siguientes secciones.

CAPÍTULO 3. RELACIÓN DE DIAGRAMA DE BLOQUES Y BOND GRAPH

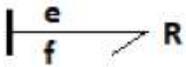
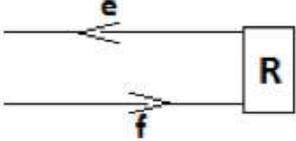
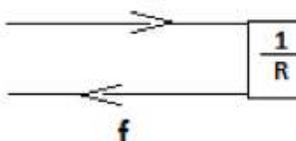
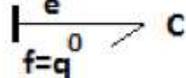
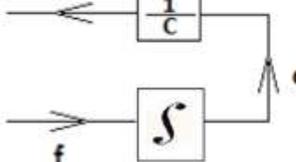
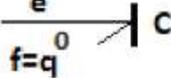
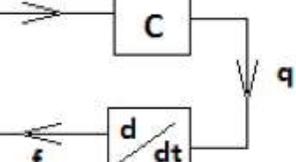
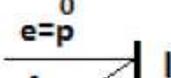
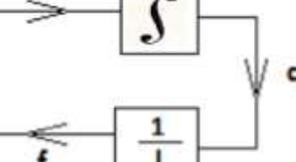
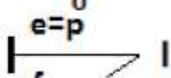
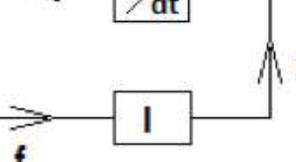
Numero de Elemento	Elemento en Bond Graph	Elemento en Diagrama de Bloques
1		
2		
3		
4		
5		
6		

Figura 3.1: Diagramas de bloques para puertos -1

CAPÍTULO 3. RELACIÓN DE DIAGRAMA DE BLOQUES Y BOND GRAPH

Numero de Elemento	Elemento en Bond Graph	Elemento en Diagrama de Bloques
7		
8		
9		
10		

Figura 3.2: Diagrama de bloques para puertos -2

CAPÍTULO 3. RELACIÓN DE DIAGRAMA DE BLOQUES Y BOND GRAPH

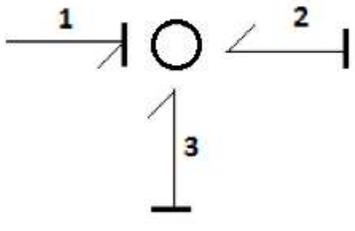
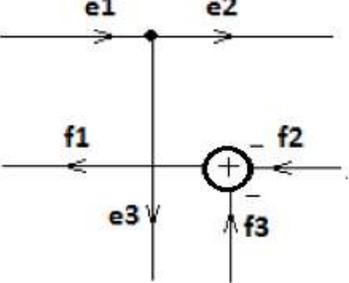
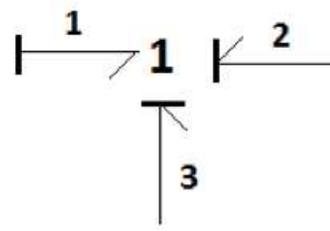
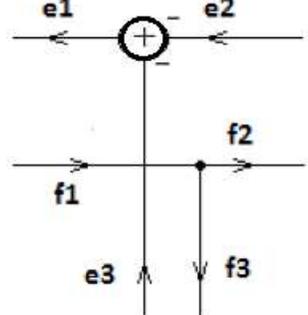
Numero de Elemento	Elemento en Bond Graph	Elemento en Diagrama de Bloques
11		
12		

Figura 3.3: Diagrama de bloques para puertos -3

3.3. Circuito de una malla

Teniendo el circuito de una malla de la figura 3.4, procedemos a obtener el Bond Graph y su diagrama de bloques del mismo.

El Bond Graph del circuito de una malla, es el de la figura 3.5.

El primer paso que se hace es identificar la cantidad de nodos y de que tipo son, en este caso tenemos un nodo en serie, ya que nuestro circuito es de una malla todos nuestros elementos están en serie y comparten el mismo nodo.

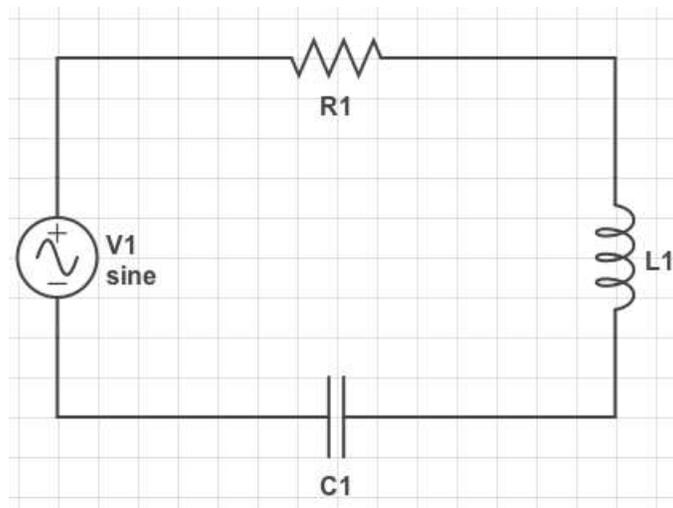


Figura 3.4: Circuito eléctrico de una malla

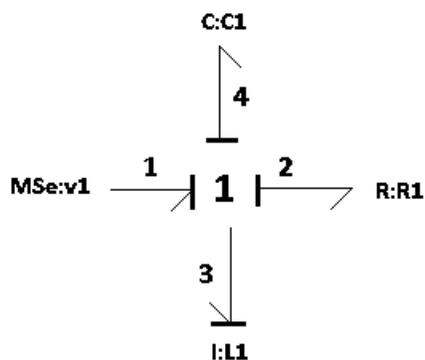


Figura 3.5: Bond Graph del circuito de una malla

El modelo matemático para el circuito de la figura 3.5, se obtiene de la siguiente manera:

$$x = \begin{bmatrix} q_4 \\ p_3 \end{bmatrix}; \frac{dx}{dt} = \begin{bmatrix} f_4 \\ e_3 \end{bmatrix}; z = \begin{bmatrix} e_4 \\ f_3 \end{bmatrix}; u = e_1$$

$$Din = [f_2]$$

CAPÍTULO 3. RELACIÓN DE DIAGRAMA DE BLOQUES Y BOND GRAPH

$$Dout = [e_2]$$

Vectores clave del Bond Graph de dos mallas.

$$z = Fx; \begin{bmatrix} e_4 \\ f_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1/C_1 & 0 \\ 0 & 1/L_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} q_4 \\ p_3 \end{bmatrix}$$

$$Dout = LDin; [e_2] = [R_3] [f_2]$$

La matriz estructura unión, es la siguiente.

$$\begin{bmatrix} f_4 \\ e_3 \\ f_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & -1 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e_4 \\ f_3 \\ e_2 \\ e_1 \end{bmatrix}$$

El valor de A, es el obtenido en el siguiente resultado.

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1/L \\ -1/C & -R1/L \end{bmatrix}$$

El valor obtenido en B es el siguiente.

$$B = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix}$$

En la figura 3.6, se realiza el primer paso. Se coloca el nodo de acuerdo a la nomenclatura, después se identifica las causalidades de los elementos, en este caso tenemos que:

Entra e1, e2 y e4 a nuestro nodo, de la misma forma pero en sentido contrario se coloca el sentido de los flujos de cada bond, respetando el signo de cada esfuerzo ya sea que entre o salga de nuestro punto de suma.

CAPÍTULO 3. RELACIÓN DE DIAGRAMA DE BLOQUES Y BOND GRAPH

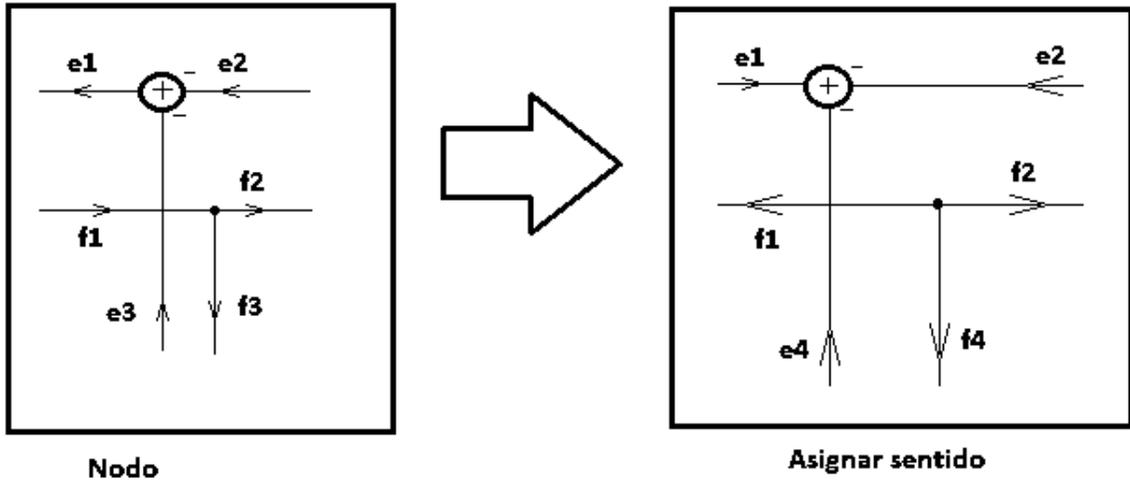


Figura 3.6: Colocación de nodo en circuito de una malla

En la figura 3.7, observamos la manera en que se agregó C1 a nuestro diagrama de bloques, teniendo en cuenta la dirección de las flechas de cada flujo o esfuerzo.

Posteriormente, se incorpora el elemento L1, como se puede observar en la figura 3.8, en este caso se agrega solamente teniendo en cuenta la causalidad del esfuerzo y flujo donde se encuentre este elemento en nuestro diagrama de Bond Graph.

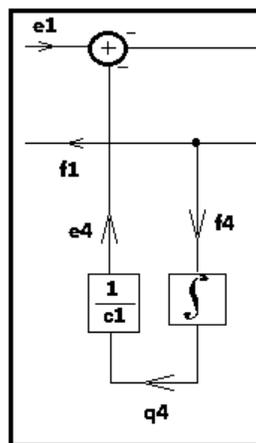


Figura 3.7: Agregando el elemento C1 al diagrama de bloques

CAPÍTULO 3. RELACIÓN DE DIAGRAMA DE BLOQUES Y BOND GRAPH

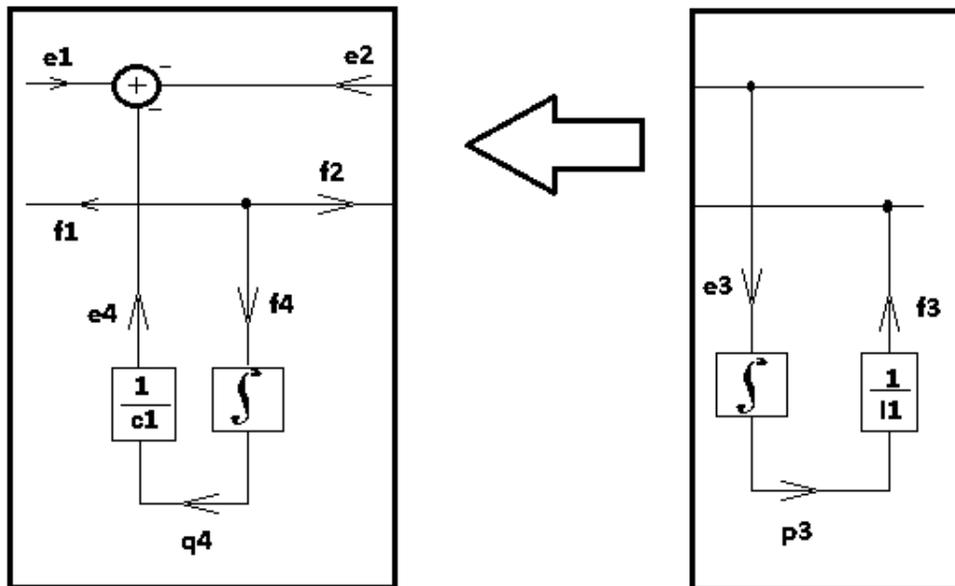


Figura 3.8: Colocación del elemento L1 al diagrama de bloques

Ya por último se le agrega el elemento R1 a nuestro diagrama de bloques para poder finalizarlo, queda de la siguiente manera en la figura 3.9.

CAPÍTULO 3. RELACIÓN DE DIAGRAMA DE BLOQUES Y BOND GRAPH

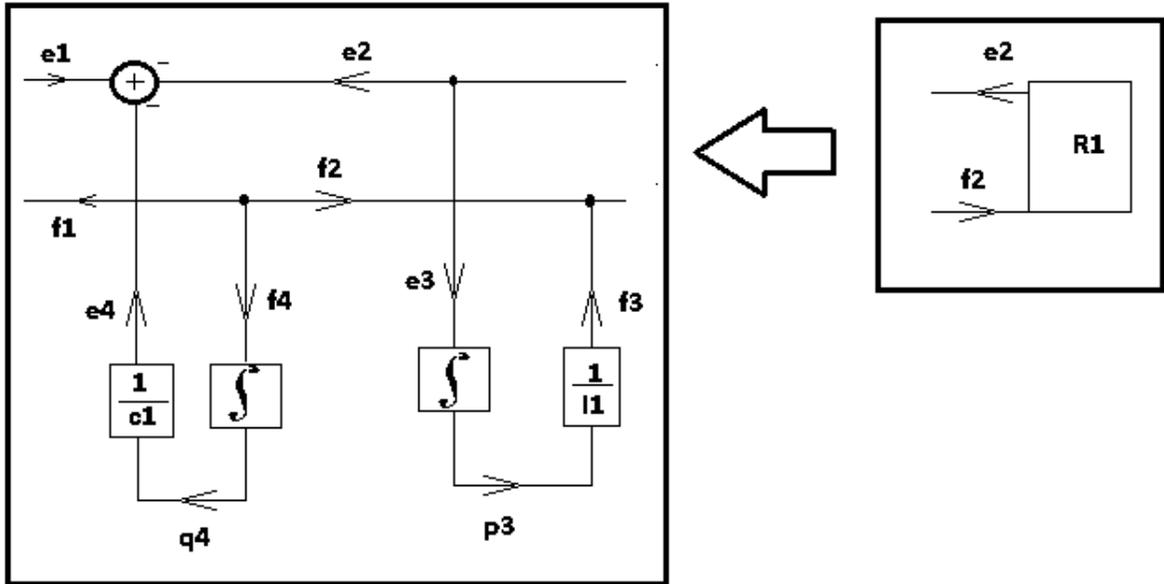


Figura 3.9: Colocación del elemento R1 al diagrama de bloques

El diagrama de bloques final obtenido del circuito de una malla, es el de la figura 3.10.

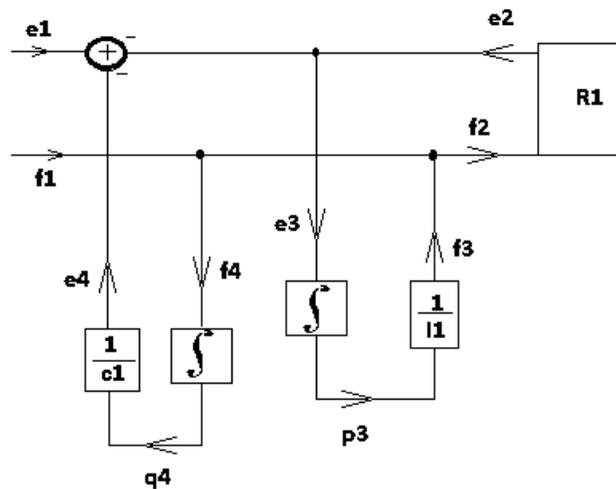


Figura 3.10: Diagrama de bloques del circuito de una malla

3.4. Circuito de dos mallas

El segundo ejemplo de esta sección, es el circuito eléctrico de dos mallas mostrado en la figura 3.11.

En este ejemplo se puede observar, que no hay mucha diferencia en la complejidad de obtener el Bond Graph y el diagrama de bloques de este circuito, sin embargo en circuitos más complejos, observaremos que la relación que existe ya no es tan trivial.

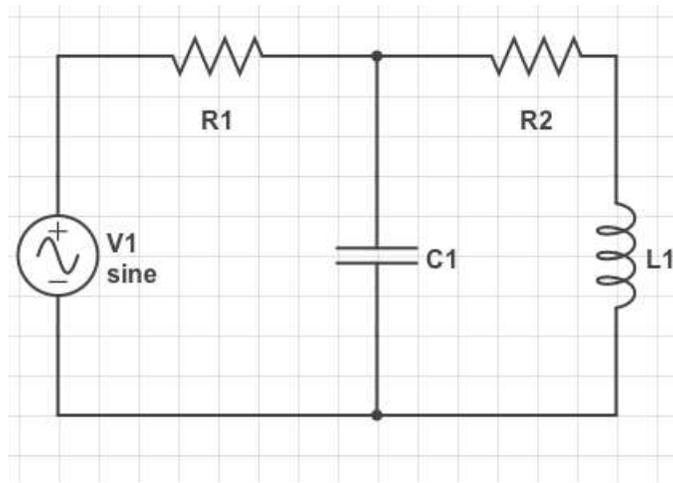


Figura 3.11: Circuito Eléctrico de dos mallas

El Bond Graph del circuito de dos mallas de la figura 3.11, es el mostrado en la figura 3.12.

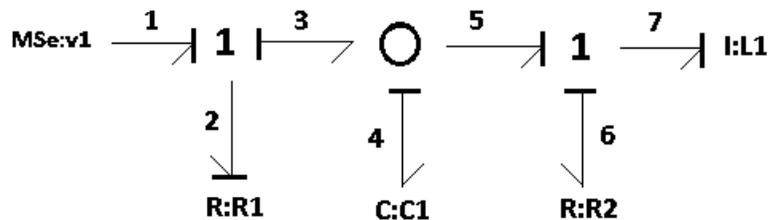


Figura 3.12: Bond Graph del circuito de dos mallas

El modelo matemático para el circuito de la figura 3.12, se obtiene de la siguiente manera:

CAPÍTULO 3. RELACIÓN DE DIAGRAMA DE BLOQUES Y BOND GRAPH

Vectores clave del Bond Graph de dos mallas.

$$u = e1$$

$$x = \begin{bmatrix} q4 \\ p7 \end{bmatrix}; \frac{dx}{dt} = \begin{bmatrix} f4 \\ e7 \end{bmatrix}; z = \begin{bmatrix} e4 \\ f7 \end{bmatrix}$$

$$Din = \begin{bmatrix} e2 \\ f6 \end{bmatrix}$$

$$Dout = \begin{bmatrix} f2 \\ e6 \end{bmatrix}$$

Para formar la matriz L y F se realiza lo siguiente.

$$z = Fx; \begin{bmatrix} e4 \\ f7 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1/C_1 & 0 \\ 0 & 1/L_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} q4 \\ p7 \end{bmatrix}$$

$$Dout = LDin; \begin{bmatrix} f2 \\ e6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1/R_1 & 0 \\ 0 & R_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e2 \\ f6 \end{bmatrix}$$

La matriz estructura unión, es la siguiente.

$$\begin{bmatrix} f4 \\ e7 \\ e2 \\ f6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & -1 & 0 \\ -1 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e4 \\ f7 \\ f2 \\ e6 \\ e1 \end{bmatrix}$$

Para la matriz M, tenemos:

$$M = L(I - S_{22}L)^{-1}; S_{22} = 0; M = L$$

CAPÍTULO 3. RELACIÓN DE DIAGRAMA DE BLOQUES Y BOND GRAPH

Los valores de los coeficientes de A,B,C y D son:

$$A = \begin{bmatrix} -1/R_1 C_1 & -1/L_1 \\ 1/C_1 & R_2/L_1 \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} 1/R_1 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$C = [0 \quad 1/L_1]$$

$$D = 0$$

Ya teniendo estos valores las ecuaciones de estado son las siguientes:

$$\frac{dx}{dt} = AX + BU$$

$$\begin{bmatrix} \dot{f}_4 \\ \dot{e}_7 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -1/R_1 C_1 & -1/L_1 \\ 1/C_1 & R_2/L_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_4 \\ e_7 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1/R_1 \\ 0 \end{bmatrix} e_1$$

$$y = CX + DU$$

$$f_7 = [0 \quad 1/L_1] \begin{bmatrix} q_4 \\ p_7 \end{bmatrix} + 0$$

El diagrama de bloques obtenido del circuito de dos mallas de la figura 3.11, es el de la figura 3.13.

CAPÍTULO 3. RELACIÓN DE DIAGRAMA DE BLOQUES Y BOND GRAPH

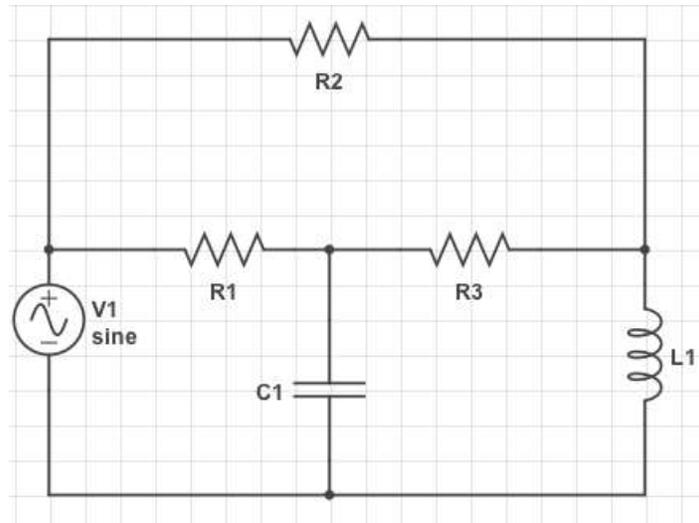


Figura 3.14: Circuito eléctrico de tres mallas

El Bond Graph de la figura 3.14, es el mostrado en la figura 3.15.

CAPÍTULO 3. RELACIÓN DE DIAGRAMA DE BLOQUES Y BOND GRAPH

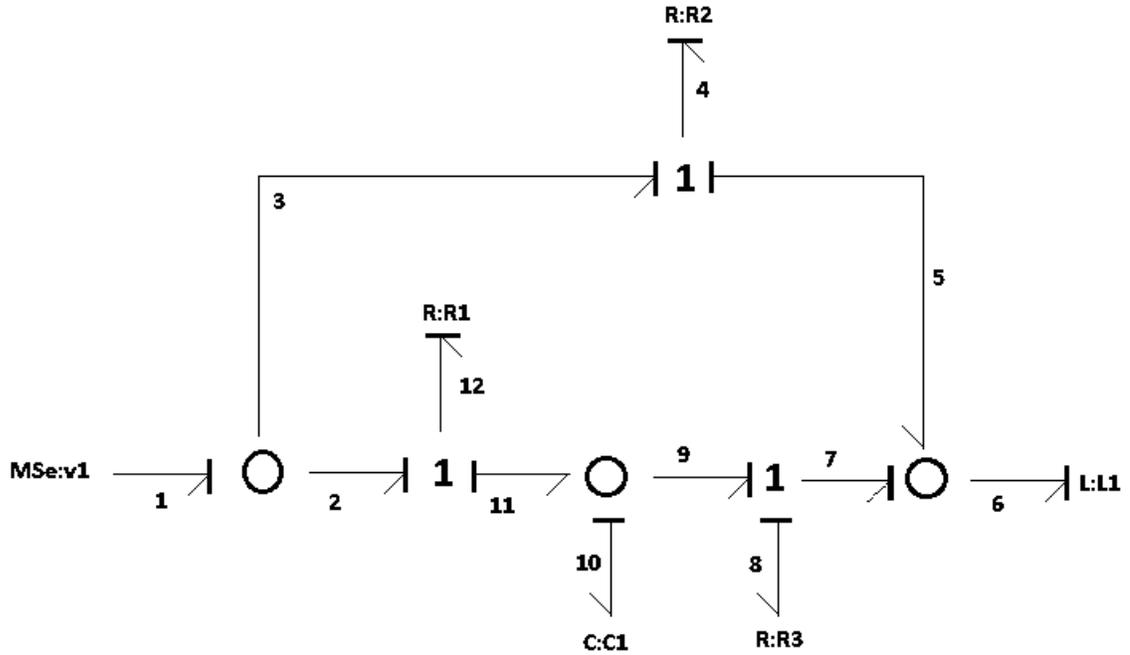


Figura 3.15: Bond Graph del circuito de tres mallas

El modelo matemático para el circuito de la figura 3.14, se obtiene de la siguiente manera:

Vectores clave del Bond Graph de tres mallas.

$$u = e_1$$

$$x = \begin{bmatrix} q_{10} \\ p_6 \end{bmatrix}; \frac{dx}{dt} = \begin{bmatrix} f_{10} \\ e_6 \end{bmatrix}; z = \begin{bmatrix} e_{10} \\ f_6 \end{bmatrix}$$

$$Din = \begin{bmatrix} e_4 \\ e_{12} \\ f_8 \end{bmatrix}$$

$$Dout = \begin{bmatrix} f_4 \\ f_{12} \\ e_8 \end{bmatrix}$$

CAPÍTULO 3. RELACIÓN DE DIAGRAMA DE BLOQUES Y BOND GRAPH

Para formar la matriz L y F se realiza lo siguiente.

$$z = Fx; \begin{bmatrix} e_{10} \\ f_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1/C_1 & 0 \\ 0 & 1/L_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} q_{10} \\ p_6 \end{bmatrix}$$

$$Dout = LDin; \begin{bmatrix} f_4 \\ f_{12} \\ e_8 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1/R2 & 0 & 0 \\ 0 & 1/R1 & 0 \\ 0 & 0 & R3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e_4 \\ e_{12} \\ f_8 \end{bmatrix}$$

La matriz estructura unión, es la siguiente.

$$\begin{bmatrix} f_{10} \\ e_6 \\ e_4 \\ e_{12} \\ f_8 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -1 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 \\ -1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e_{10} \\ f_6 \\ f_4 \\ f_{12} \\ e_8 \\ e_1 \end{bmatrix}$$

Para la matriz M, tenemos:

$$M = L(I - S_{22}L)^{-1}; S_{22} = 0; M = L$$

Como la matriz S_{22} es diferente de 0, procedemos a calcular M.

$$M = \begin{bmatrix} 1/R2 & 0 & 0 \\ 0 & 1/R1 & 0 \\ 0 & 0 & R3 \end{bmatrix} \left(\left(\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 0 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} 1/R1 & 0 & 0 \\ 0 & 1/R1 & 0 \\ 0 & 0 & R3 \end{bmatrix} \right) \right)^{-1}$$

$$M = \begin{bmatrix} 1/R2 + R3 & 0 & R3/R2+R3 \\ 0 & 1/R1 & 0 \\ -R3/R2+R3 & 0 & (R2 * R3)/R2+R3 \end{bmatrix}$$

CAPÍTULO 3. RELACIÓN DE DIAGRAMA DE BLOQUES Y BOND GRAPH

de bloques o elemento que se agregue, se empiezan a extender líneas que se tienen que incorporar de alguna u otra manera, esto hace mucho más difícil nuestro caso de estudio por medio de la herramienta de diagrama de bloques.

Capítulo 4

Casos de estudio

4.1. Introducción

En este capítulo se comprobará la relación que existe entre Diagrama de Bloques y Bond Graph, mediante diferentes tipos de circuitos, a los que se les asignarán valores reales en los elementos de cada uno de ellos. La herramienta que se utilizará para comprobar la relación que exististe entre Diagrama de Bloques y Bond graph es el software 20SIM.

20SIM es una aplicación con la que se puede modelar y simular el comportamiento de los sistemas dinámicos, como pueden ser los sistemas eléctricos, mecánicos e hidráulicos. Este software es plenamente compatible con el modelado gráfico y permite diseñar y analizar sistemas dinámicos de una manera sencilla y admite el uso de numerosos componentes.

En el área de ingeniería y con esta herramienta se puede elegir una amplia gama de componentes de la biblioteca y conectarlos, esto se puede construir sin la necesidad de escribir ninguna línea matemática.

Después de simular estos circuitos con la herramienta 20SIM, se observará su comportamiento, tanto su Bond Graph como el Diagrama de bloques, y se graficará el resultado en ambos circuitos simultáneamente. Con esto se pretende comprobar que su respuesta sea de la misma manera para los dos tipos de simulación.

4.2. Sistema básico

El circuito que se muestra en la figura 4.1, es un circuito simple de dos mallas, teniendo sólo como elementos resistencia, capacitor e inductor, con su respectiva fuente.

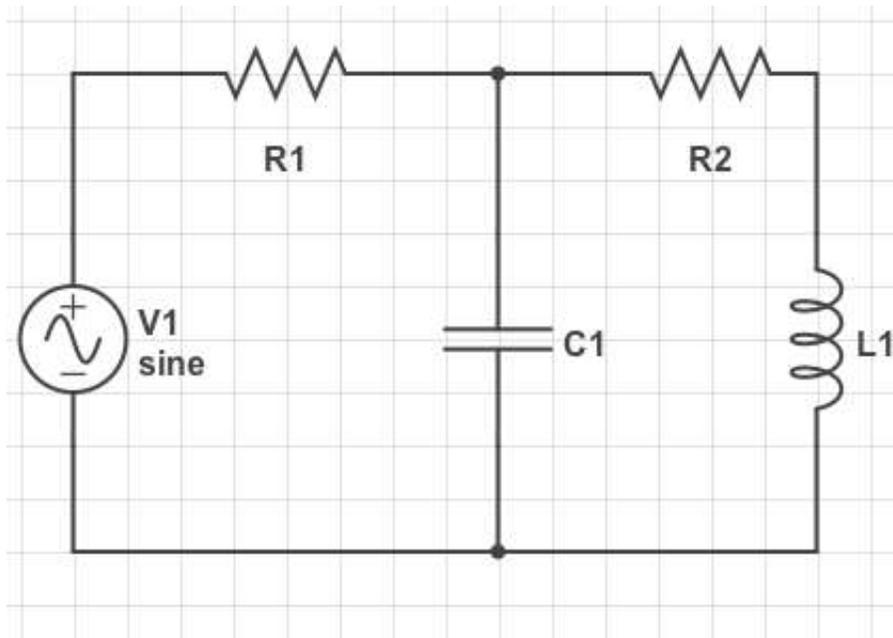


Figura 4.1: Circuito de dos mallas

En la figura 4.2 se observa el bond graph del circuito de la figura 4.1.

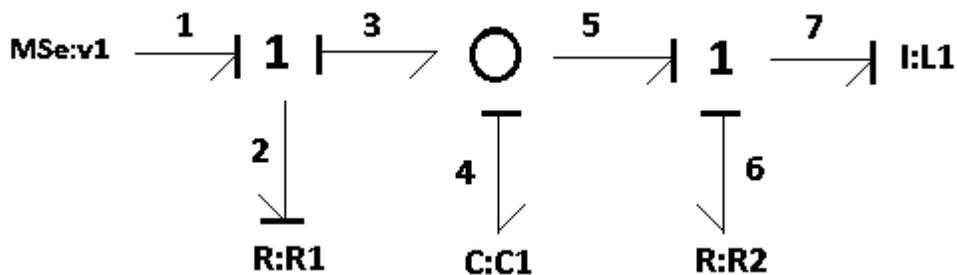


Figura 4.2: Bond Graph del circuito de dos mallas

CAPÍTULO 4. CASOS DE ESTUDIO

El diagrama de bloques del circuito de dos mallas es el que se muestra en la figura 4.3.

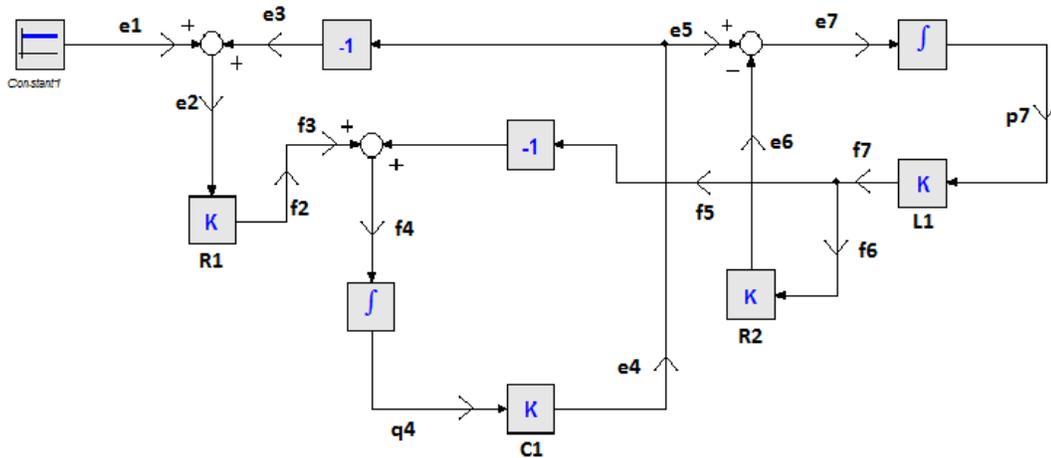


Figura 4.3: Diagrama de bloques del circuito de dos mallas

Los resultados obtenidos de este circuito, en Bond Graph y diagrama de bloques son los que se muestran en las gráficas de la figura 4.4.

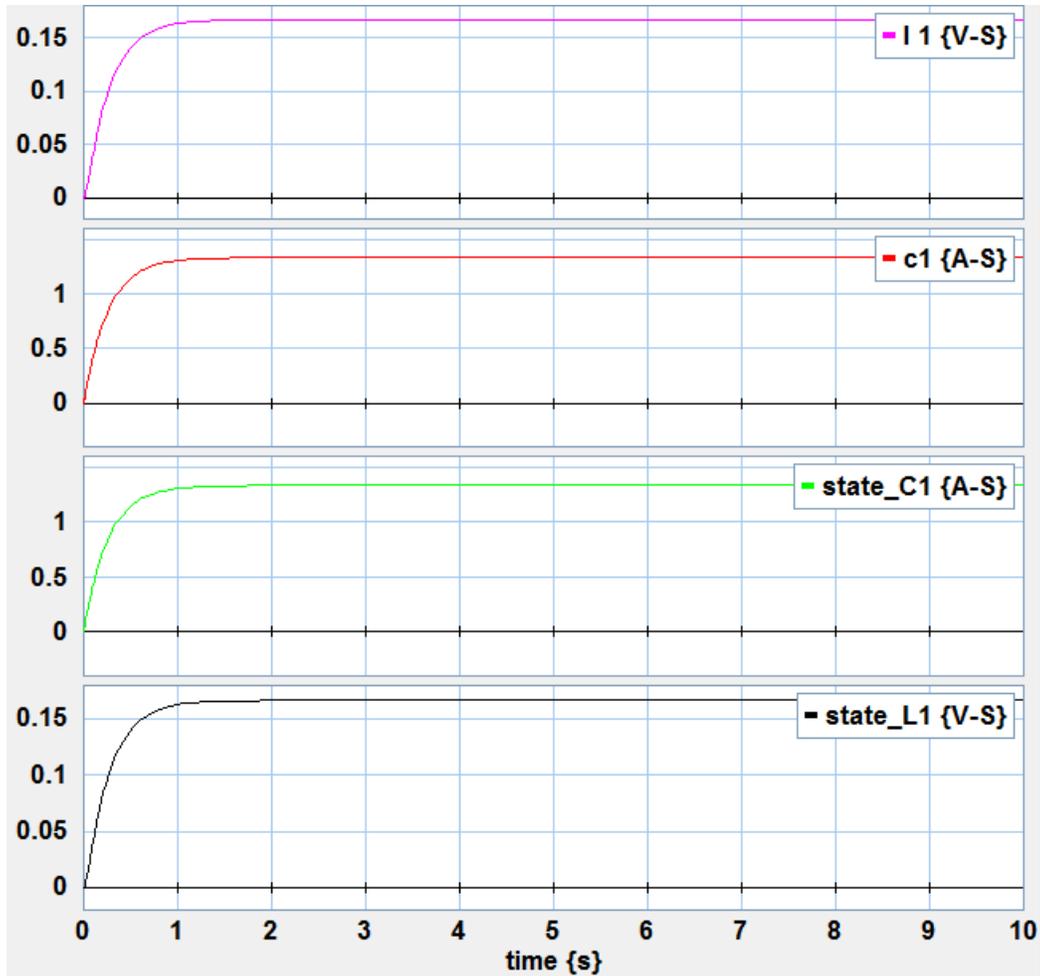


Figura 4.4: Gráficas del circuito de dos mallas

En la gráfica de la figura 4.4 se puede observar que el comportamiento o la respuesta que se obtuvo del sistema es idéntica, tanto en diagrama de bloques como en Bond Graph.

Los elementos que se grafican son los siguientes:

- L 1, este inductor forma parte del diagrama de bloques y en la gráfica se puede observar su comportamiento.
- C 1, este capacitor pertenece al diagrama de bloques, en la gráfica se observa su respuesta.

- State_C1, muestra el estado del capacitor en el circuito de bond graph.
- State_L1, muestra el estado del inductor en el circuito de bond graph.

4.3. Sistema con un transformador

Este circuito es un caso muy ilustrativo, donde se aprecia lo complejo que puede llegar a ser la simulación de un circuito con diagrama de bloques y la facilidad con que se puede simular en Bond Graph.

El circuito que se muestra en la figura 4.5 tiene ya un número considerable de elementos, como son la combinación de resistencias, inductores, capacitores y transformadores.

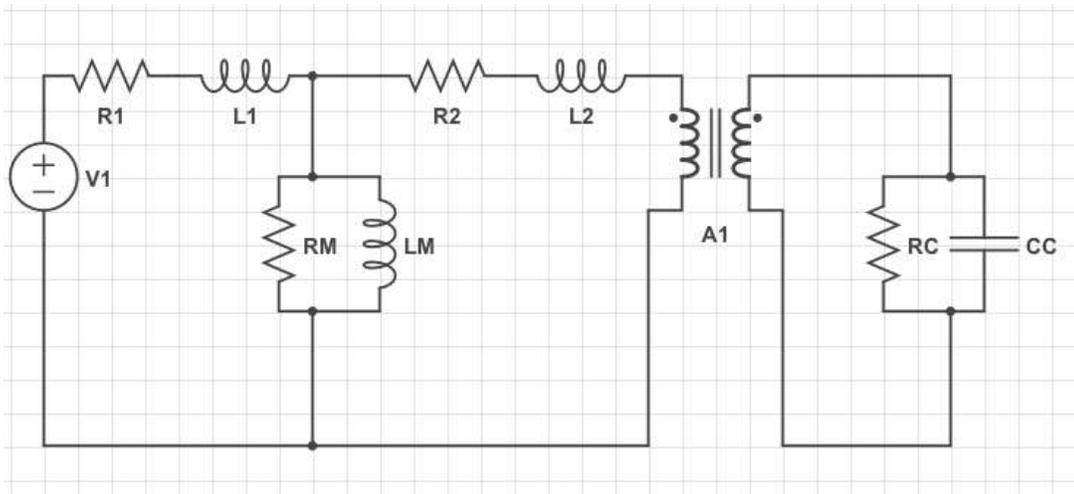


Figura 4.5: Circuito de un transformador

El bond graph del circuito de la figura 4.5 se muestra en la figura 4.6.

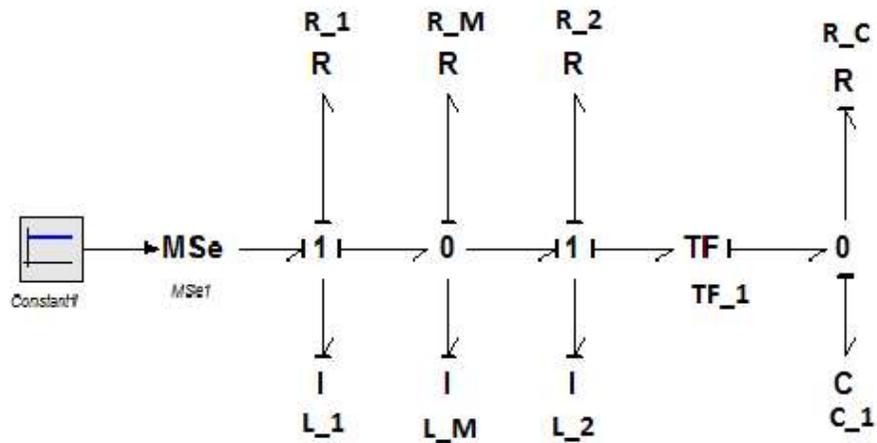


Figura 4.6: Bond Graph del circuito de un transformador

El diagrama de bloques del circuito de un transformador es el que se muestra en la figura 4.7, donde se aprecia que un circuito que contiene un gran número de elementos conectados entre sí presenta una gran dificultad para simularlo.

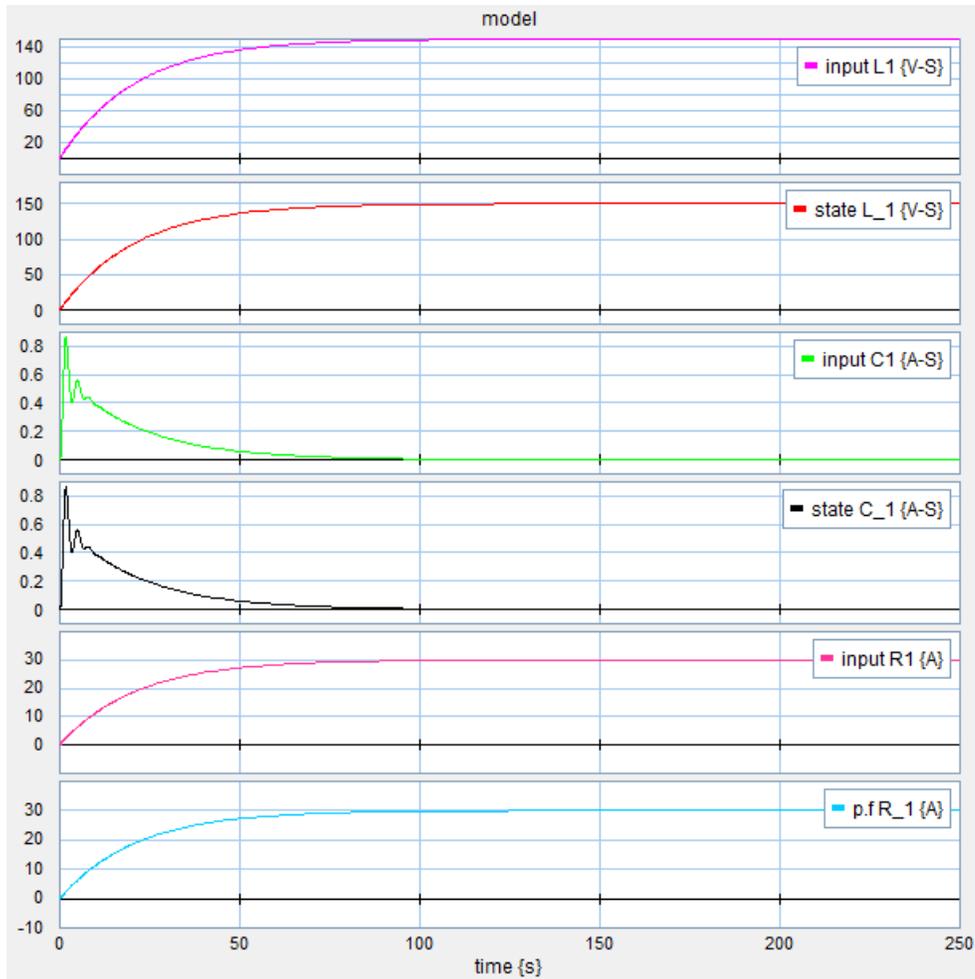


Figura 4.8: Gráficas del circuito de un transformador

Los elementos observados en la gráfica son los siguientes:

- L 1, este inductor forma parte del diagrama de bloques y en la gráfica se puede observar su comportamiento, que es idéntico al del inductor L_1 de Bond Graph de este mismo circuito.
- State L_1, muestra el estado del inductor en el circuito de Bond Graph.
- C 1, este capacitor pertenece al diagrama de bloques, en la gráfica se observa que su respuesta es igual al capacitor C_1 de Bond Graph.

- State C_1 , muestra el estado del capacitor en el circuito de Bond Graph.
- R_1 , este elemento es una de las resistencias que pertenecen al diagrama de bloques, su comportamiento es el que se observa en la gráfica.
- R_1 , elemento resistivo que pertenece al Bond Graph, al igual que la comparación de todos los elementos anteriores su comportamiento es idéntico.

4.4. Sistema con dos transformadores

En este caso el circuito tiene dos transformadores, y tiene tres mallas. Como se puede ver en la figura 4.9.

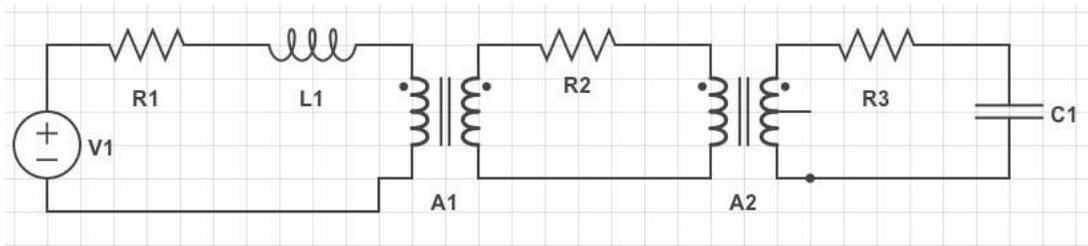


Figura 4.9: Circuito con dos transformadores tres mallas

El bond graph del circuito de la figura 4.9, es el que se muestra en la figura 4.10.

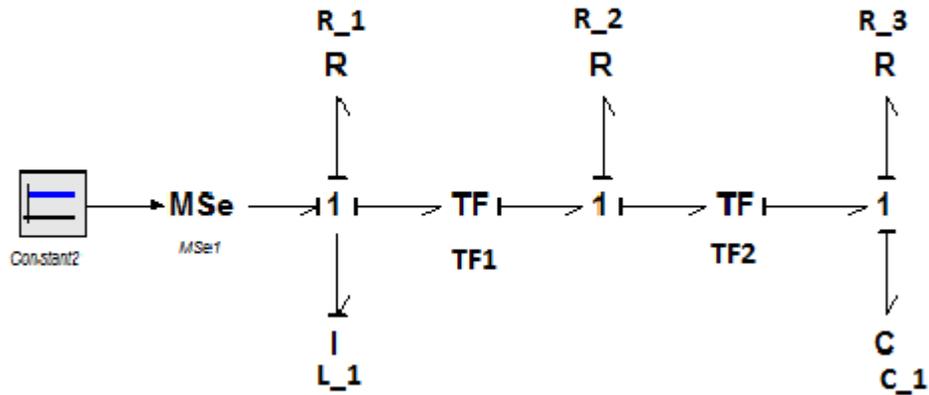


Figura 4.10: Bond Graph del circuito con dos transformadores

El diagrama de bloques de este circuito se puede observar en la figura 4.11.

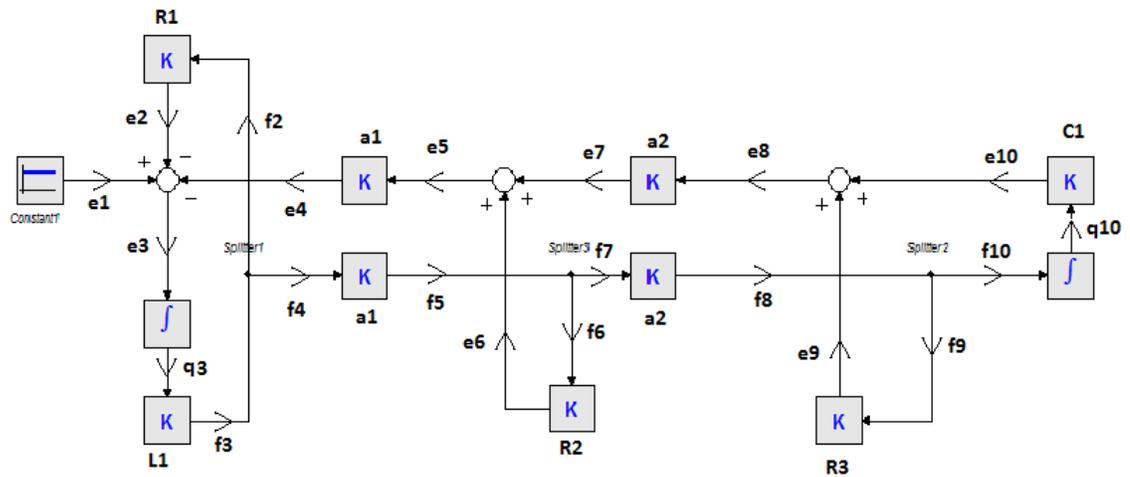


Figura 4.11: Diagrama de bloques del circuito de dos transformadores

Los resultados obtenidos de las simulaciones de este circuito se muestran

en la figura 4.12.

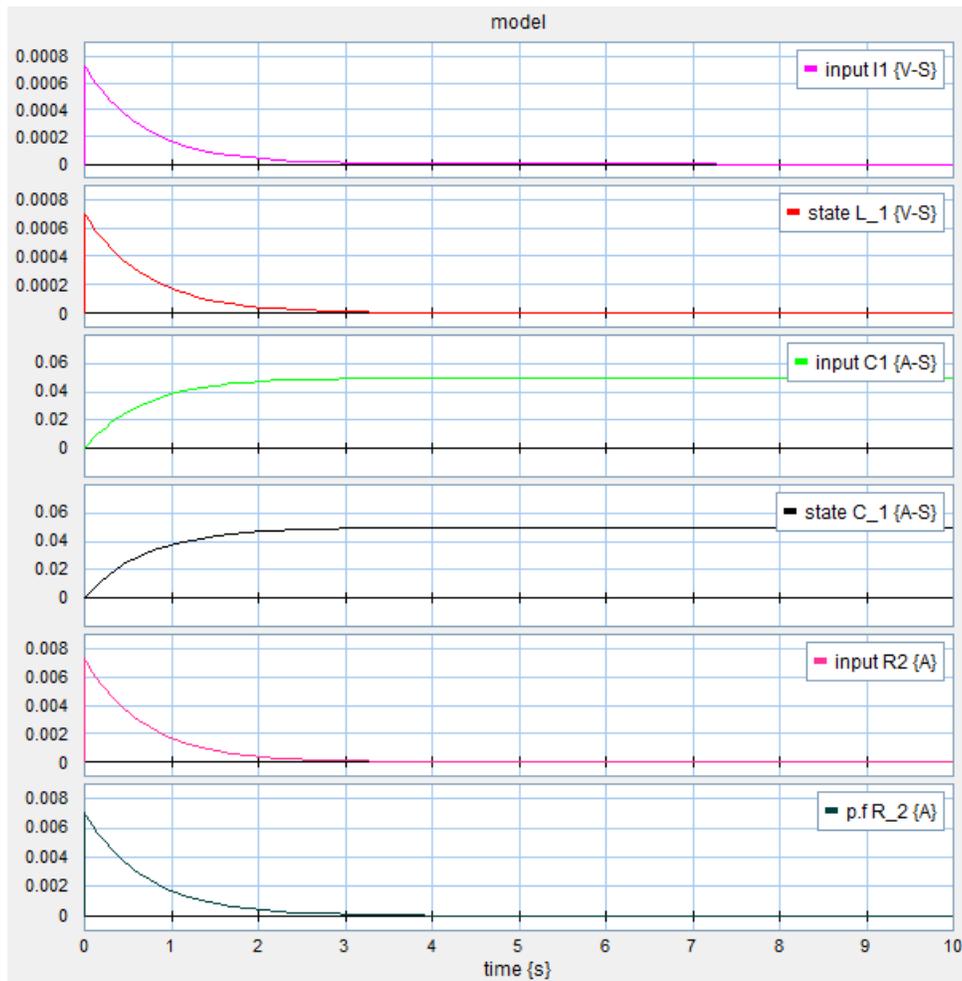


Figura 4.12: Gráficas del circuito de dos transformadores

Los elementos observados en la gráfica son los siguientes:

- L 1, inductor que forma parte del diagrama de bloques y en la gráfica se puede observar su comportamiento.
- State L_1, muestra el estado del inductor en el circuito de Bond Graph.
- C 1, capacitor que pertenece al diagrama de bloques en la gráfica se observa su comportamiento.

- State C_1 , muestra el estado del capacitor en el circuito de Bond Graph.
- R_2 , este elemento es una de las resistencias que pertenecen al diagrama de bloques, su comportamiento se observa en la gráfica.
- R_2 , elemento resistivo que pertenece al Bond Graph de este circuito.

En los elementos que se representan en la gráfica de la figura 4.12 se observa que tienden a una respuesta igual dependiendo de su naturaleza, ya sea resistiva, capacitiva o inductiva ya sean simulados en Bond Graph y diagrama de bloques.

4.5. Sistema tipo motor de CD

La máquina de CD es un circuito muy común utilizado en el área de modelado de control analógico, el circuito es el que se muestra en la figura 4.13.

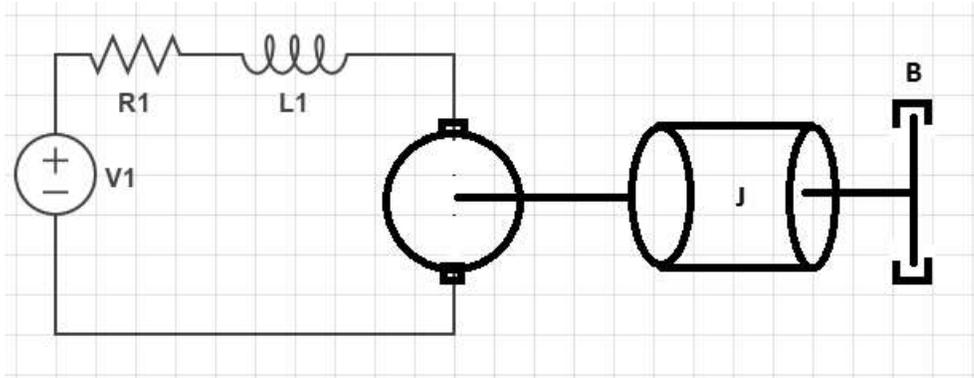


Figura 4.13: Circuito del motor de CD

El bond graph del circuito de la maquina de CD es el que se muestra en la figura 4.14.

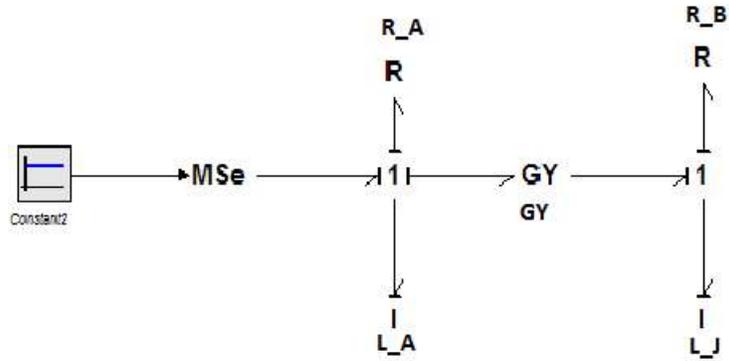


Figura 4.14: Bond Graph de la máquina de CD

El diagrama de bloques del circuito de la máquina de CD es el que muestra en la figura 4.15.

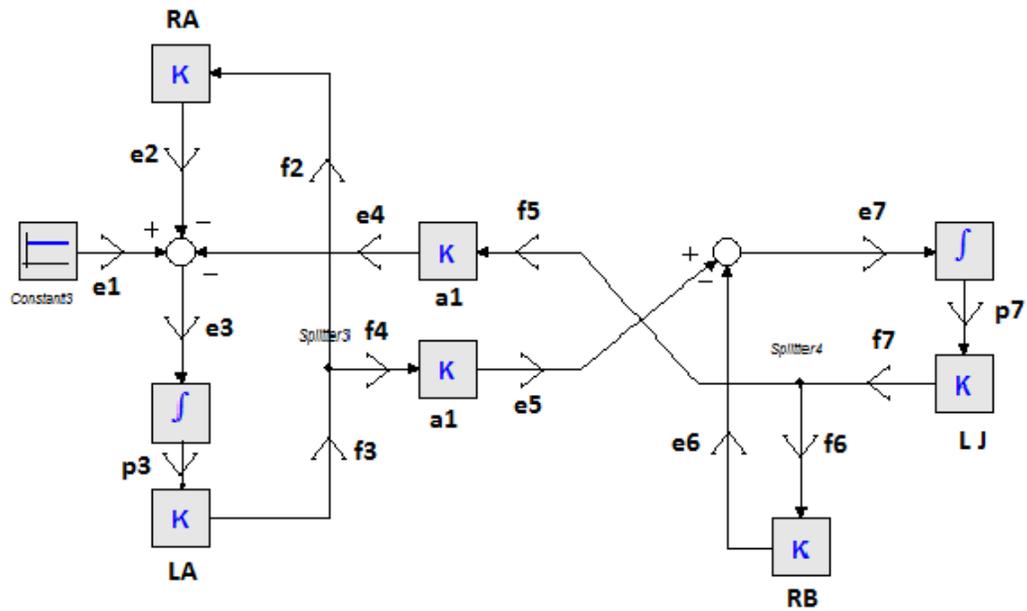


Figura 4.15: Diagrama de bloques de la máquina de CD

Los resultados que muestra esta simulación son los de la figura 4.16.

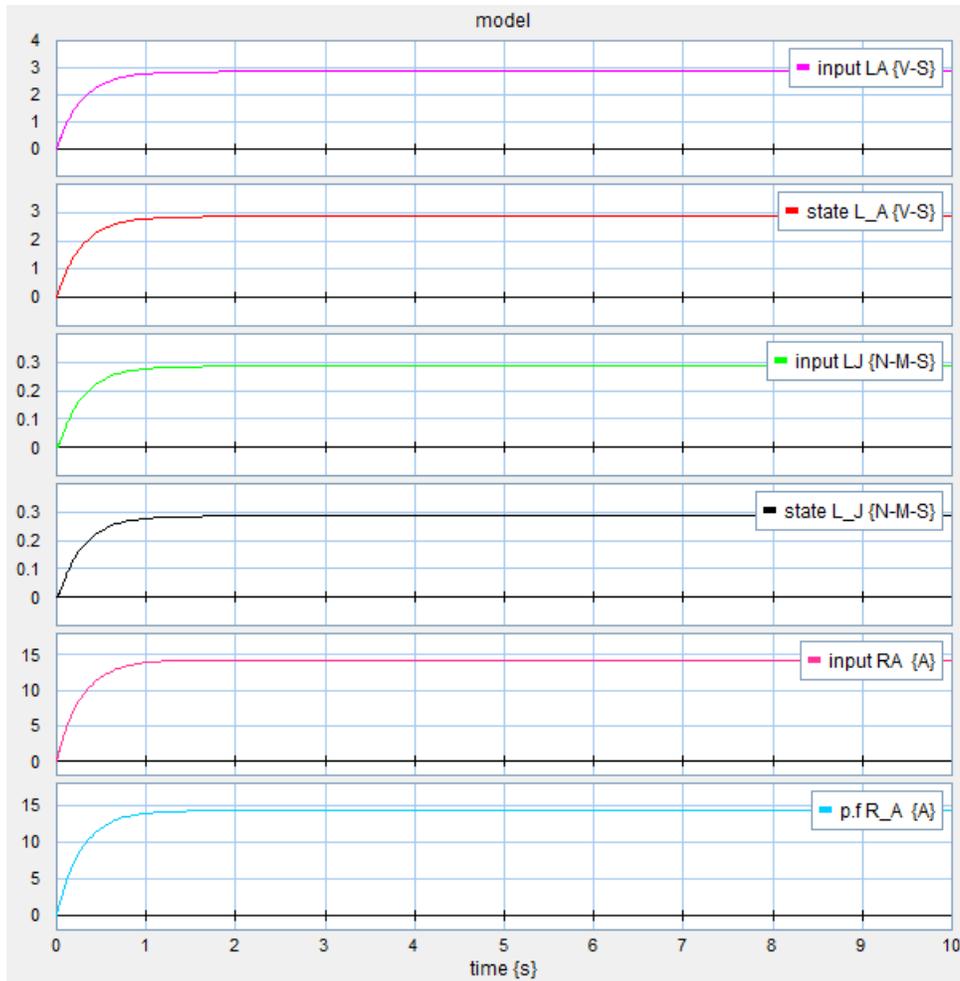


Figura 4.16: Gráficas del circuito de la máquina de CD

- L A, inductor que forma parte del diagrama de bloques su comportamiento se observa en la gráfica.
- State L_A, muestra el estado del inductor en el circuito de Bond Graph.
- L J, la curva de este inductor muestra la respuesta en diagrama de bloques.
- L_J, es la curva de este inductor que pertenece al Bond Graph del circuito.

CAPÍTULO 4. CASOS DE ESTUDIO

- RA, este elemento es una de las resistencias que pertenecen al diagrama de bloques, su comportamiento se observa en la gráfica.
- R_A, elemento resistivo que pertenece al Bond Graph de este circuito.

En la gráfica de la figura 4.16 se observa que todos los elementos del circuito de la maquina de CD, tienen una respuesta idéntica tanto en Bond Graph como diagrama de bloques.

Capítulo 5

Conclusiones y recomendaciones

5.1. Conclusiones

Las conclusiones de la elaboración de este trabajo de tesis, donde se aplicó la herramienta gráfica de Bond Graph y diagrama de bloques, se presentan en los siguientes puntos.

- El objetivo planteado para el desarrollo de este trabajo de tesis se cumplió plenamente, ya que se comprobó que utilizando la herramienta de Bond Graph es más sencillo simular circuitos que con diagrama de bloques.
- Se explicó de una manera concisa la metodología para obtener el Bond Graph de un circuito, sus ecuaciones, su diagrama de bloques y su relación que existe entre estas dos herramientas.
- Se presentó una manera alternativa para poder modelar circuitos eléctricos, mecánicos e hidráulicos así como sus elementos que lo componen y poder comprobar mediante diagrama de bloques y sus ecuaciones que el resultado al que se llega es el mismo.
- Conforme se fue avanzando en el análisis de este trabajo se presentaron ejemplos que fueron llevándose hasta determinar su respuesta aplicándoles valores reales y así se observaron sus gráficas correspondientes. Como también se comprobó que la metodología de Bond Graph es una excelente herramienta para el análisis de sistemas robustos como se pudo observar en el capítulo cuatro.

5.2. Recomendaciones

Las recomendaciones propuestas se presentan en los siguientes puntos.

- Al simular los circuitos en diagrama de bloques hay que tener demasiado cuidado en la polaridad con que se llegue al punto de suma, ya que cualquier cambio de signo puede llegar a crear conflictos o no obtener el resultado correcto en la simulación.
- Bond Graph es una herramienta muy eficaz y muy intuitiva para utilizar, en casos de estudio donde se requiera la simulación de circuitos se aconseja apoyarse en esta herramienta, sobre todo en casos donde se tenga un gran número de elementos.

Bibliografía

1. Dean C. Karnopp and Ronald C. Rosenberg, system dynamics: A unified approach, with, John & Sons, 1975.
2. P.E. Wellsted, Physical System Modelling, Academic Press, London 1979.
3. Katsuhiko Ogata, Ingeniería de Control Moderna, PEARSON EDUCACIÓN, S.A., Madrid, 2003.
4. Norman S. Nise, Sistemas de Control para Ingeniería, California State Polytechnic University, Pomona, Primera reimpresión Mexico, 2004.
5. Software 20-Sim The power of modeling, Controllab products.