



*UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN
NICOLÁS DE HIDALGO*

FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA

ANÁLISIS Y MODELADO DE SISTEMAS EN
CONMUTACIÓN EN BOND GRAPH

TESIS

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:
INGENIERO EN ELECTRÓNICA

PRESENTA:
RENE BAUTISTA GASPAR

ASESOR DE TESIS:
DR. GILBERTO GONZÁLEZ AVALOS

MORELIA, MICHOACÁN, SEPTIEMBRE DE 2010.



“Pon la mano en un horno caliente
durante un minuto y te parecerá una hora.
Siéntate junto a una mujer
hermosa durante una hora y te parecerá
un minuto. Eso es relatividad”.

Albert Einstein 1921.

AGRADECIMIENTOS

El pilar más importante en mi vida es Dios y mi familia sin ellos no hubiera logrado alcanzar un sueño más, gracia a sus palabras de aliento, consejos, regaños en fin por su invaluable apoyo y confianza.

A la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo en especial a la Facultad de Ingeniería Eléctrica que me vio crecer, reír, llorar y disfrutar cada paso fue forjando a un caballero nicolaita a través de la experiencia, esfuerzo y conocimientos académicos de cada uno de los maestros, sin ellos no estaría en donde me encuentro ahora.

Al Dr. Gilberto González Avalos por la confianza y amistad que me brindo, para concretar una etapa como ingeniero, no olvidare sus capacidad, experiencia científica, dedicación y sencillez que lo caracteriza.

A Ing. María Alejandra Martínez Gutiérrez, M.I. Sigridt García Martínez, M.C. Eric Sadit Téllez Ávila, M.I. Isidro Ignacio Lázaro Castillo, M.C. José Juan Rincón Pasaye y Ing. Víctor Quintero Rojas. Agradezco su tiempo, dedicación, esfuerzo y amistad que me brindaron aunque me hicieron sufrir pero ni modo, gracias a ustedes termina una etapa de mi vida y las que faltan.

Para los amigos que aun están conmigo y los que se han ido, no hay letras que describan todas las travesías y momentos de alegría, decepción y estrés y otras cosas que no se pueden decir. Gracias.

DEDICATORIA

A mis padres José Salvador Bautista García y Laura Gaspar Correa así como a mis hermanos Salvador, Gerardo, Emilio y hermanas Gricelda, Laura, Minerva y la nueva luz en mi vida Luis Emilio, les agradezco de todo corazón por creer y confiar en mis sueños.

A QFB. Cecilia Herrera Abarca por su amistad y ayuda además soportarme tanto tiempo y la paciencia así como los consejos que la mayoría eran regaños pero.... eran necesarios gracias.

A Guadalupe González Flores, cuando me sonreíste sin hablar fue como si empezara a volar, tienes la fragancia de las flores del jardín, hay tanta ternura dentro de tu corazón, hoy gracias a tu sonrisa mi vida tiene sentido. Doy gracias al destino que te puso en mi camino niña de mi corazón.

Contenido

Agradecimientos. . . . .	.iii
Dedicatoria. . . . .	.iv
Contenido. . . . .	.v
Lista de Figuras. . . . .	.viii
Lista de Tablas. . . . .	.xii
Abreviaturas. . . . .	.xiii
Resumen. . . . .	.xiv

Capítulo 1. Introducción. 1

1.1 Modelado de sistemas físicos. . . . .	.1
1.2 Objetivo. . . . .	.3
1.3 Justificación. . . . .	.3
1.4 Metodología de la Investigación. . . . .	.4
1.5 Descripción de los Capítulos. . . . .	.4

Capítulo 2. Antecedentes: Modelado de Convertidores Elementales en Bond Graph. 6

2.1 Introducción a la Electrónica de Potencia. . . . .	.6
2.2 Modelado de Sistemas Físicos en Bond Graph. . . . .	.8
2.3 Componentes básicos de un Bond Graph. . . . .	.9
2.3.1 Puertos-1 Pasivos. . . . .	.11
2.3.2 Elemento Resistivos (R). . . . .	.11
2.3.3 Elemento Capacitivo (C). . . . .	.12
2.3.4 Elemento Inercia (I). . . . .	.13
2.3.5 Puertos-1 Activos o Fuentes. . . . .	.15
2.3.6 Los Elementos Ideales de Puerto-2. . . . .	.16
2.3.7 Los Elementos de Unión, Puerto-3. . . . .	.17
2.3.8 Causalidad para los Multipuertos Básicos. . . . .	.18
2.4 Bond Activo. . . . .	.22

2.5 Procedimiento para el Modelado de Sistemas.	.23
Capítulo 3. Modelado de Sistemas en Conmutación.	.24
3.1. Introducción a los Circuitos Electrónicos de Potencia.	.24
3.1.1. Modelado de convertidores en electrónica de potencia.	.24
3.2. Enfoque de Modelado en Bond Graph.	.26
3.2.1. Estructura Común del Diodo en Bond Graph.	.26
3.2.2. Procedimiento-1 (Modelado de Sistemas Electrónicos).	.27
3.3. Modelado de un Circuito RC con Diodo.	.27
3.3.1. Obtención de las ecuaciones de estado en Bond Graph.	.28
3.3.2. Vectores Claves o Vectores Significativos.	.28
3.3.3. Relaciones de Campo y Ecuación de Estado.	.29
3.3.4. Simulación en Simnon de un Circuito RC con Diodo.	.36
3.3.5. Simulación en 20-sim de un Circuito RC con Diodo.	.38
3.4. Modelado de un circuito RL con Diodo.	.41
3.4.1. Simulación en Simnon de un Circuito RL con Diodo.	.44
3.4.2. Simulación en 20-sim de un Circuito RL con Diodo.	.46
3.5. Modelado de un Circuito con más de un Diodo Caso – I.	.47
3.5.1. Simulación en Simnon de un Circuito con más de un Diodo caso – I.	.52
3.5.2. Simulación en 20-sim de un Circuito con más de un Diodo caso-I.	.53
3.6. Modelado de un circuito con más de un Diodo Caso- II.	.55
3.6.1 Simulación en Simnon de un Circuito con más de un Diodo caso-II.	.61
3.6.2. Simulación en 20-sim de un Circuito con más de un Diodo caso-II.	.62
3.7. Modelado de un Circuito Rectificador de Tap Central.	.64
3.7.1. Simulación en Simnon de un Circuito Rectificador de Tap Central.	.69
3.7.2. Simulación en 20-sim de un Circuito Rectificador de Tap Central.	.71
3.8 Trayectoria Causal.	.73

Capítulo 4. Rectificadores Controlados.	.76
4.1 Convertidor controlado por dos fases.	.76
4.1.1 Representación en BG del Convertidor controlado por dos fases (Bifásico).	.77
4.1.2 Simulación en Simnon del Convertidor controlado por dos fases (Bifásico).	.80
4.1.3 Simulación en 20-sim del Convertidor controlado por dos fases (Bifásico).	.82
4.2 Convertidores Trifásico de Media Onda con carga Resistiva.	.84
4.2.1 Representación en Bond Graph del Convertidores Trifásico de Media Onda con carga Resistiva.	.85
4.2.2 Simulación en Simnon del Convertidor Trifásico de Media Onda con carga resistiva.	.88
4.2.3 Simulación en 20-sim del Convertidor Trifásico de Media Onda con carga resistiva.	.90
4.3 Convertidor trifásico de Media Onda con carga RC.	.94
4.3.1 Simulación en 20-sim del Convertidor de Media onda con carga RC.	.95
4.4 Rectificador Monofásico controlado (Puente de Tiristores).	.97
4.4.1 Simulación en 20-sim del Rectificador monofásico controlado (Puente de Tiristores).	.97
4.5 Modelado de un Motor de CD como carga a un Convertidor de Media Onda Trifásico controlado.	.99
4.5.1 Simulación en 20-sim del Motor de CD como carga a un Convertidor de Media onda Trifásico controlado.	.101
Capítulo 5. Conclusiones y recomendaciones.	.104
Apéndice A. Presentación de los paquetes de simulación Simnon y 20-sim.	.106
Bibliografía.	.108

Lista de Figuras

Figura 1.1 Válvula electrónica diodo. . . . .	.1
Figura 1.2 Modelado de Sistemas. . . . .	.2
Figura 1.3 Metodología de la investigación. . . . .	.4
Figura 2.1. Interruptor ideal. . . . .	.6
Figura 2.2 Símbolo del Diodo. . . . .	.7
Figura 2.3 Funcionamiento del Diodo Ideal. . . . .	.7
Figura 2.4 Comportamiento y utilidad de un diodo en un circuito electrónico. . . . .	.8
Figura 2.5 Bond de energía con sus variables de potencia. . . . .	.10
Figura 2.6 Puerto-1 Resistencia. . . . .	.12
Figura 2.7 Puerto-1 Capacitor. . . . .	.13
Figura 2.8 Puerto-1 Inercia. . . . .	.14
Figura 2.9 Tetrahedro de Estado. . . . .	.15
Figura 2.10 Puerto-1 Activos. . . . .	.15
Figura 2.11 Bond Graph de un Transformador y de un Girador. . . . .	.16
Figura 2.12 Unión-0. . . . .	.17
Figura 2.13 Unión-1. . . . .	.18
Figura 2.14 Acción y Reacción. . . . .	.18
Figura 2.15 Causalidad para un Bond. . . . .	.19
Figura 2.16 Unión cero sin causalidad. . . . .	.20
Figura 2.17 Unión con causalidad. . . . .	.20
Figura 2.18 Causalidad Integral. . . . .	.20
Figura 2.19 Causalidad Derivativa. . . . .	.21
Figura 2.20 Bond activo. . . . .	.22
Figura 2.21 Bond Graph con un bond activo. . . . .	.23

Figura 3.1 Convertidores de Electrónica de Potencia. . . . .	.24
Figura 3.2. Curva característica. . . . .	.25
Figura 3.3 Lógica del Diodo.	25
Figura 3.4 Circuito de diodo con carga RC. . . . .	.27
Figura 3.5 Procedimiento-1 en Bond Graph con cargas RC. . . . .	.28
Figura 3.6 Diagrama a bloques de la Estructura de Unión de un BG. . . . .	.29
Figura 3.7 Modelos en Bond Graph con carga RC. . . . .	.33
Figura 3.8 Diodo con Carga RC en Simnon. . . . .	.37
Figura 3.9 Representación en BG con carga RC. . . . .	.39
Figura 3.10 Modelado del Diodo con Carga RC en 20-sim. . . . .	.40
Figura 3.11 Circuito de diodo con carga RL. . . . .	.41
Figura 3.12 Procedimiento-1 en BG con carga RL. . . . .	.41
Figura 3.13 Modelado en Bond Graph con carga RL. . . . .	.42
Figura 3.14 Diodo con Carga RL en Simnon. . . . .	.45
Figura 3.15 Representación en BG con carga RL. . . . .	.46
Figura 3.16 Modelado del Diodo con Carga RL en 20-sim. . . . .	.47
Figura 3.17 Diodo caso-I con carga RL. . . . .	.48
Figura 3.18 Caso – I, en BG. . . . .	.48
Figura 3.19 Modelado en BG caso-I. . . . .	.49
Figura 3.20 Caso –I. . . . .	.53
Figura 3.21 Representación en BG caso- I. . . . .	.54
Figura 3.22 Modelado del Caso-I en 20-sim. . . . .	.55
Figura 3.23 Diodo caso- II con carga RC. . . . .	.56
Figura 3.24 Caso-II en BG. . . . .	.56
Figura 3.25 Modelado en BG caso-II. . . . .	.57
Figura 3.26 Caso – II. . . . .	.62
Figura 3.27 Representación en BG del caso- II. . . . .	.63

Figura 3.28 Modelado del Caso-II en 20-sim. . . . .	.64
Figura 3.29 Rectificador Tap Central con carga RC. . . . .	.65
Figura 3.30 Rectificador Tap Central con carga RC en BG. . . . .	.65
Figura 3.31 Modelado en BG del Rectificador con Tap Central. . . . .	.66
Figura 3.32 Rectificador de onda completa. . . . .	.70
Figura 3.33 Representación en BG Rectificador de Media Onda. . . . .	.71
Figura 3.34 Representación en BG del rectificador de media onda. . . . .	.72
Figura 3.35 Trayectoria causal (TC). . . . .	.75
Figura 4.1 Símbolo del tiristor. . . . .	.76
Figura 4.2 Circuito de Conmutación controlado por dos fases. . . . .	.77
Figura 4.3 Estado del controlado por dos fases (Bifásico). . . . .	.81
Figura 4.4 Control de Fase de disparo en cada uno de los tiristores. . . . .	.82
Figura 4.5 Simulación en 20-sim del convertidor controlado por dos fases (Bifásico).83	
Figura 4.6 Rectificador controlado de Media Onda con carga R. . . . .	.83
Figura 4.7 Estado Dinámico del Rectificador controlado por dos fases (Bifásico). .84	
Figura 4.8 Convertidor Trifásico de Media Onda. . . . .	.85
Figura 4.9 Fuente de alimentación trifásica. . . . .	.88
Figura 4.10 Estado dinámico de los elementos de almacenamiento de energía. . .89	
Figura 4.11 Esfuerzo de Inercia en T1, T2 y T3. . . . .	.89
Figura 4.12 Respuesta y Activación de los Tiristores. . . . .	.90
Figura 4.13 Modelado del convertidor Trifásico de media onda. . . . .	.91
Figura 4.14 Señal Trifásica de alimentación. . . . .	.91
Figura 4.15 Estado dinámico de los elementos de almacenamiento de Energía. . .92	
Figura 4.16 Estado dinámico de la resistencia interna de los tiristores T1, T2 y T3. .93	
Figura 4.17 Activación de los Tiristores T1, T2 y T3. . . . .	.94
Figura 4.18 Convertidor trifásico con carga RC. . . . .	.94
Figura 4.19 Modelado convertidor Trifásico con carga RC de media Onda. . .95	

Figura 4.20 Activación de los Tiristores. . . . .	.96
Figura 4.21 Respuesta del convertidor con carga RC controlado por fase. . . . .	.96
Figura 4.22 Puente con tiristores. . . . .	.97
Figura 4.23 Modelado en BG del Rectificador de Media Onda. . . . .	.98
Figura 4.24 Rectificador de media Onda Controlado. . . . .	.99
Figura 4.25 Motor de CD controlado por Armadura. . . . .	.100
Figura 4.26 Procedimiento-1 localización de los elementos en Bond Graph. . . . .	.100
Figura 4.27 Bond Graph correspondiente al motor de CD controlado por armadura. . . . .	.101
Figura 4.28 Motor de CD controlado por un rectificador trifásico de media onda. . . . .	.101
Figura 4.29 Modelado en BG del Rectificador de Media Onda Trifásico con carga de un Motor de CD. . . . .	.102
Figura 4.30 Velocidad angular ω del motor de CD. . . . .	.102
Figura 4.31 Velocidad angular del Motor de CD idealmente. . . . .	.103

Lista de Tablas

Tabla 2.1 Variables generalizadas de sistemas Eléctricos, Mecánicos e Hidráulicos. . . . .	.11
Tabla 2.2 Elemento R. . . . .	.12
Tabla 2.3 Elemento C. . . . .	.13
Tabla 2.4 Elemento I. . . . .	.14
Tabla 2.5 Causalidad para los multipuertos básicos. . . . .	.19
Tabla 2.6 Formas Causales para puerto-1. . . . .	.21
Tabla 2.7 Formas Causales para puerto-2 y puerto-3. . . . .	.22
Tabla 3.1 Estructura del Diodo en Bond Graph. . . . .	.26
Tabla 3.2 Integración de elementos de la matriz $x(t)$, $\dot{x}(t)$ y $z(t)$. . . . .	.32
Tabla 3.3 Causalidad MTF. . . . .	.39
Tabla 4.1 Relación ángulo-voltaje de disparo de activación. . . . .	.81
Tabla 4.2 Activacion de los Tiristores T1, T2, T3 y T4. . . . .	.98

Abreviaturas

AC	Corriente Alterna
DC	Corriente Directa
R	Resistencia
C	Capacitivo
L	Inductancia
I	Inercia
TF	Transformador
GY	Girador
RC	Resistencia-Capacitiva
RL	Resistencia-Inductiva
TC	Trayectoria Causal
SCR	Rectificador controlado de silicio
MOSFET	Transistor de efecto de campo de metal-oxido
TRIAC	Tiristor de Trío bidireccional
GTO	Tiristor de bloqueo por puerta
BG	Bond Graph
PD	Polarización Directa
PI	Polarización Inversa
MS_e	Fuente de esfuerzo (Voltaje)
MS_f	Fuente de flujo (Corriente)
ON	Switchs Activado
OFF	Switchs Desactivado
MTF	Transformador Modulado
MGY	Girador Modulado
MTF-R	Transformador modulado asociado a un elemento lineal R
D	Detector de salida
P1	Propiedad S_{11} y S_{22} matrices cuadradas anti-simétricas
P2	Propiedad S_{12} matriz transpuesta negativa S_{21} y viceversa
V_γ	Voltaje de ruptura del diodo y/o tiristor
α	Ángulo de fase
$T_1, T_2 \dots T_n$	Numero de Tiristores
$D_1, D_2 \dots D_n$	Numero de diodos
v_s	Voltaje de entrada
I_a	Corriente de armadura
R_a	Resistencia de armadura
L_a	Inductancia de armadura
j_a	Inercia del motor
B	Coefficiente de fricción viscosa
T_m	Par del motor

RESUMEN

El lenguaje de Bond Graph es un enfoque de modelización unificado para los diferentes dominios físicos, que explota y exhibe la estructura física de intercambio de potencia en el sistema. A la par de conservar esta importante propiedad, el método permite codificar en el modelo la estructura matemática que muestra las interrelaciones causales entre las señales en el sistema (Karnopp y Rosenberg en 1983), lo cual facilita la derivación algorítmica de modelos matemáticos y computacionales directamente de los BG.

Con la invención del *diodo* se derivaron más componentes electrónicos como: *tiristores*, *SCR*, *MOSFET* etc. Son dispositivos de conmutación que juega un papel fundamental en los sistemas de conmutación en la *electrónica de potencia*, debido a las interrupciones de los mecanismos que nos permiten transformar la energía de Alterna AC a Directa DC. El *diodo* presenta una característica de *no-linealidad*, es decir, muestra un estado no controlable de operación, a diferencia del *tiristor* que se puede controlar el estado de activación en base a un ángulo de disparo.

El punto a tratar es el comportamiento de la resistencia interna que se encuentra presente en estos dos elementos *diodo* y *tiristor*, que lo asemejan a un simple interruptor permitiendo analizar diferentes redes de circuitos con diferentes cargas RC, RL, Bifásicos y Trifásicos de media onda ó de onda completa que se representan mediante ecuaciones diferenciales de estado de la forma $\dot{x} = Ax + Bu$ y con ecuación de salida de la forma $y = Cx + Du$. Con esta representación, se logran alcanzar los tres principales conceptos de un modelado eléctrico (Estado, Entradas y Salidas) del sistema físico.

Mantener un control de un motor de CD controlado por Armadura a través de un convertidor trifásico de media onda permite realizar con detalle la activación de los *tiristores*. Para tener un control del motor implica pasar de un dominio físico eléctrico a un mecánico, observando la velocidad angular de tal forma que al cambiar algún parámetro determinamos la estabilidad del motor.

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

1.1 Modelado de sistemas físicos

La simulación de sistemas dinámicos (cantidades que dependen del tiempo), hoy en día, es uno de los temas de mayor interés para la ingeniería, debido a los crecientes obstáculos que han adquirido los sistemas con distintos dominios físicos.

Así mismo es cada vez más frecuente la necesidad de tener en cuenta la formulación e interacción entre distintos sistemas físicos que intervienen en un problema, debido a la variedad de componentes que involucran diferentes áreas como son: Mecánicos, Eléctricos, Electrónicos e Hidráulico etc.

La sociedad actual ha experimentado cambios nunca antes visto. Somos testigos de la influencia de la Electrónica (radio, televisión, telefonía, computación y la medicina). Todo ha sido posible gracias a los trabajos de investigación, los cuales han visto acelerados a partir de la invención de los Diodos. Este dispositivo basado en semiconductores, a partir de los cuales se fabrican prácticamente todos los sistemas eléctricos y/o electrónicos actuales.

Como resultado de investigaciones en 1903 el físico británico John Ambrose Fleming descubrió e invento la válvula electrónica diodo, que abrió el camino a los posteriores avances de la electrónica moderna, en base a los estudios anteriores de Thomas A. Edison como se muestra en la figura 1.1.

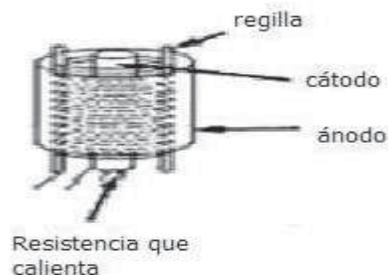


Figura 1.1 Válvula electrónica diodo.

Un mecanismo destacable del siglo XX ha sido el automóvil, que ha servido de medio de progreso a la humanidad, su importancia ha llevado a un análisis tanto en áreas de la economía, como de la física y otras, de tal forma de perfeccionar su uso. Por ello, no es de asombrar el que tanto estudio se realicen en el tema de tal forma, de encontrar modelos que lo representan cada

vez mejor para simular su comportamiento lo más fielmente. Los vehículos han traído consigo problemas de contaminación, ruido y accidentes, entre otros problemas. Esto justifica la realización de los estudios necesarios para obtener un modelo de simulación, que permita analizar los comportamientos dinámicos de un vehículo.

La teoría sobre el lenguaje de modelado Bond Graph (Modelado en el dominio físico o BG) es original de Paynter desde 1961 y desarrollada por Karnopp y Rosenberg. Basado en el principio de la conservación de la energía, formado por un conjunto de elementos que corresponden a los principios básicos de almacenamientos, disipación de energía y un flujo continuo del producto de potencia entre ellos.

Bond Graph representa un enfoque unificado para el modelo y manipulación de sistemas dinámicos de Ingeniería que permita obtener sus ecuaciones de estado y como son sus propiedades de observabilidad, controlabilidad y dependencia lineal de sus elementos, basado en una representación gráfica y la generalización de las variables de flujo (corriente) y esfuerzo (voltaje).

En la figura 1.2 se muestran algunos sistemas físicos que pueden ser modelados para obtener y determinar las ecuaciones de los elementos, ecuaciones de equilibrio así como el modelo matemático del sistema.

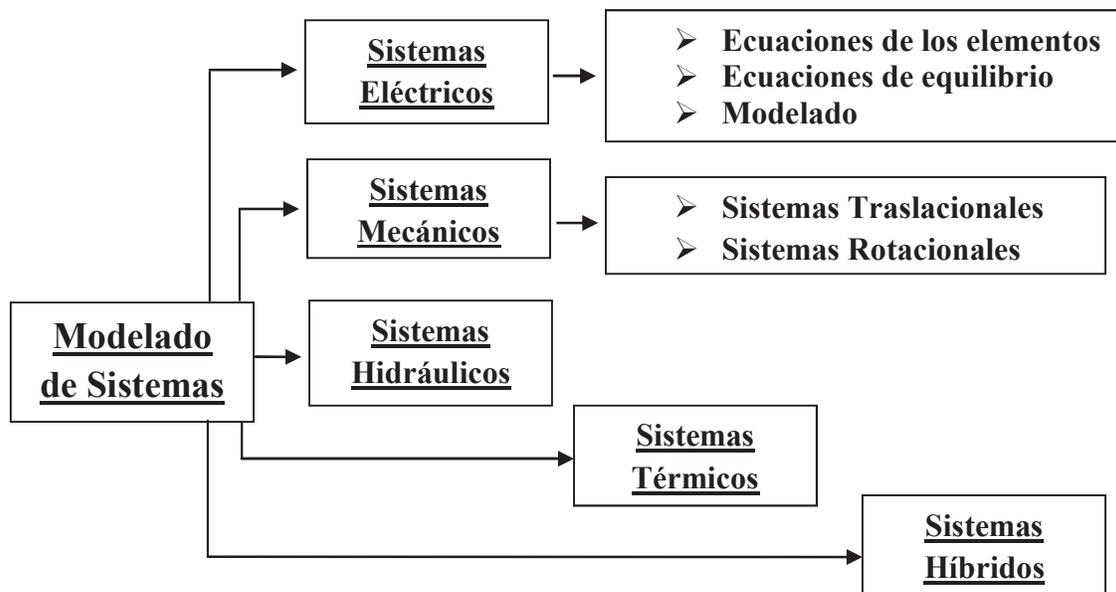


Figura 1.2 Modelado de Sistemas.

1.2 Objetivo

El objetivo de este trabajo de tesis es mostrar la descripción de sistemas físicos como son: Eléctrico, Mecánico e Hidráulico y describir como la potencia juega un papel fundamental en los sistemas de *conmutación* y de la interacción en diferentes dominios, con los principales conceptos y elementos de la teoría del Bond Graph, determinamos las variables de interés *esfuerzo* y *flujo*, verificándolos por medio de simulación utilizando el software *Simnon* y *20-sim*.

1.3 Justificación

- Implementar una nueva técnica y un enfoque distinto para la comprensión de los sistemas físicos como son Eléctricos, Mecánicos e Hidráulicos etc.
- Debido al ambiente de trabajo de Bond Graph se logra obtener el comportamiento de sistemas en estado dinámico y observar el comportamiento de cada uno de los elementos del sistema.
- Obtener los tres conceptos fundamentales de un Modelo de Sistema físicos como son:
 - ✓ Estados
 - ✓ Entradas
 - ✓ Salidas

1.4 Metodología de la Investigación

El desarrollo de este trabajo de investigación se muestra en la figura 1.3, a través del modelado de sistemas físicos, obtenemos el Bond Graph, determinando las ecuaciones diferenciales y por ultimo el análisis dinámico por medio de la simulación.



Figura 1.3 Metodología de la investigación.

1.5 Descripción de los Capítulos

A continuación se describe la estructura de la tesis, conforme una pequeña explicación de los capítulos que la constituyen.

En el capítulo 1, se da una breve introducción del Modelado de Sistemas Físicos en base al lenguaje de Bond Graph. Planteando los objetivos, justificación y metodología de la investigación.

En el capítulo 2, se exponen los antecedentes del modelado en Bond Graph, además de los componentes básicos para el modelado de un sistema físico como son: eléctrico, mecánico e hidráulico.

En el capítulo 3, se presenta la respuesta de un sistema eléctrico, obteniendo el modelado en espacio de estado. Mostrando el modelo matemático del *diodo* con las características de conducción en Polarización Directa (Corto-Circuito) y en Polarización Inversa (Circuito-Abierto), agregando que juega un papel fundamental para los sistemas electrónicos ya que cuenta con características semejantes a un interruptor sencillo considerando idealmente al *diodo*, esto sirve como base para comparaciones y muestra dónde es todavía posible realizar mejoras.

En el capítulo 4, en base a la técnica del Bond Graph y aplicando la causalidad a los elementos se obtienen las variables de estado del sistema eléctrico en el dominio del tiempo con un nuevo elemento llamado *tiristor*. Además, se comprueban los resultados obtenidos por medio de dos programas de simulación de sistemas de modelado en Bond Graph denominados Simnon y 20-sim

En el capítulo 5, se presentan las conclusiones generales así como las recomendaciones del presente trabajo de tesis.

Capítulo 2

Antecedentes:

Modelado de Convertidores Elementales en Bond Graph

2.1 Introducción a la Electrónica de Potencia

La electrónica es la disciplina que trata de la utilización de los componentes y de los circuitos electrónicos para realizar funciones específicas. Un componente electrónico es un ente físico que presenta determinadas relaciones entre las magnitudes de tensión y corriente en sus terminales.

Los dispositivos electrónicos cuyo comportamiento suele ser complejo y difícil de representar con exactitud mediante parámetros concretos, sería una tarea de enorme dificultad y en muchos casos, de poca utilidad. Por esto, es esencial aproximar mediante modelos simples, de fácil entendimiento matemático, que permitan obtener resultados razonables próximos a los reales.

El elemento que se analiza es el *diodo* el cual, por ser el más simple pero con un papel fundamental para los sistemas electrónicos ya que cuenta con características semejantes a un interruptor sencillo como se muestra en la figura 2.1.

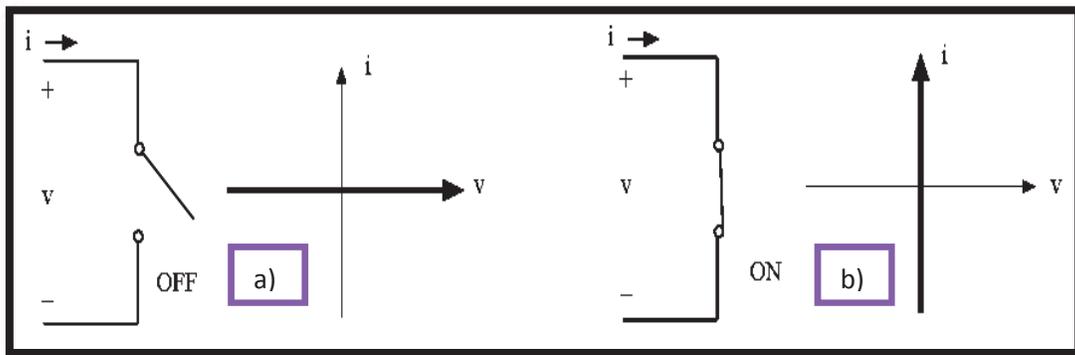


Figura 2.1 Interruptor ideal. a) Abierto; b) Cerrado.

El *diodo* es un componente electrónico de dos terminales cuyo comportamiento no es lineal: deja pasar corriente en un sentido y la bloquea en sentido contrario. Este carácter hace que los circuitos sean *no-lineales*, como se muestra en la figura 2.2.

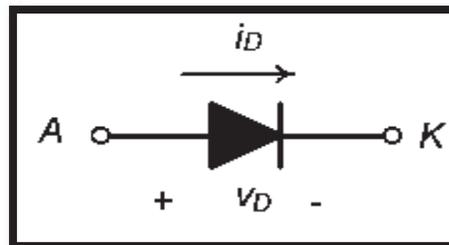


Figura 2.2 Símbolo del Diodo.

En la figura 2.3, se muestra las características de operación del *diodo ideal* con el *real*, compuestos de *silicio* y de *germanio*, determinando el rango de funcionamiento de cada uno, a través del modo de activación como son: Polarización Directa (Corto-Circuito) y Polarización Inversa (Circuito Abierto).

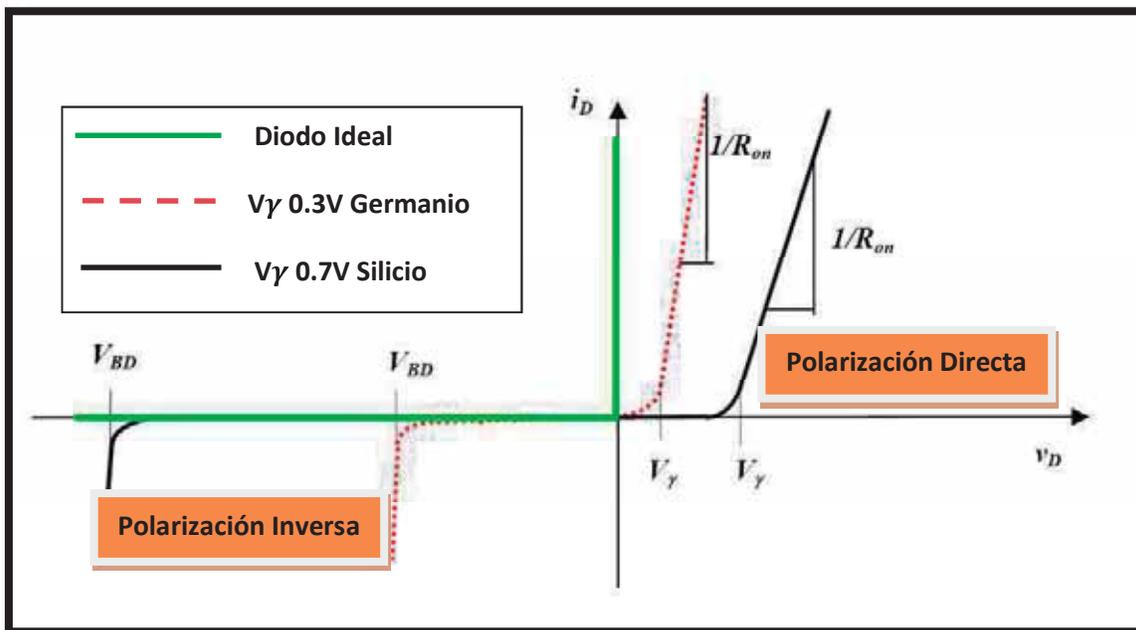


Figura 2.3 Funcionamiento del Diodo Ideal.

Se describe el comportamiento de los *diodos* en circuitos sencillos y complejos con el fin de comprender su aplicación como protector de circuitos,

así como la función que desempeña en los circuitos rectificadores como se ilustra en la figura 2.4.

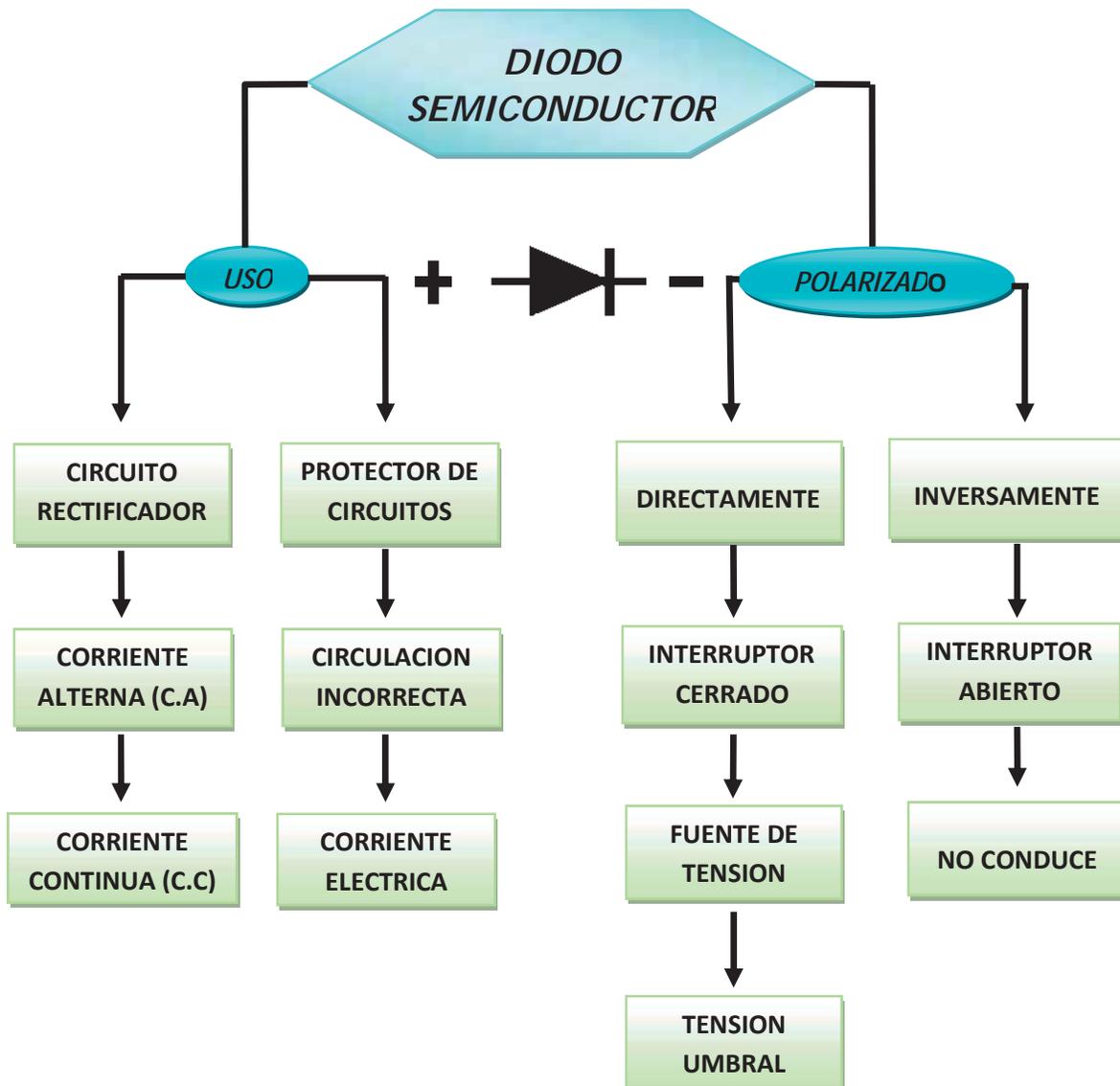


Figura 2.4 Comportamiento y utilidad de un diodo en un circuito electrónico.

2.2 Modelado de Sistemas Físicos en Bond Graph

La rápida evolución de la tecnología electrónica obliga a una renovación y actualización constante de su enseñanza. Con lo cual se deben introducir nuevos conceptos y condensar otros. En particular en el análisis y modelado de sistemas electrónicos de potencia.

De acuerdo a Bond Graph (Payter 1961), es importante notar que el nivel de abstracción del lenguaje de Bond Graph es esencialmente diferente a partir de la representación matemática, se debe señalar que esta técnica no tiene la pretensión de ser universal. Sin embargo, ha mostrado su eficiencia en gran número de aplicaciones, para el diseño de sistemas, simulación y determinación de las leyes de control, de esta manera se puede ubicar entre los métodos más necesarios para la construcción de modelos.

Un Bond Graph es una representación gráfica de un sistema dinámico donde una colección de componentes interactúan unos con otros a través de puertos de energía. Estos elementos colocados describen como fluye la potencia a través del sistema, es un enfoque general que permite construir modelos de sistemas magnéticos, mecánicos, hidráulicos, neumáticos, eléctricos y térmicos utilizando un pequeño conjunto de elementos ideales. Existen técnicas estándares que expresan los modelos en ecuaciones diferenciales o en esquemas de simulación por computadora. A continuación, se definen los elementos básicos que componen a un modelo representado en Bond Graph.

2.3 Componentes básicos de un Bond Graph

El concepto fundamental de un Bond Graph es el *bond* utilizado para acoplar los puertos de energía de los componentes del sistema.

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

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

Los lugares en los cuales pueden ser interconectados, son espacios donde la energía puede fluir, 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.

Dado que existen interacciones de potencia cuando dos puertos son conectados, es útil clasificar la variedad de potencia en un esquema universal y describir todos los tipos de multipuertos 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 la energía en la figura 2.5 se muestra la representación de un bond con las variables de potencia asociadas.

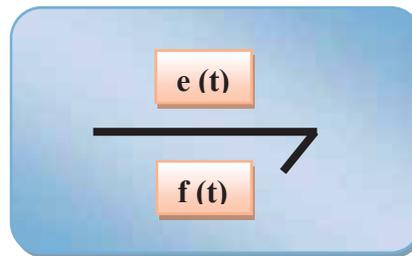


Figura 2.5 Bond de energía con sus variables de potencia.

Estos pares de variables son *voltaje* y *corriente* para un sistema eléctrico. La relación de ambas variables esta dada por:

$$P(t) = e(t) f(t) \quad (2.1)$$

En sistemas que almacenan energía es necesario definir variables que representen el estado del sistema llamadas *variables de energía* denominadas *momento* $p(t)$ ó *esfuerzo acumulado* e_a y *desplazamiento* $q(t)$ ó *flujo acumulado* $f_a(t)$ están dadas por:

$$p(t) = e_a(t) = \int^t e(\tau) d\tau \quad (2.2)$$

$$q(t) = f_a(t) = \int^t f(\tau) d\tau \quad (2.3)$$

En la siguiente tabla 2.1, se muestra las variables generalizadas para sistemas eléctricos, mecánico traslacional, mecánico rotacional e hidráulico.

Variables	General	Eléctrico	Mecánico Traslacional	Mecánico Rotacional	Hidráulico
<i>Esfuerzo</i>	$e(t)$	$v(t)$ voltaje	$F(T)$ fuerza	$\tau(t)$ par	$Pe(t)$ presión
<i>Flujo</i>	$f(t)$	$i(t)$ corriente	$V(t)$ velocidad	$\omega(t)$ velocidad angular	$Q(t)$ caudal
<i>Momento</i>	$p(t) = \int e(t) dt$	$\lambda(t)$ enlace de flujo	$PR(t)$ momento rotacional	$H(t)$ momento angular	$Pp(t)$ integral de presión
<i>Desplazamiento</i>	$q(t) = \int f(t) dt$	$q(t)$ carga	$x(t)$ distancia	$\theta(t)$ Angulo	$V(t)$ volumen
<i>Potencia</i>	$P(t) = e(t)f(t)$	$v(t)i(t)$	$F(t)V(t)$	$\tau(t) \omega(t)$	$Pe(t) V(t)$
<i>Energía</i>	$E(p) = \int f(p) dp$ $E(q) = \int e(q) dq$	$\int f(\lambda) d\lambda$ $\int f(e) dq$	$\int V(PR) dPR$ $\int F(x) dx$	$\int \omega(H) dH$ $\int \tau(\theta) d\theta$	$\int Q(Pp) dPp$ $\int Pe(V) dV$

Tabla 2.1 Variables generalizadas de sistemas Eléctricos, Mecánicos e Hidráulicos.

2.3.1 Puertos-1 Pasivos

Considerando elementos ideales, los cuales representan disipación de potencia y dos formas de almacenamiento de energía; llamamos a éstos elementos pasivos. Se denominan *Puertos-1* pasivos a aquellos elementos que intercambian potencia en un puerto o elemento sencillo pasivo.

2.3.2 Elemento Resistivos (R)

Representará a aquellos elementos o situaciones donde haya una pérdida de energía, un ejemplo claro es el de la resistencia eléctrica que al paso de una intensidad de corriente (*flujo*) produce una caída de tensión (*esfuerzo*) son relacionadas por una función constante en la figura 2.6, se muestra el símbolo en Bond Graph de la resistencia, así como esquemas de las resistencias en diferentes dominios.

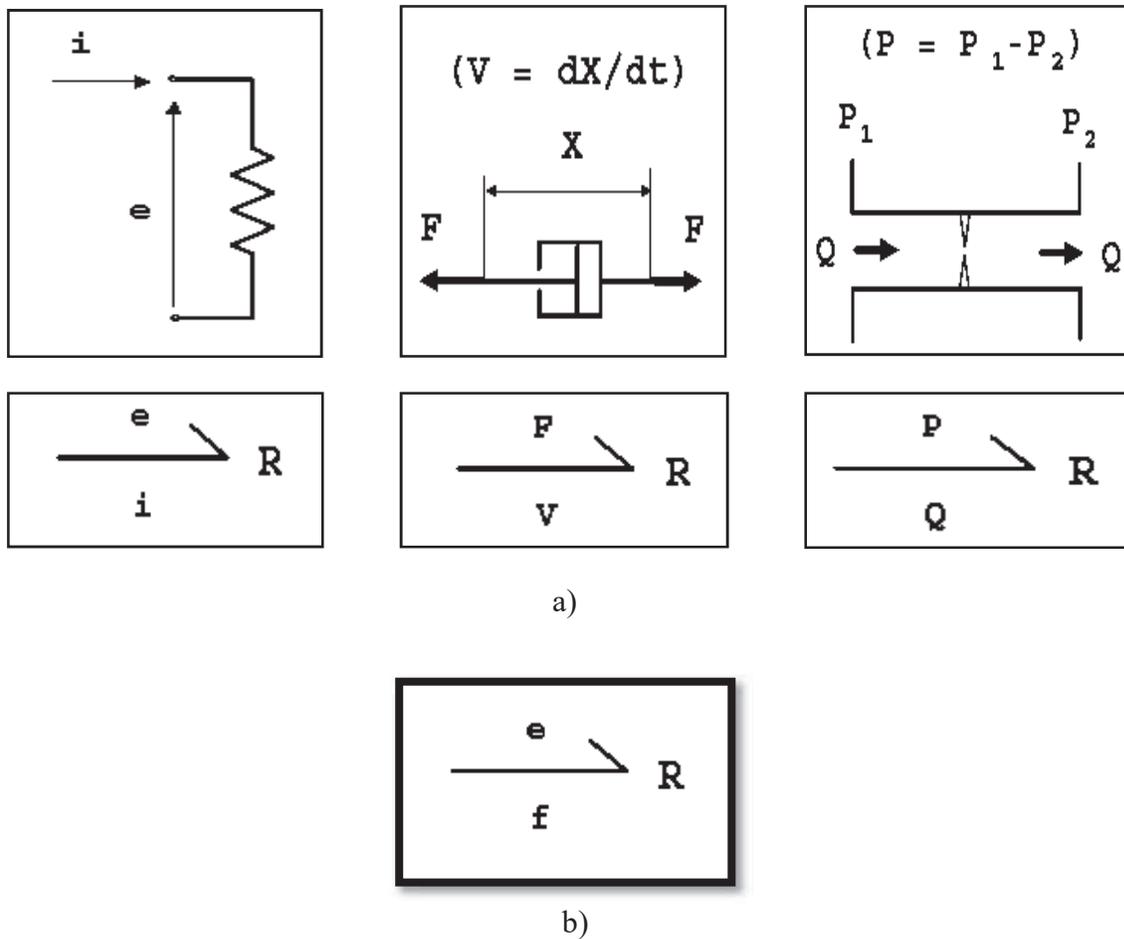


Figura 2.6 Puerto-1 Resistencia. a) Representación en algunos dominios (Eléctrico, Mecánico e Hidráulico); b) Símbolo en Bond Graph.

Las relaciones del elemento de disipación (Resistencia) se muestra en diferentes dominios son resumidas en la tabla 2.2.

Relación	Eléctrico	Mecánico	Hidráulico
Lineal	$v(t) = Ri(t)$	$F(t) = bV(t)$	$\Delta P_r(t) = RQ(t)$
No-Lineal	$v = \varphi(i)$	$F = \varphi(V)$	$\Delta P = \varphi(Q)$

Tabla 2.2 Elemento R.

2.3.3 Elemento Capacitivo (C)

En la figura 2.7, se representa como un puerto de capacitor todo elemento que es susceptible de almacenar energía y de devolverla íntegramente al sistema sin ninguna pérdida.

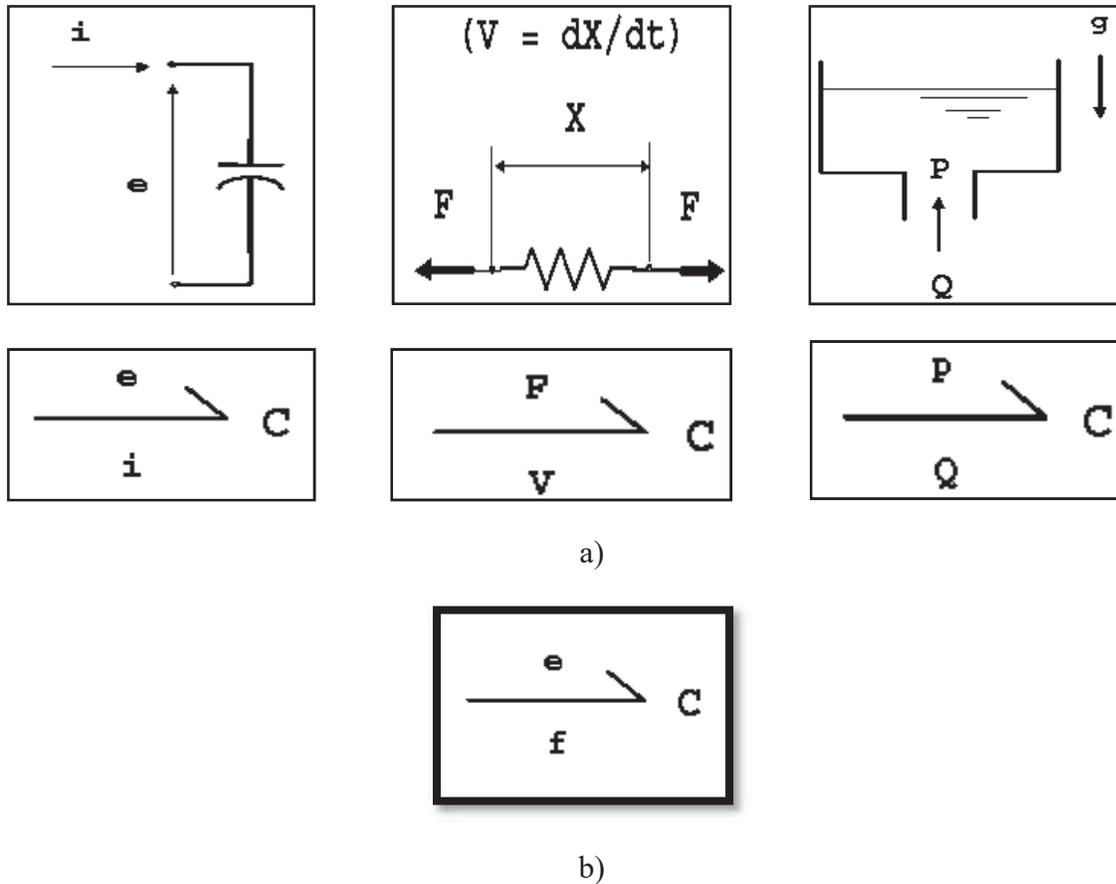


Figura 2.7 Puerto-1 Capacitor. a) Representación en algunos dominios (Eléctrico, Mecánico e Hidráulico); b) Símbolo en Bond Graph.

La tabla 2.3, muestra el almacenamiento de flujo del capacitor en diferentes dominios físicos.

Relación	Eléctrico	Mecánico	Hidráulico
Lineal	$v(t) = \frac{1}{C} \int i dt$	$F(t) = k \int V dt$	$P_r(t) = C \int \Delta Q dt$
No-Lineal	$v(t) = \varphi(q)$	$F(t) = \varphi(x)$	$P_r(t) = \varphi(V)$

Tabla 2.3 Elemento C.

2.3.4 Elemento Inercia (I)

Los elementos de inercia, es decir inductivos se caracterizan por tener relacionadas las variables *esfuerzo-flujo*. Tiene una propiedad de poder almacenar energía mediante la acumulación de esfuerzo, se muestra en la figura 2.8.

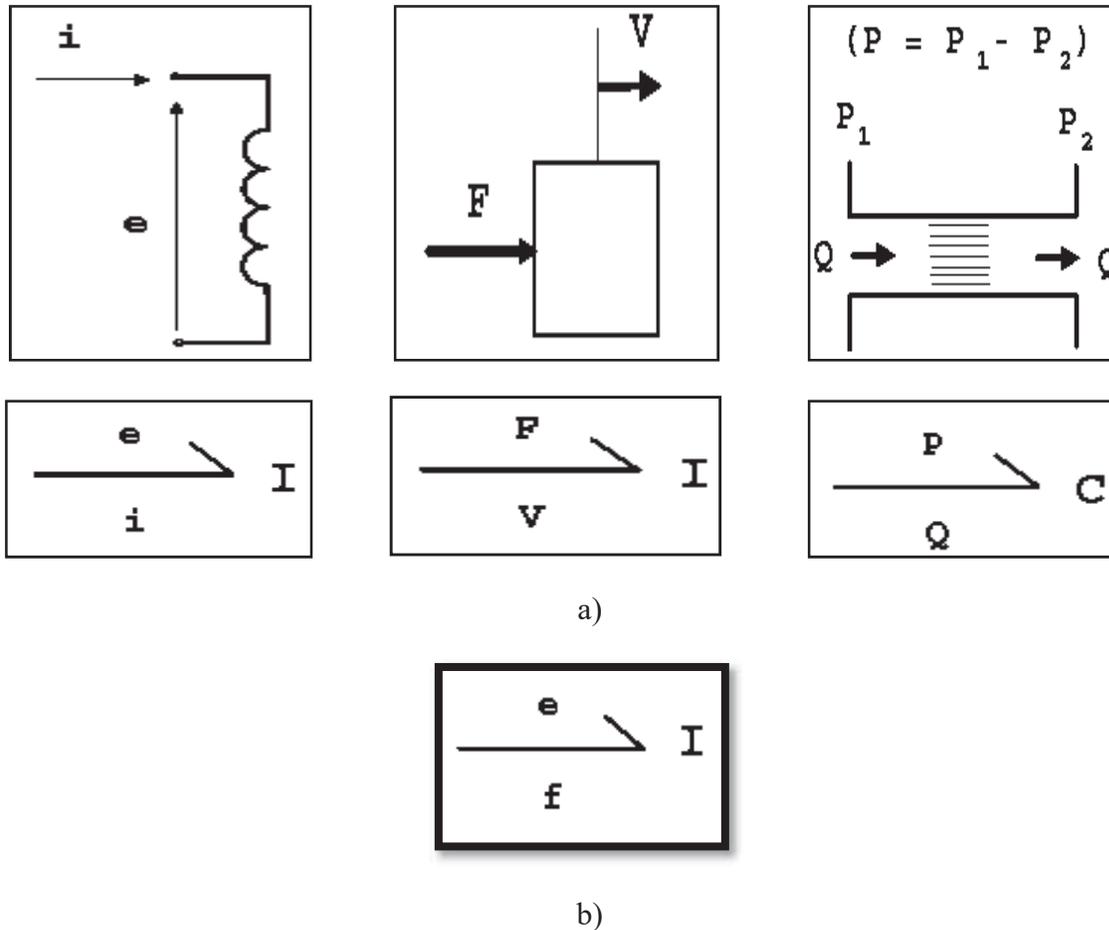


Figura 2.8 Puerto-1 Inercia. a) Representación en algunos dominios (Eléctrico, Mecánico e Hidráulico); b) Símbolo en Bond Graph.

La tabla 2.4, muestra el almacenamiento de esfuerzo de la inercia en diferentes dominios físicos.

Relación	Eléctrico	Mecánico	Hidráulico
Lineal	$i(t) = \frac{1}{L} \int v dt$	$V(t) = \frac{1}{M} \int F dt$	$Q(t) = I \int \Delta P_r dt$
No-Lineal	$i(t) = \varphi(\lambda)$	$V(t) = \varphi(P)$	$Q(t) = \varphi(P_p)$

Tabla 2.4 Elemento I.

En la figura 2.9, se muestra en el siguiente esquema mnemónico llamado *tetrahedro de estado*, en el cual se observa como se relacionan las variables generalizadas por tres *puertos-1* pasivos R, C e I.

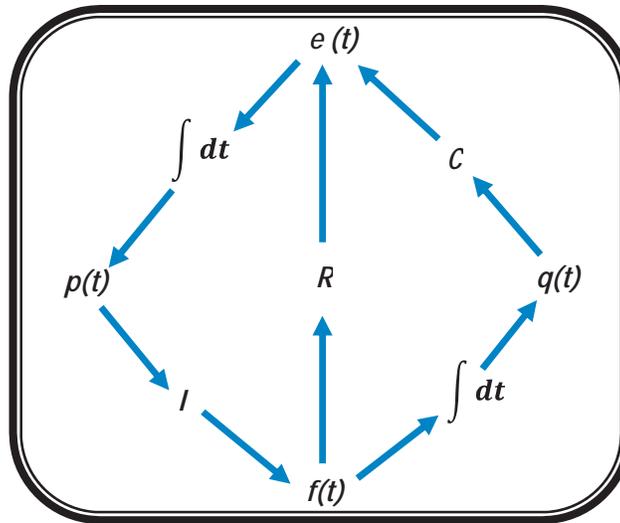


Figura 2.9 Tetrahedro de Estado.

2.3.5 Puertos-1 Activos o Fuentes

Los elementos que introducen energía al sistema son llamados *fuentes*. Existen dos tipos de fuentes, *fuentes de esfuerzo* (voltaje, fuerza o presión) y *fuentes de flujo* (corriente, velocidad o caudal) denotados MS_e y MS_f respectivamente, cuya representación de muestra en al figura 2.10, en donde una fuente es un elemento activo sencillo llamado Puerto-1 Activo.

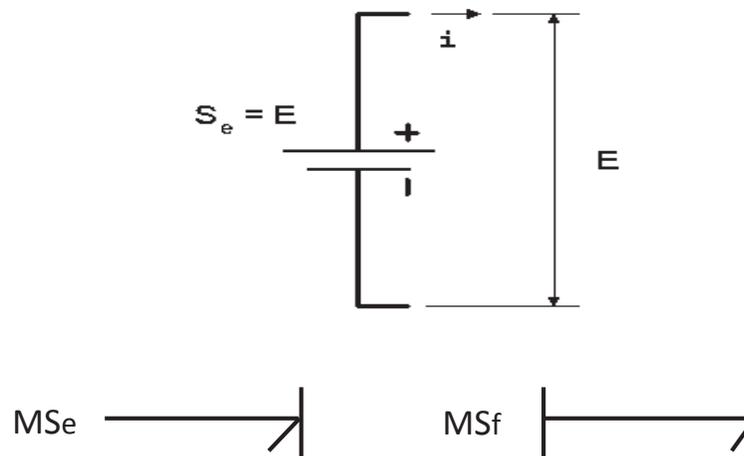


Figura 2.10 Puerto-1 Activos.

2.3.6 Los Elementos Ideales de Puerto-2

Consideramos ahora dos elementos ideales *Puerto-2*, llamados *transformador (TF)* y *girador (GY)*, que son sistemas lineales que cambian en relación entre las variables de flujo y esfuerzo. Caracterizándose por tener dos puertos.

Los Bonds que representan a un transformador *TF* y a un girador, *GY* se muestra en la figura 2.11, donde n y r son los *módulos* del transformador y del girador respectivamente.

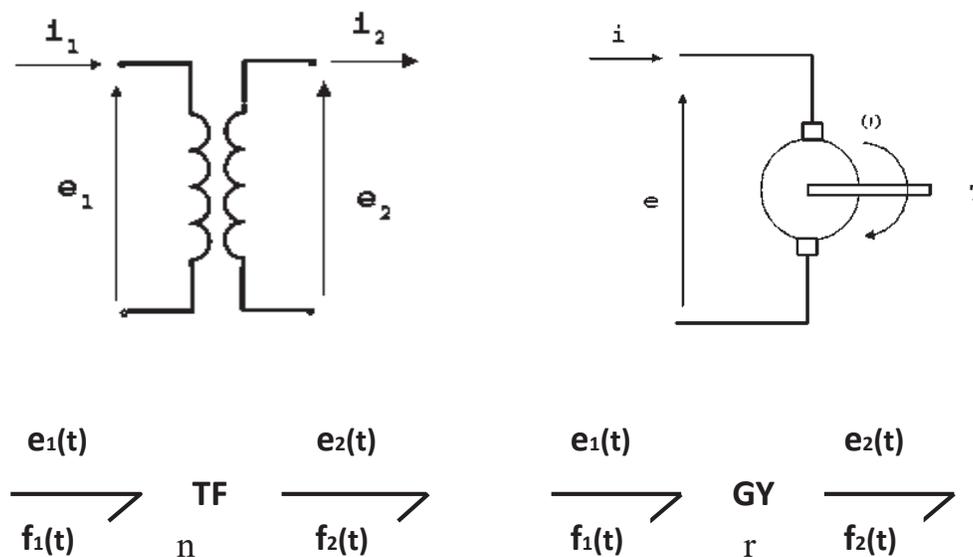


Figura 2.11 Bond Graph de un Transformador y de un Girador.

Las relaciones de las variables de bond generalizadas para el transformador, *TF*, están dadas por:

$$e_1(t) = ne_2(t) \quad (2.4)$$

$$f_1(t) = \frac{1}{n}f_2(t) \quad (2.5)$$

y para el girador, *GY*, son:

$$e_1(t) = rf_2(t) \quad (2.6)$$

$$f_1(t) = \frac{1}{r}e_2(t) \quad (2.7)$$

Estos elementos juegan un papel muy importante para el modelado de la conversión de un dominio físico a otro.

2.3.7 Los Elementos de Unión, Puerto-3

Estos *Puertos-3* son llamados *uniones* dado que ellos sirven para interconectar tres o más puertos de energía dentro de un subsistema. Los *Puertos-3* es una de las ideas fundamentales del formalismo de Bond Graph, representan en forma de multipuertos los dos tipos de *conexiones en serie* y en *paralelo*.

Considerar la *unión de flujo*, *unión-0* o *unión de esfuerzo común* para la conexión en *paralelo*. En la figura 2.12, se muestra la representación de esta unión.

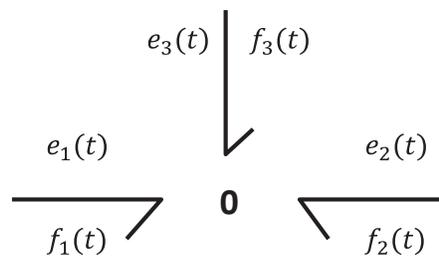


Figura 2.12 Unión-0.

Las relaciones de interconexión que describen una unión de flujo esta dada por:

$$e_1(t) = e_2(t) = e_3(t) \quad (2.8)$$

$$f_1(t) + f_2(t) + f_3(t) = 0 \quad (2.9)$$

Estas ecuaciones especifican que en una *unión-0*, los esfuerzos en todos los Bonds son siempre iguales y la suma algebraica de los flujos es cero. Es decir, representa la ley de Kirchhoff de corriente en un nodo de tres conductores.

El otro elemento de *Puerto-3*, es la *unión de esfuerzo*, *unión-1* o de *flujo común* para la *conexión en serie*, su representación se muestra en la figura 2.13.

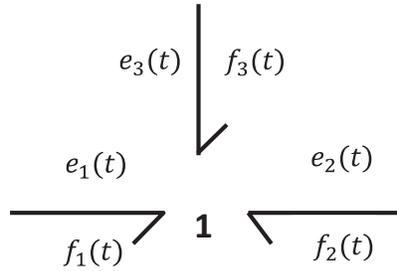


Figura 2.13 Unión-1.

Las relaciones de interconexión para este elemento son:

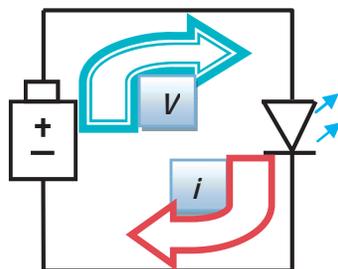
$$f_1(t) = f_2(t) = f_3(t) \quad (2.10)$$

$$e_1(t) + e_2(t) + e_3(t) = 0 \quad (2.11)$$

Obsérvese a diferencia de la unión de flujo, la unión de esfuerzos tiene un flujo común en los Bonds que inciden en la unión y la suma de las variables de esfuerzo en los bonds es cero. Lo cual indica que representa la ley de Kirchhoff de voltaje a lo largo de un lazo cerrado en el cual la corriente fluye y experimenta tres caídas de voltaje.

2.3.8 Causalidad para los Multipuertos Básicos

Siempre que un cuerpo ejerza sobre otro una fuerza (*acción*), el segundo ejercerá, sobre el primero una fuerza de igual intensidad y dirección pero de sentido contrario (*Tercera ley de Newton*) observe la figura 2.14.



Acción = Esfuerzo (voltaje)

Reacción = Flujo (corriente)

Figura 2.14 Acción y Reacción.

Para organizar las leyes constitutivas de componentes en conjuntos de ecuaciones diferenciales necesitamos definir la relación de causa y efecto mencionado anteriormente. Las relaciones de *causa-efecto* para esfuerzo y flujo son representadas en direcciones opuestas. Una marca en un *bond*, llamado *trazo causal*, indica como $e(t)$ y $f(t)$ simultáneamente son determinados causalmente en un *bond*. Dos ejemplos de causalidad se muestran en la figura 2.15.



Figura 2.15 Causalidad para un Bond.

Las reglas que se presentan en la tabla 2.5, se deben cumplir.

Causalidad Necesaria	MSe	MSf
Causalidad Restrictiva	TF	TF
	GY	GY
Causalidad Integral		
Causalidad Integral	I	C
Causalidad Derivativa	I	C
Causalidad Arbitraria	R	R

Tabla 2.5 Causalidad para los multipuertos básicos.

Consideramos dos ejemplos para explicar la importancia de la causalidad. Un modelo para la *unión-0* se muestra en la figura 2.16.

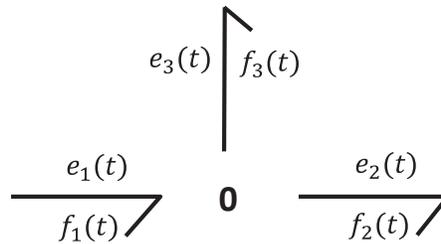


Figura 2.16 Unión-0 sin causalidad.

de la figura 2.16 obtenemos:

$$e_1(t) = e_2(t) = e_3(t) \quad (2.12)$$

$$f_1(t) - f_2(t) - f_3(t) = 0 \quad (2.13)$$

Ahora con el trazo causal, como se muestra en la figura 2.17.

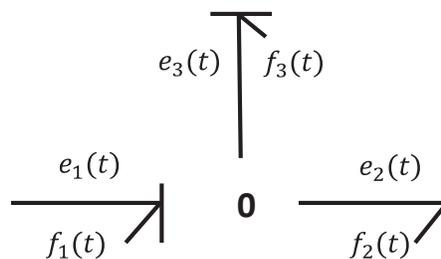


Figura 2.17 Unión-0 con causalidad.

Si consideramos ahora al elemento-C. La relación constitutiva es de $f(t)$ a $e(t)$ y almacenamiento de flujo, es decir, relaciona $e(t)$ a una variable de flujo acumulada $q(t) = \int f(t) dt$. Si $f(t)$ es la entrada a un elemento-C como se muestra en la figura 2.18, se integra primero para encontrar $q(t)$ y entonces $e(t)$ es una salida relacionada a $q(t)$ a esta causalidad en un elemento de almacenamiento se llama *causalidad integral*, debido a que la integral de la entrada $f(t)$ se relaciona con la salida $e(t)$.

$$e(t) = \frac{1}{c} \int f(t) dt \quad (2.14)$$

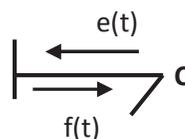


Figura 2.18 Causalidad Integral.

Invirtiendo la causalidad, mostrada en la figura anterior 2.18, se obtiene la relación de la ecuación (2.14) pero escrita como derivada.

$$f(t) = C \frac{de(t)}{dt} \quad (2.15)$$

A esta casualidad se le llama *causalidad derivativa* de un elemento de almacenamiento como se muestra en la figura 2.19.

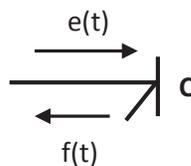


Figura 2.19 Causalidad Derivativa.

En la tabla 2.6, se muestra los *Puertos-1* con la causalidad correspondiente a cada elemento considerado.

Elemento	Forma Causal	Relación Causal
Fuente de Esfuerzo	MSe	$e(t)=E(t)$
Fuente de Flujo	MSf	$f(t)=F(t)$
Resistencia	R	$e(t)=\Phi_R [f(t)]$
	R	$f(t)=\Phi_R^{-1} [e(t)]$
Capacitancia	C	$e(t)=\Phi_C^{-1} [\int^t f(\tau) d\tau]$
	C	$f(t)=\frac{d}{dt} [\Phi_C e(t)]$
Inductancia	I	$f(t)=\Phi_L^{-1} [\int^t e(\tau) d\tau]$
	I	$e(t)=\frac{d}{dt} [\Phi_L f(t)]$

Tabla 2.6 Formas Causales para Puerto-1.

Así como para el *Puerto-2* y *Puerto-3*, que se muestra en la tabla 2.7.

Elemento	Acausal	Causal	Relación Causal
Transformador	$\xrightarrow{1} \text{TF} \xrightarrow{2}$	$\overleftarrow{1} \text{TF} \overleftarrow{2}$	$e_1 = m e_2$ $f_2 = m f_1$
		$\xrightarrow{1} \text{TF} \xrightarrow{2}$	$f_1 = \frac{f_2}{m}$ $e_2 = \frac{e_1}{m}$
Girador	$\xrightarrow{1} \text{GY} \xrightarrow{2}$	$\overleftarrow{1} \text{GY} \overleftarrow{2}$	$e_1 = r e_2$ $f_2 = r f_1$
		$\xrightarrow{1} \text{GY} \xrightarrow{2}$	$f_1 = \frac{f_2}{r}$ $e_2 = \frac{e_1}{r}$
Union-0	$\xrightarrow{1} 0 \xleftarrow{2}$ $3 \uparrow$	$\overleftarrow{1} 0 \overleftarrow{2}$ $3 \downarrow$	$e_2 = e_1$ $e_3 = e_1$ $f_1 = -(f_2 + f_3)$
Union-1	$\xrightarrow{1} 1 \xleftarrow{2}$ $3 \uparrow$	$\overleftarrow{1} 1 \overleftarrow{2}$ $3 \downarrow$	$f_2 = f_1$ $f_3 = f_1$ $e_1 = -(e_2 + e_3)$

Tabla 2.7 Formas Causales para Puerto-2 y Puerto-3

2.4 Bond Activo

Un bond normal tiene dos señales, *esfuerzo* $e(t)$ y *flujo* $f(t)$. A diferencia, un *bond activo* comunica una de las dos señales posibles en una sola dirección. Se representa mediante una flecha completa, como la que se muestra en la figura 2.20, indicando un flujo de señal de potencia cero.



Figura 2.20 Bond activo.

Se utiliza como una señal en un diagrama a bloques, la cual conecta un bloque a otro sin consumir energía, como se ilustra en la figura 2.21.

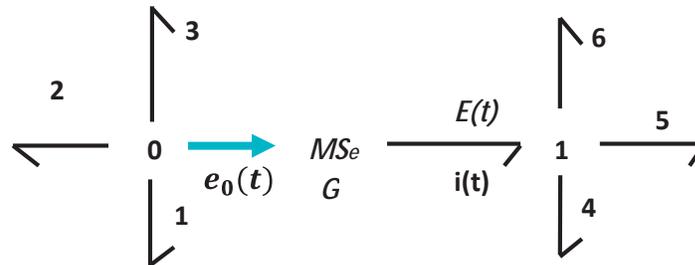


Figura 2.21 Bond Graph con un *bond activo*.

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 dado por la *unión-0*, el voltaje $e_0(t)$ es el mismo que e_1, e_2 y e_3 . Además tiene potencia cero debido a que se considera que la *corriente* correspondiente $e_0(t)$ es despreciable. La suma de corrientes es la *unión-0*, se debe únicamente a i_1, i_2 e i_3 .

2.5 Procedimiento para el Modelado de Sistemas

A continuación se dará una breve explicación de cómo representar los sistemas Eléctricos, Mecánicos e Hidráulicos de forma sencilla. En el capítulo 3, se realiza el procedimiento para el modelado de sistemas electrónicos.

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 al componente apropiado en esa unión, la dirección de la semiflecha indica la dirección asumida del flujo de potencia.
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 (Tierra).
5. Simplificar el modelo de acuerdo a la siguiente regla:



Capítulo 3

Modelado de Sistemas en Conmutación

3.1 Introducción a los Circuitos Electrónicos de Potencia

Para el análisis y modelado de sistemas en conmutación, es necesario convertir la *energía* de una forma a otra. Las características de interrupción de los dispositivos de potencia permiten dicha conversión. Un convertidor se puede considerar como una matriz de conmutación.

A los circuitos de la electrónica de potencia se le llama *convertidores*. Estos se emplean para cambiar los parámetros de la energía eléctrica como se muestra en la figura 3.1.

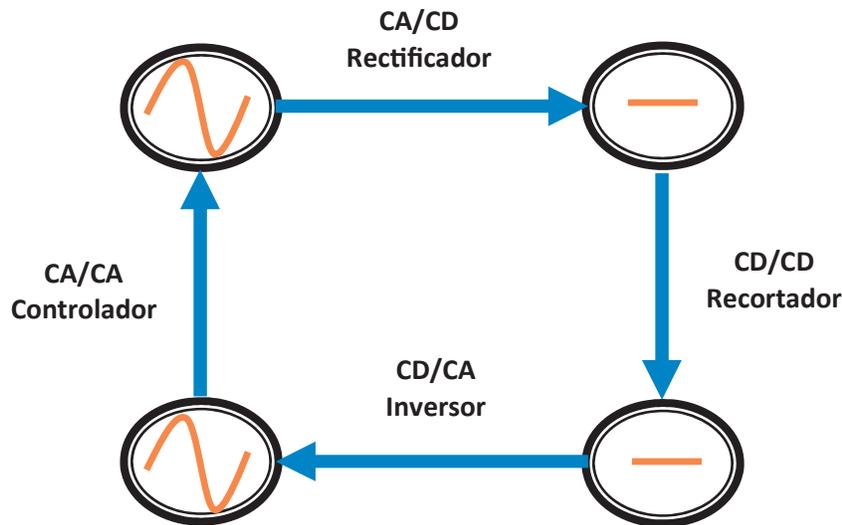


Figura 3.1 Convertidores de Electrónica de Potencia.

3.1.1 Modelado de convertidores en electrónica de potencia

Los dispositivos electrónicos (*diodos, tiristores, transistor de conmutación, etc.*). Son parte de los convertidores elementales caracterizados por una *ley de voltaje-corriente* no lineal. La diferencia interviene en el nivel de control por los dos estados *ON* ó *OFF*. De hecho, un *diodo* no es controlable

desde que el cambio de estado depende únicamente en su medio ambiente. El *tiristor* es controlable para swichear gracias a la corriente de disparo. Un *transistor de conmutación* es controlable por ambos sentidos.

Las curvas características de estos componentes están representadas en la siguiente figura 3.2.

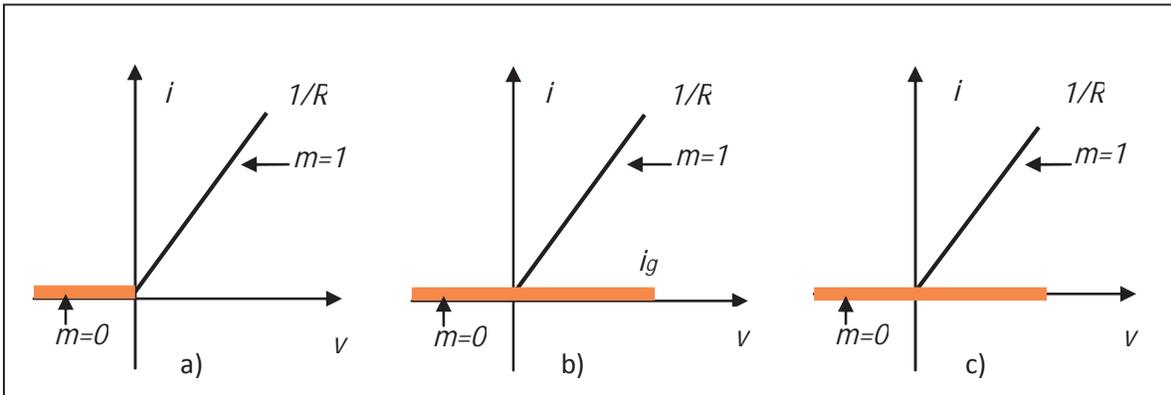


Figura 3.2 Curva característica. a) Diodo; b) Tiristor; c) Transistor.

Introducimos el parámetro Booleano m para representar el estado *ON* ($m=1$) y el estado *OFF* ($m=0$), con la lógica de conmutación para éstos swicheo dado la siguiente figura 3.3. La pendiente $1/R$ de la parte lineal es generalmente considerada como infinito, es usual, en orden de simplificar el estudio de los componentes para asumir los dispositivos a ser ideales.

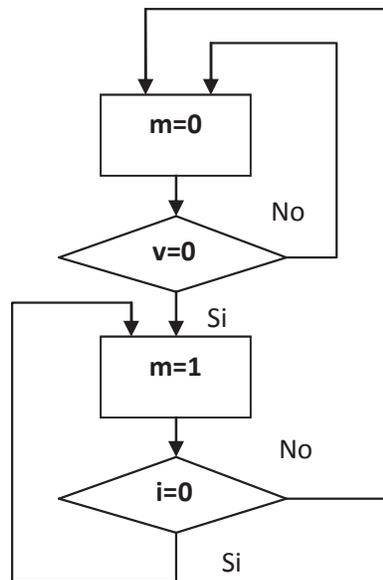


Figura 3.3 Lógica del Diodo.

3.2 Enfoque de Modelado en Bond Graph

Escogemos para modelar los switches en el alcance de BG por una asociación *MTF-R* (Castelain 1990). Nosotros hemos asociado un elemento *lineal-R* con una parte lógica modelada por un elemento *MTF*, el cual tiene un módulo booleano dependiendo del estado de switcheo del componente. El elemento *lineal-R* representa la resistencia cuando el componente esta en *ON*.

Idealmente el switcheo ocurre dentro de tiempos muy cortos con respecto a la escala del sistema. El problema es que el carácter esencialmente continuo de la representación matemática no es aceptable para modelado de este tipo de comportamiento. Un camino de tratar con este problema sería especificar un modelo único continuo para cada estado de los switches. Sin embargo, esto tiene la desventaja obvia de tener 2^n modelos separados, dado n switches binarios con enlaces entre ellos para asegurar el comportamiento propio del switcheo. Más aún, los switches son representados implícitamente.

3.2.1 Estructura Común del Diodo en Bond Graph

Una forma es considerar el *diodo* como un elemento *modulador-R*. Este elemento puede ser descompuesto en un *arreglo-R* representado tanto la conducción *no-ideal* y un *MTF* para modelar su comportamiento de switcheado el cual se muestra en la tabla 3.1.

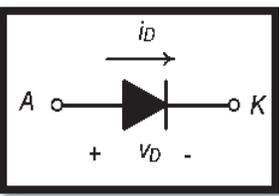
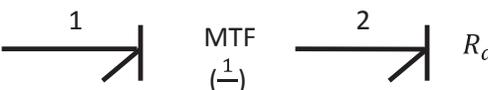
Diodo Ideal	Representacion del Diodo en Bond Graph	Ecuaciones
		$\begin{aligned} e_1 &= m e_2 \\ f_2 &= m f_1 \end{aligned} \quad (3.1)$
		$\begin{aligned} f_1 &= m f_2 \\ e_2 &= m e_1 \end{aligned} \quad (3.2)$

Tabla 3.1 Estructura del Diodo en Bond Graph.

3.2.2 Procedimiento-1 (Modelado de Sistemas Electrónicos)

- I. Dibujar una *unión-0*, para cada nodo en el circuito donde exista un esfuerzo distinto.
- II. Dibujar una *unión-1*, para elemento del *Puerto-1* (R , I , C , MSe , MSf), *Puerto-2* (MTF , MGY , TF , GY) la dirección de la semiflecha indica la dirección asumida del flujo de potencia de los elementos del *Puerto-1* y *Puerto-2*.
- III. Para circuitos sencillos se recomienda intercambiar el *bond* de posición la R_d por algún elemento del *Puerto-1* pasivo (C e I), debido a la trayectoria causal (TC).
- IV. Una vez determinado el punto de referencia del circuito por consiguiente se realiza la eliminación de los *bonds* que lo compone.

3.3 Modelado de un Circuito RC con Diodo

A continuación se emplea el **procedimiento-1** para un circuito de *diodo* con una carga RC en el cual se observa el comportamiento del interruptor que se muestra en la figura 3.4.

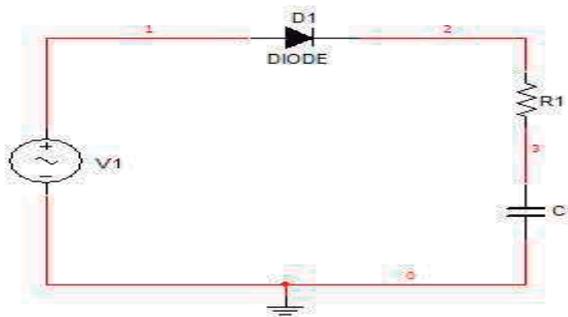


Figura 3.4 Circuito de diodo con carga RC.

Paso 1

- I. Identificar los nodos en el circuito como son: *unión-0*, *unión-1*, *Puertos-1*, dirección de la semiflecha indica el sentido del flujo como se muestra en la figura 3.5.

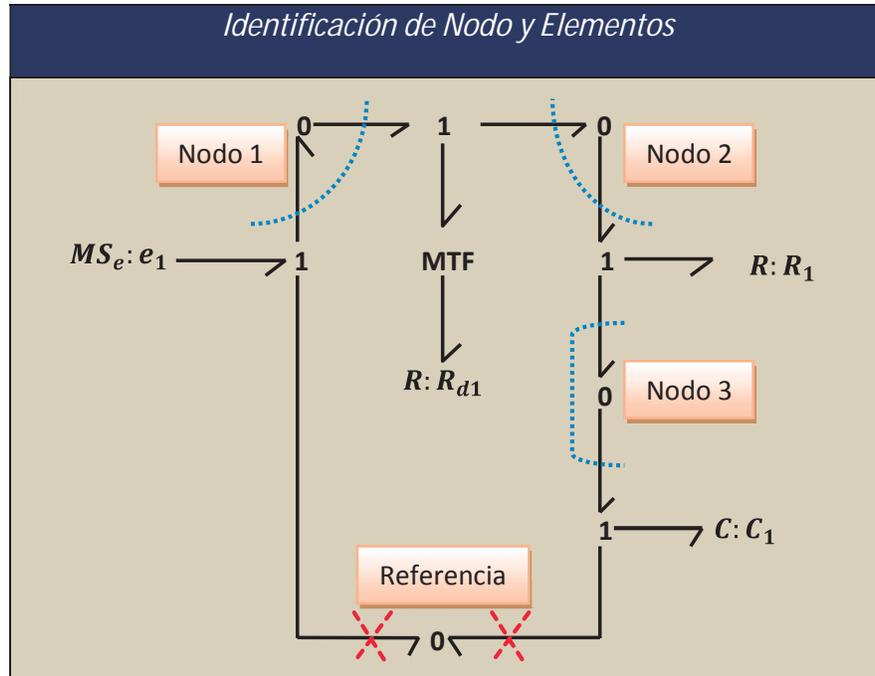


Figura 3.5 Procedimiento-1 en Bond Graph con cargas RC.

Paso 2

- I. Eliminación de la *unión-0*, que representa el punto de referencia.
- II. Aplicando la causalidad adecuada la cual se muestra en la Tabla 2.5, del capítulo anterior.

A continuación se derivan los vectores claves y ecuaciones del sistema dando como resultado el *modelado electrónico* en Bond Graph.

3.3.1 Obtención de las ecuaciones de estado en Bond Graph

Una vez obtenido el diagrama completo en Bond Graph, se descubren las ecuaciones de estado, existen sistemas de grandes dimensiones los cuales da una estructura dinámica y la generación, análisis y reducción de ecuaciones para un modelado adecuado.

3.3.2 Vectores Claves o Vectores Significativos

Todos los bonds pueden ser clasificados en *bonds externo*, que conectan a los *elementos* ó *puertos* R , C , I , MSe y MSf , y en *bonds internos* que

conectan a $0, 1, TF$ y GY . En la figura 3.6, el diagrama a bloques de la Estructura de Unión de un Bond Graph.

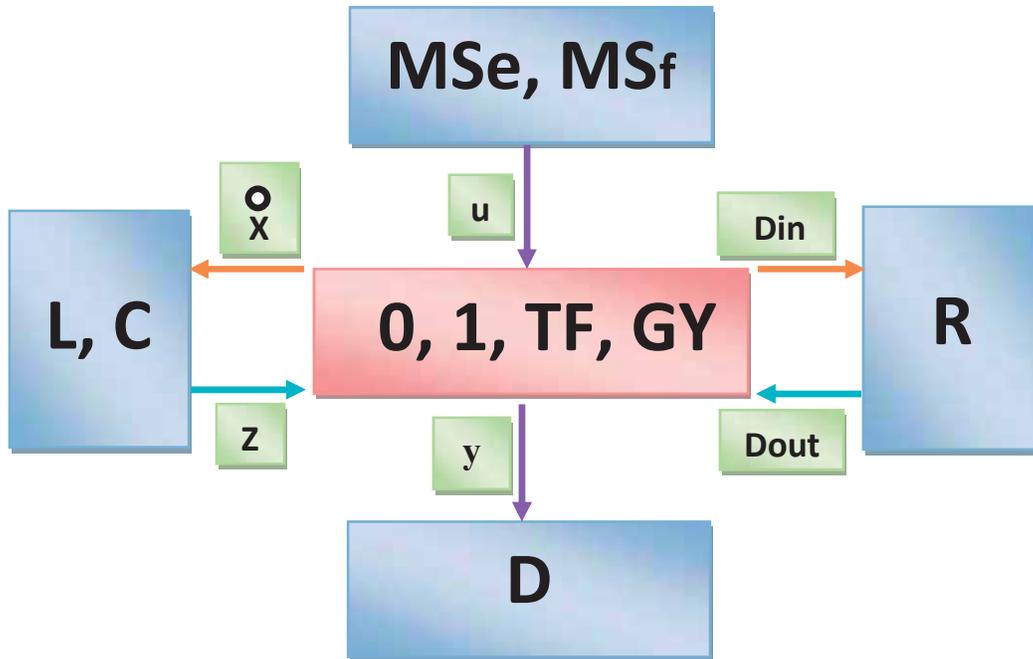


Figura 3.6 Diagrama a bloques de la Estructura de Unión de un BG.

donde, MSe, MSf es el campo de fuentes, L, C es el Campos de Almacenamiento, R es el campo de Disipación, D es el Detector (salida) y $0, 1, TF, GY$ es la Estructura de Unión.

3.3.3 Relaciones de Campo y Ecuación de Estado

Las relaciones de campo *no lineales* de la figura 3.6, de almacenamiento y disipación son:

$$z(t) = \Phi_F(t) \tag{3.3}$$

$$z_d(t) = \Phi_{Fd}(x_d) \tag{3.4}$$

$$D_{out}(t) = \Phi_L(D_{in}) \tag{3.5}$$

donde

Φ_F Denota una función que relaciona cada z_i con x_i para $i=1, \dots, n$.

Φ_{Fd} Denota una función que relaciona cada z_{di} con x_{di} para $i=1, \dots, m$.

Φ_L Denota una función que relaciona cada D_{out} con D_{in} para $i=1, \dots, r$.

Si las relaciones constitutivas son lineales tenemos:

$$z(t) = Fx(t) \quad (3.6)$$

$$z_d(t) = F_d x_d(t) \quad (3.7)$$

$$D_{out}(t) = LD_{in}(t) \quad (3.8)$$

$$z_d(t) = -S_{14}^T z(t) \quad (3.9)$$

donde, L , F y F_d son matrices reales de dimensión $(r \times r)$, $(n \times n)$ y $(m \times m)$, respectivamente, la relación de la estructura de unión están dadas por:

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ D_{in}(t) \\ y(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} & S_{14} \\ S_{21} & S_{22} & S_{23} & 0 \\ S_{31} & S_{32} & S_{33} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} z(t) \\ D_{out}(t) \\ u(t) \\ \dot{x}_d(t) \end{bmatrix} \quad (3.10)$$

La ecuación (3.10) es para casos cuando se tienen causalidades Integral y derivativa.

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ D_{in}(t) \\ y(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} \\ S_{21} & S_{22} & S_{23} \\ S_{31} & S_{32} & S_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} z(t) \\ D_{out}(t) \\ u(t) \end{bmatrix} \quad (3.11)$$

La ecuación (3.11) se muestra en el caso de causalidad Integral la cual reduce el número de ecuaciones del sistema.

Los valores de S toman un conjunto de $\{0, \pm 1, \pm n, \pm r\}$ donde n y r son los módulos del transformador y girador. La matriz S está particionada de acuerdo a la dimensión de sus vectores clave. Las submatrices S_{ij} tiene la siguiente propiedad:

- P1.- S_{11} y S_{22} son matrices cuadradas anti-simétricas.
- P2.- S_{12} es la matriz transpuesta negativa de S_{21} y viceversa.

Las propiedades *P1* y *P2* están basadas en el principio de conservación de energía.

Entonces el sistema puede representarse mediante la *ecuación diferencial de estados y ecuación de salida* como:

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{B}\mathbf{u} \quad (3.12)$$

$$\mathbf{y} = \mathbf{C}\mathbf{x} + \mathbf{D}\mathbf{u} \quad (3.13)$$

Lo cual al relacionar las ecuaciones (3.9), (3.10) con (3.12) y (3.13) obtenemos los coeficientes de **A**, **B**, **C**, **D** y **M** respectivamente de cada uno de ellos:

$$\mathbf{A}=(S_{11} + S_{12}MS_{21})F \quad (3.14)$$

$$\mathbf{B}=(S_{13} + S_{12}MS_{23}) \quad (3.15)$$

$$\mathbf{C}=(S_{31} + S_{32}MS_{21})F \quad (3.16)$$

$$\mathbf{D}=(S_{33} + S_{32}MS_{23}) \quad (3.17)$$

$$\mathbf{M} = L(I - LS_{22})^{-1} \quad (3.18)$$

donde, *I* es una matriz de identidad. A partir de las ecuaciones anteriores logramos obtener el modelado de los sistemas eléctricos, mecánicos e hidráulicos. Adquiriendo los dos principales conceptos del modelado de sistema como son:

- El Bond Graph.
- Variables en Espacio de Estado.

Gracias a estos parámetros logramos observar el comportamiento dinámico del sistema físico.

Paso 3

- I. Numerar cada uno de los *bonds* de enlace en el modelo
- II. Determinar: entradas $u(t)$ y/o salida $y(t)$.
- III. Completar la matriz D_{in} , con las variables de potencia que entran en los elementos de disipación (*Puerto-1*, Resistencia).

- IV. Obtener la matriz D_{out} con las variables de potencia que salen de los elementos de disipación (*Puerto-1*, Resistencia).
- V. Integrar la matriz $x(t)$, $\dot{x}(t)$ y $z(t)$ de los elementos de almacenamiento (*Puerto-1*, capacitores e inercia). Conforme a la siguiente tabla 3.2.

Elemento	$x(t)$	$\dot{x}(t)$	$z(t)$
I	$p(t)$	$e(t)$	$f(t)$
C	$q(t)$	$f(t)$	$e(t)$

Tabla 3.2 Integración de elementos de la matriz $x(t)$, $\dot{x}(t)$ y $z(t)$.

- VI. Comprobar las propiedades $P1$ y $P2$, de lo contrario no cumple con el principio de conservación de la energía.
- VII. Obtención de las matrices L , F y M .

donde,

$$L = \text{diag} \left\{ \frac{1}{R_n}, R_n \right\} \tag{3.19}$$

$$F = \text{diag} \left\{ \frac{1}{C_n}, \frac{1}{I_n} \right\} \tag{3.20}$$

La matriz L es la base al esfuerzo y flujo, se sustituyen las variables en la diagonal.

$$e_n = R_n \quad , \quad f_n = \frac{1}{R_n} \tag{3.21}$$

- VIII. En conclusión se obtienen las matrices de **A**, **B**, **C** y **D**. usando las ecuaciones correspondientes.

Se procede al modelado del sistema de la figura 3.4, para determinar su estado dinámico y comportamiento del *diodo*. Finalmente obtenemos el *bond Graph* que rige al sistema como se muestra en la figura 3.7.

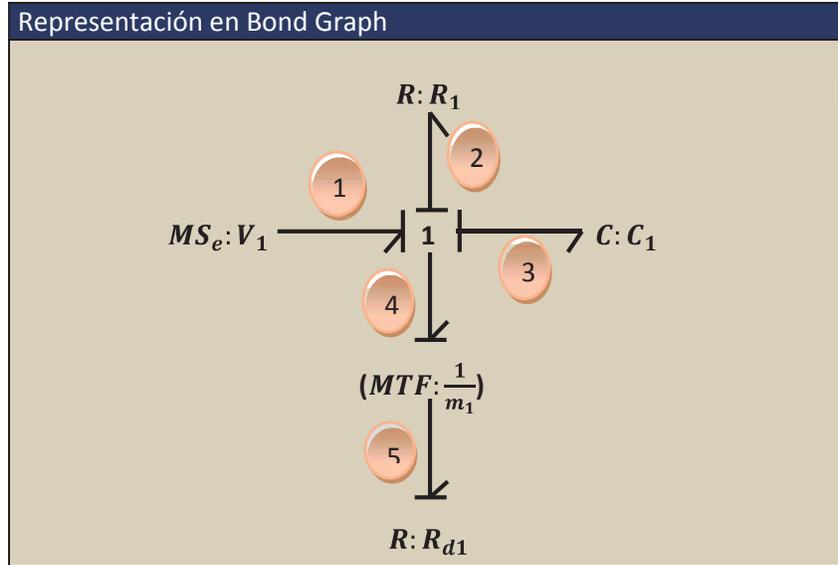


Figura 3.7 Modelos en Bond Graph con carga RC.

Se asignan las variables de entrada $u(t) = e_1$ y como salida del sistema $y(t) = \begin{bmatrix} e_5 \\ f_5 \end{bmatrix}$, lo cuál corresponden al esfuerzo y flujo del *diodo de la resistencia interna*, los subíndices indican de qué enlace del *bonds* se considera el análisis.

Partiendo de lo anterior complementamos las matrices D_{in} determinado a partir de la figura 3.7, se observa los flujos f_2 y esfuerzo e_5 entran hacia los elementos Resistivos R_1 y R_d y D_{out} , son los elementos que oponen. Por lo tanto, obtenemos las matrices correspondientes:

$$D_{in} = \begin{bmatrix} f_2 \\ e_5 \end{bmatrix}, \quad D_{out} = \begin{bmatrix} e_2 \\ f_5 \end{bmatrix}$$

Por consiguiente se procede a llenar las matrices correspondientes a $x(t)$, $\dot{x}(t)$ y $z(t)$ conforme a la información proporcionada en la tabla 3.1, para los elementos de almacenamiento del *Puerto-1* (Capacitores y/o Inercia), los vectores quedan de la siguiente manera:

$$x = [q_3], \quad \dot{x} = [f_3], \quad z = [e_3]$$

Partiendo de las ecuación (3.11) se sustituyen los parámetros adecuados obtenemos la siguiente matriz.

$$\begin{bmatrix} f_3 \\ f_2 \\ e_5 \\ e_5 \\ f_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & m_1 & 0 \\ 0 & 0 & m_1 & 0 \\ -m_1 & -m_1 & 0 & m_1 \\ -m_1 & -m_1 & 0 & m_1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e_3 \\ e_2 \\ f_5 \\ e_1 \end{bmatrix}$$

Una vez llenado la matriz se comprueba las propiedades $P1, P2$.

Determinamos la Matriz de la ecuacion (3.8) a traves de L , de las ecuacion (3.19), correspondiente a la diagonal de los elementos de Campo de Disipacion, tomando en cuenta la informacion de las ecuacion (3.21), asi como de las tablas (2.5) del capítulo anterior.

Para el Vector F , de la ecuacion (3.6) corresponde a una matriz diagonal de los elementos de Almacenamiento (C, l) correspondiente a la ecuación (3.20).

$$D_{out} = LD_{in} \qquad Z = Fx$$

$$\begin{bmatrix} e_2 \\ f_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_1 & 0 \\ 0 & \frac{1}{R_{d1}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_2 \\ e_5 \end{bmatrix} \qquad [e_3] = \begin{bmatrix} 1 \\ c_1 \end{bmatrix} [q_3]$$

Por último se procede al cálculo de las matrices **A**, **B**, **C**, **D** y **M** de las ecs. (3.14) a la (3.18).

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

$$M = \left(\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 0 & m_1 \\ -m_1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R_1 & 0 \\ 0 & \frac{1}{R_{d1}} \end{bmatrix} \right)^{-1} \left(\begin{bmatrix} R_1 & 0 \\ 0 & \frac{1}{R_{d1}} \end{bmatrix} \right)$$

$$M = \begin{bmatrix} \frac{R_{d1}R_1}{R_{d1} + m_1^2R_1} & \frac{m_1}{R_{d1}(R_{d1} + m_1^2R_1)} \\ \frac{-m_1R_{d1}R_1^2}{R_{d1} + m_1^2R_1} & \frac{1}{R_{d1} + m_1^2R_1} \end{bmatrix}$$

$$A = (S_{11} + S_{12}MS_{21})F$$

$$\mathbf{A} = \left(\begin{array}{c} [0] + [0 \quad m_1] \left[\begin{array}{cc} \frac{R_{d1}R_1}{R_{d1} + m_1^2R_1} & \frac{m_1}{R_{d1}(R_{d1} + m_1^2R_1)} \\ -\frac{m_1R_{d1}R_1^2}{R_{d1} + m_1^2R_1} & \frac{1}{R_{d1} + m_1^2R_1} \end{array} \right] \begin{bmatrix} 0 \\ -m_1 \end{bmatrix} \end{array} \right) \left(\frac{1}{C_1} \right)$$

$$\mathbf{A} = \left[\begin{array}{c} -m_1^2 \\ C_1(R_{d1} + m_1^2R_1) \end{array} \right]$$

$$\mathbf{B} = (S_{13} + S_{12}MS_{23})$$

$$\mathbf{B} = \left(\begin{array}{c} [0] + [0 \quad m_1] \left[\begin{array}{cc} \frac{R_{d1}R_1}{R_{d1} + m_1^2R_1} & \frac{m_1}{R_{d1}(R_{d1} + m_1^2R_1)} \\ -\frac{m_1R_{d1}R_1^2}{R_{d1} + m_1^2R_1} & \frac{1}{R_{d1} + m_1^2R_1} \end{array} \right] \begin{bmatrix} 0 \\ m_1 \end{bmatrix} \end{array} \right)$$

$$\mathbf{B} = \left[\begin{array}{c} m_1^2 \\ (R_{d1} + m_1^2R_1) \end{array} \right]$$

$$\mathbf{C} = (S_{31} + S_{32}MS_{21})F$$

$$\mathbf{C} = \left(\begin{array}{c} \begin{bmatrix} -m_1 \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -m_1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \left[\begin{array}{cc} \frac{R_{d1}R_1}{R_{d1} + m_1^2R_1} & \frac{m_1}{R_{d1}(R_{d1} + m_1^2R_1)} \\ -\frac{m_1R_{d1}R_1^2}{R_{d1} + m_1^2R_1} & \frac{1}{R_{d1} + m_1^2R_1} \end{array} \right] \begin{bmatrix} 0 \\ -m_1 \end{bmatrix} \end{array} \right) \left[\begin{array}{c} 1 \\ C_1 \end{array} \right]$$

$$\mathbf{C} = \left[\begin{array}{c} \left(-m_1 + \frac{m_1^3}{R_{d1}(R_{d1} + m_1^2R_1)} \right) \left(\frac{1}{C_1} \right) \\ \frac{-m_1}{(R_{d1} + m_1^2R_1)} \left(\frac{1}{C_1} \right) \end{array} \right]$$

$$\mathbf{D} = (S_{33} + S_{32}MS_{23})$$

$$\mathbf{D} = \left(\begin{array}{c} \begin{bmatrix} m_1 \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -m_1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \left[\begin{array}{cc} \frac{R_{d1}R_1}{R_{d1} + m_1^2R_1} & \frac{m_1}{R_{d1}(R_{d1} + m_1^2R_1)} \\ -\frac{m_1R_{d1}R_1^2}{R_{d1} + m_1^2R_1} & \frac{1}{R_{d1} + m_1^2R_1} \end{array} \right] \begin{bmatrix} 0 \\ m_1 \end{bmatrix} \end{array} \right)$$

$$\mathbf{D} = \left[\begin{array}{c} \left(m_1 + \frac{-m_1^3}{R_{d1}(R_{d1} + m_1^2R_1)} \right) \\ \frac{m_1}{(R_{d1} + m_1^2R_1)} \end{array} \right]$$

Una vez obtenido los coeficientes de **A**, **B**, **C** y **D** del sistema de conmutación electrónico, se sustituyen en la ecuación de estado (3.12).

$$\dot{x} = Ax + Bu$$

$$[f_3] = \left[\frac{-m_1^2}{C_1(R_{d1} + m_1^2 R_1)} \right] [q_3] + \left[\frac{m_1^2}{(R_{d1} + m_1^2 R_1)} \right] [e_1]$$

La ecuación de salida (3.13) contemplan el esfuerzo y flujo que circula a través de R_d , dado que es parte del modelado del *diodo*, observamos el comportamiento del sistema.

$$y = Cx + Du$$

$$\begin{bmatrix} e_5 \\ f_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \left(-m_1 + \frac{m_1^3}{R_{d1}(R_{d1} + m_1^2 R_1)} \right) \left(\frac{1}{C_1} \right) \\ \frac{-m_1}{(R_{d1} + m_1^2 R_1)} \left(\frac{1}{C_1} \right) \end{bmatrix} [q_3] + \begin{bmatrix} \left(m_1 + \frac{-m_1^3}{R_{d1}(R_{d1} + m_1^2 R_1)} \right) \\ \frac{m_1}{(R_{d1} + m_1^2 R_1)} \end{bmatrix} [e_1]$$

Una vez obtenido las ecuaciones de entrada $u(t)$, salida $y(t)$, del modelado matemático en BG, se procede a la simulación del sistema, a través de dos software Simnon y 20-sim, para observar el comportamiento del circuito de conmutación con carga RC.

3.3.4 Simulación en Simnon de un Circuito RC con Diodo

Simnon es un software que a partir de las ecuaciones diferenciales obtenidas a través de las variables de estado y salida se logra realizar la simulación de los estados dinámico.

El circuito 3.4 consta de una carga RC, lo cual implica el flujo a través de la resistencia y el capacitor tiene la capacidad de almacenar energía en forma de campo eléctrico debido al esfuerzo entre sus dos terminales a consecuencia de esta propiedad el flujo que circula a través de él es proporcional a la derivada de la tensión entre sus terminales

El interruptor se activa y desactiva dependiendo de la polarización en la que se encuentre el *diodo* es decir, PD o PI, además la carga aplicada tendrá un gran impacto en la región de operación del dispositivo como muestra en la figura 3.8.

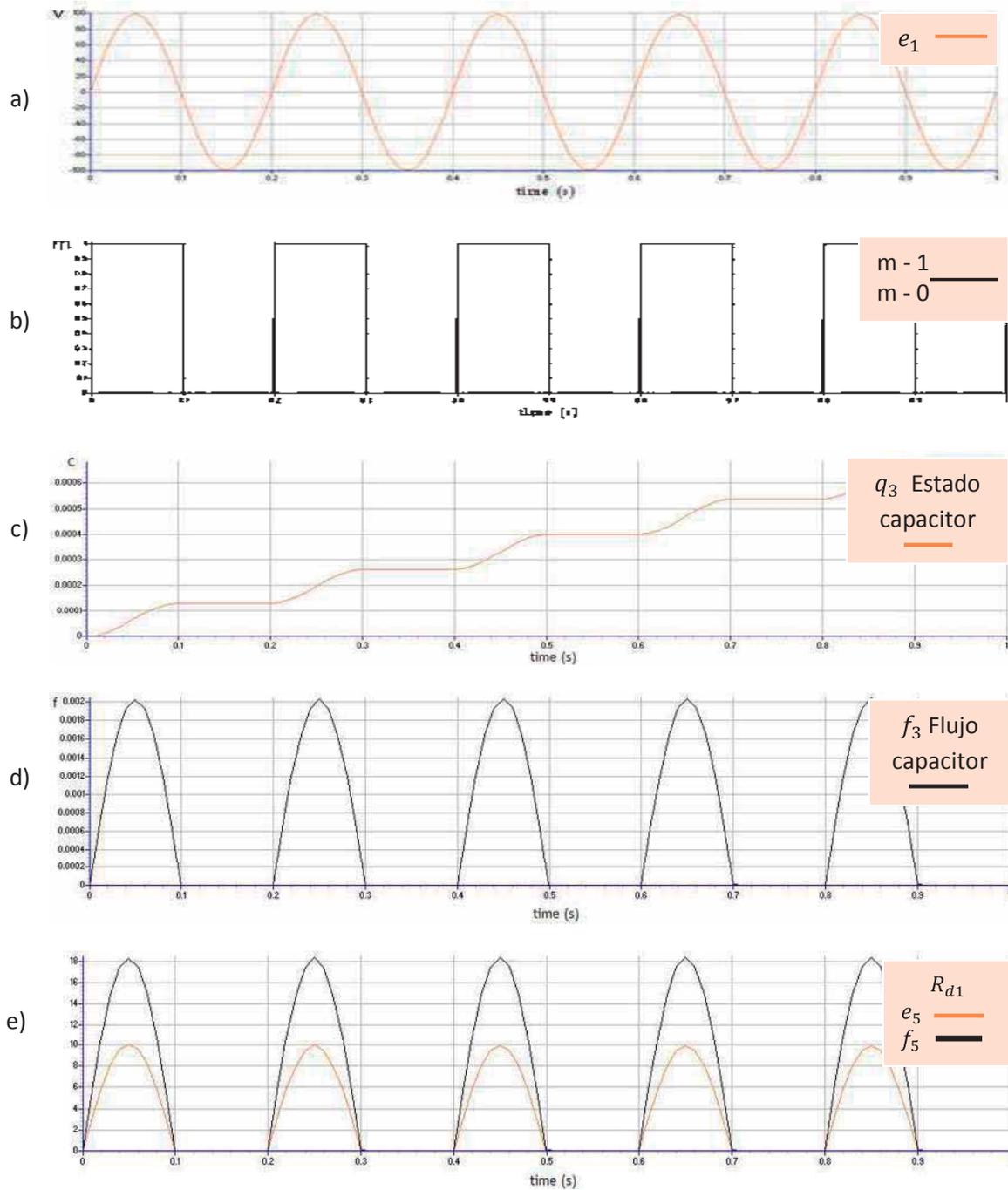


Figura 3.8 Diodo con Carga RC en Simnon. a) Señal de entrada; b) Estado ON-OFF; c) Carga y descarga del estado del capacitor q_3 ; d) Flujo a través del capacitor f_3 ; e) Esfuerzo e_5 y Flujo f_5 en la Resistencia interna del diodo R_{d1} .

En la figura 3.8a, se aplica una señal de entrada senoidal pura, la cual en la parte positiva de la señal el diodo se comporta como un corto-circuito y en la parte negativa como un circuito abierto.

El estado m (lógica del diodo) determinara cuando se active $m=1$, el interruptor y se desactive $m=0$, como se muestra en la figura 3.8b. Por el momento se ignora el material del *diodo* del cual esta compuesto de *silicio* ($V_V = 0.3$), *germanio* ($V_V = 0.7$) se contemplara en el capítulo siguiente.

Estos resultados tienen una fácil interpretación física. El voltaje en terminales del condensador es proporcional a su carga. A partir de un estado $m=1$ (*activado*), habrá una caída de tensión en R_1 y un flujo f_3 , que empezará a cargar al condensador, a medida que se cargue aumentara el esfuerzo, la caída de tensión en la resistencia lo cual disminuirá cuando el estado este en $m=0$ (*desactivado*) y, por tanto, también reducirá el flujo, pero aunque se reduzca, este flujo seguirá cargando al condensador e incrementando, observe la figura 3.8c y 3.8d.

La Resistencia interna del *diodo* R_{d1} , de la figura 3.8e, son rectificadas tanto el esfuerzo y flujo cuando se activa y desactiva el interruptor dejando pasar el ciclo positivo de la señal y cortando el negativo de la señal de entrada.

3.3.5 Simulación en 20-sim de un Circuito RC con diodo

20-sim es un software que a partir de Bond Graph se obtiene la representación grafica del estado dinámico del sistema, teniendo una gran ventaja con respecto a otros, tomando en cuenta el cálculo matemático se reduce completamente. Sin embargo, ha mostrado una gran eficiencia para el diseño de sistemas, simulación y determinación de las leyes de control para la construcción de los modelos.

Una vez obtenido el BG de la figura 3.4, mostrado en la figura 3.7. Se representa en 20-sim observe la figura 3.9.

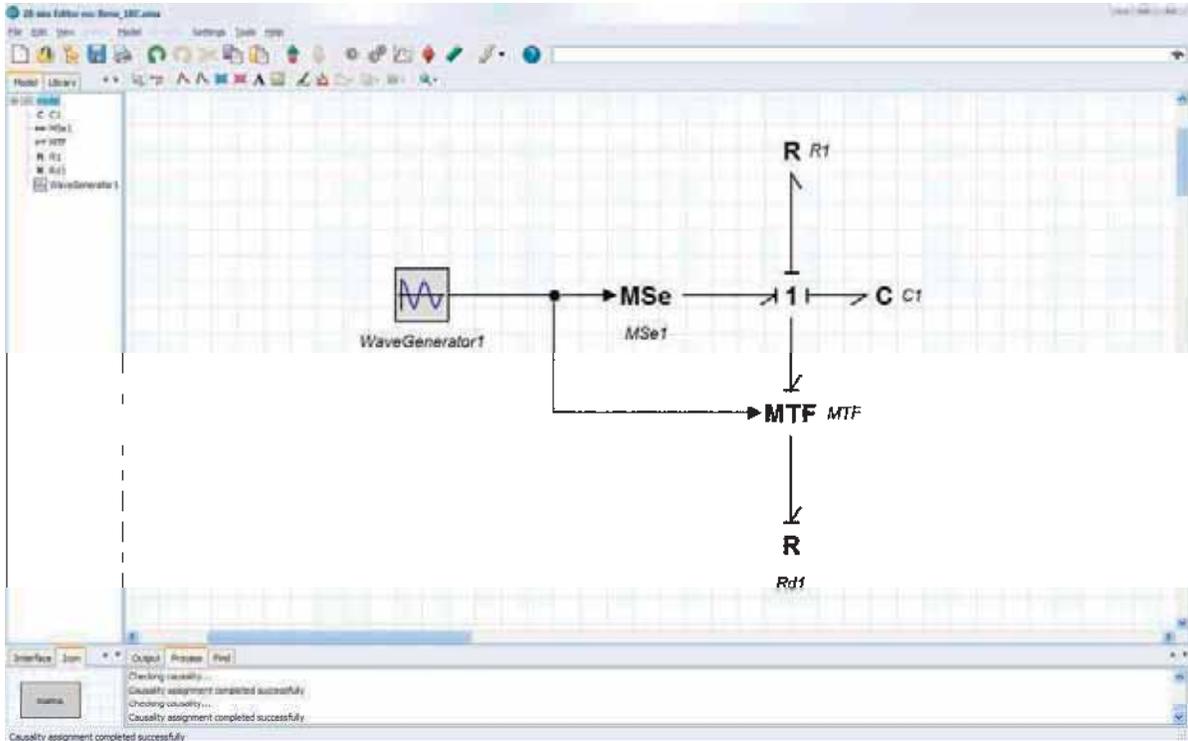


Figura 3.9 Representación en BG con carga RC.

En la figura anterior se agrega un *bond activo*, se representa mediante una flecha indica la causalidad del *MTF*. Perciba el esquema de la tabla 3.3.

	$P1.e = m.P2.e$ $P2.f = m.P1.f$
	$P2.e = \frac{1}{m} P1.e$ $P1.f = \frac{1}{m} P2.f$

Tabla 3.3 Causalidad MTF.

La causalidad del *MTF* correspondiente al Modelado del *diodo*, gracias a esto se obtiene la representación gráfica del BG de la figura 3.10.

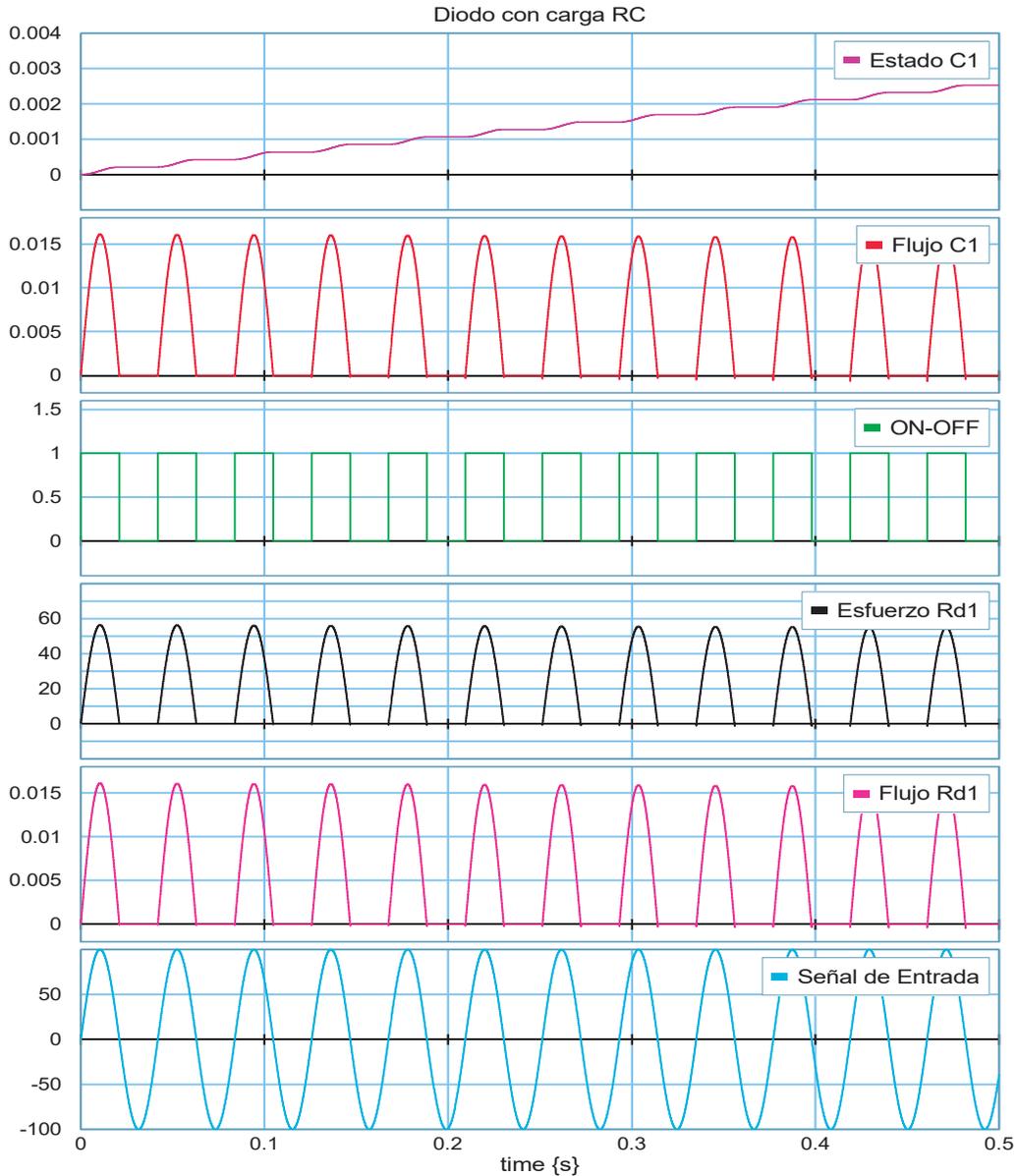


Figura 3.10 Modelado del Diodo con Carga RC en 20-sim.

De la misma manera se hace el análisis para colaborar los datos que se obtuvieron en Simnon, el flujo que existe en el modelado del diodo es la misma a diferencia del esfuerzo debido a que existe una caída de voltaje a través de la carga, los componentes se encuentran en serie con la fuente de alimentación MS_e . Llamado también rectificador de media onda, generando un proceso de conversión de AC a DC.

3.4 Modelado de un circuito RL con Diodo

Tomando en cuenta el **procedimiento-1**, se analiza el siguiente circuito mostrado en la figura 3.11, con una carga RL.

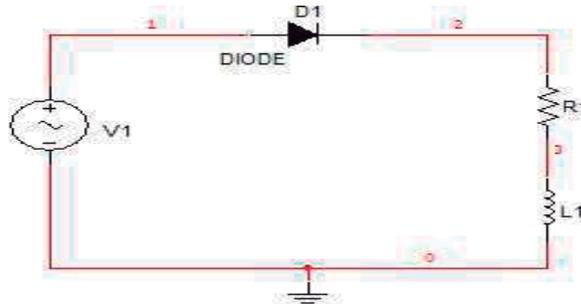


Figura 3.11 Circuito de diodo con carga RL.

Localizando las *uniones* (0,1), *Puertos-1*, *Puerto-2* y dirección del flujo el cual nos indica que parte de la fuente hacia los elementos observe la figura 3.12.

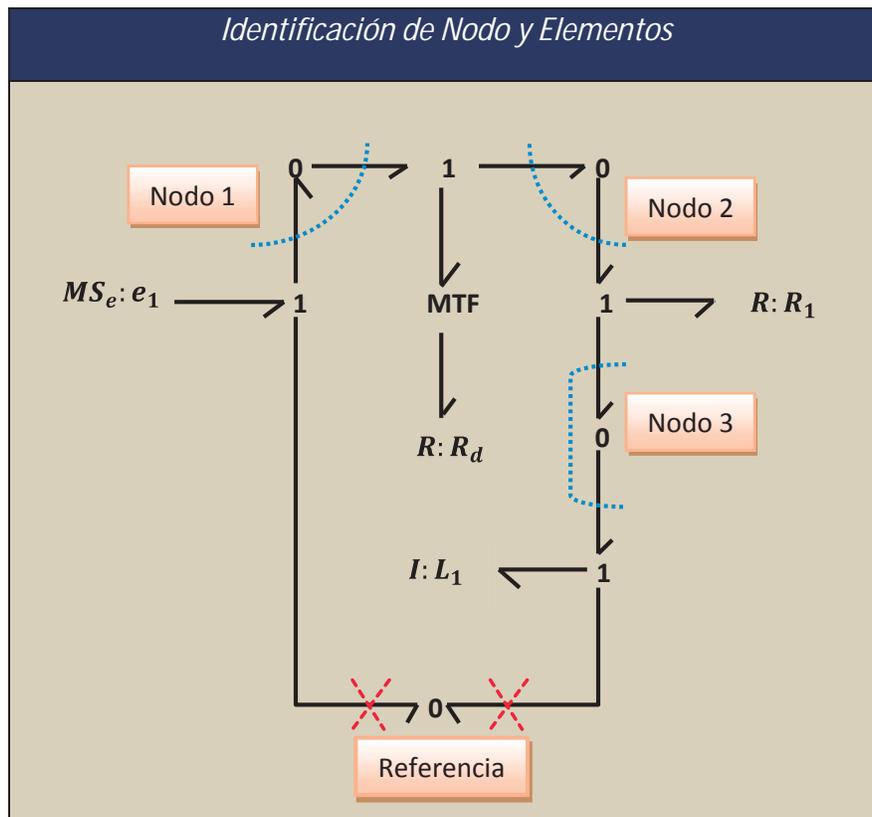


Figura 3.12 Procedimiento-1 en BG con carga RL.

Una vez reducido el modelado del circuito de diodo con carga RL, obtenemos el Bond Graph del sistema dinámico, numerando cada uno de los *bonds*. Observe el modelo de la figura 3.13.

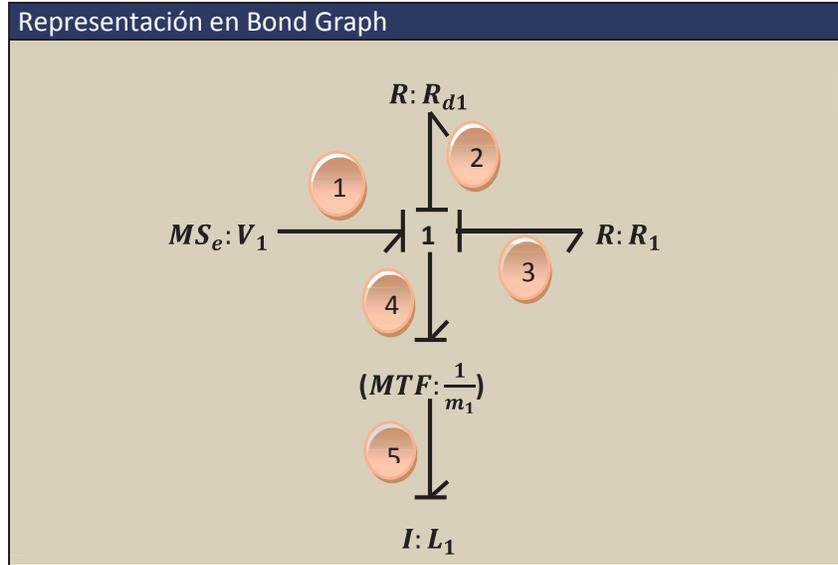


Figura 3.13 Modelado en Bond Graph con carga RL.

Determinamos la variable de entrada $u(t) = e_1$ y salida $y = \begin{bmatrix} e_2 \\ f_2 \end{bmatrix}$, correspondiente al esfuerzo y flujo del *diodo de la resistencia interna*. Así como de los vectores D_{in} y D_{out} , lo cual obtenemos:

$$D_{in} = \begin{bmatrix} f_2 \\ f_3 \end{bmatrix}, \quad D_{out} = \begin{bmatrix} e_2 \\ e_3 \end{bmatrix}$$

Establecemos las matrices $x(t)$, $\dot{x}(t)$ y $z(t)$ conforme a la tabla 3.2, para el puerto-1 (pasivo).

$$x = [P_5] \quad \dot{x} = [e_5] \quad z = [f_5]$$

Obtenemos la matriz de estructura de unión.

$$\begin{bmatrix} e_5 \\ f_2 \\ f_3 \\ e_2 \\ f_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -m_1 & -m_1 & m_1 \\ m_1 & 0 & 0 & 0 \\ m_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ m_1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_5 \\ e_2 \\ e_3 \\ e_1 \end{bmatrix}$$

Aplicando las propiedades $P1$, $P2$ determinara si la matriz conservan el principio de conservación de la energía, establecemos la ecs. (3.6) y (3.8) el vector L , F correspondiente a la diagonal de disipación, almacenamiento tomando en cuenta la información de las ecs. (3.20) y (3.21).

$$D_{out}=LD_{in} \qquad Z = Fx$$

$$\begin{bmatrix} e_2 \\ e_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_{d1} & 0 \\ 0 & R_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_2 \\ f_3 \end{bmatrix} \qquad [e_5] = \begin{bmatrix} 1 \\ L_1 \end{bmatrix} [P_5]$$

De igual manera se calculan los vectores **A**, **B**, **C**, **D** y **M** de las ecs. (3.14) a (3.18).

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

$$M = \left(\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R_{d1} & 0 \\ 0 & R_1 \end{bmatrix} \right)^{-1} \left(\begin{bmatrix} R_{d1} & 0 \\ 0 & R_1 \end{bmatrix} \right)$$

$$M = \begin{bmatrix} R_d & 0 \\ 0 & R_1 \end{bmatrix}$$

En este caso el vector **M** es igual al vector **L** considerando que la matriz $S_{22} = 0$.

$$A = (S_{11} + S_{12}MS_{21})F$$

$$A = \left([0] + [-m_1 \quad -m_1] \begin{bmatrix} R_{d1} & 0 \\ 0 & R_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} m_1 \\ m_1 \end{bmatrix} \right) \begin{bmatrix} 1 \\ L_1 \end{bmatrix}$$

$$A = \begin{bmatrix} -m_1^2 \\ L_1 (R_{d1} + R_1) \end{bmatrix}$$

$$B = (S_{13} + S_{12}MS_{23})$$

$$B = \left([m_1] + [-m_1 \quad -m_1] \begin{bmatrix} R_{d1} & 0 \\ 0 & R_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} \right)$$

$$B = [m_1]$$

$$C = (S_{31} + S_{32}MS_{21})F$$

$$C = \left(\begin{bmatrix} 0 \\ m_1 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R_{d1} & 0 \\ 0 & R_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} m_1 \\ m_1 \end{bmatrix} \right) \begin{bmatrix} 1 \\ L_1 \end{bmatrix}$$

$$C = \begin{bmatrix} \frac{R_{d1}m_1}{L_1} \\ \frac{m_1}{L_1} \end{bmatrix}$$

$$D = (S_{33} + S_{32}MS_{23})$$

$$D = \left(\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R_{d1} & 0 \\ 0 & R_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} \right)$$

$$D = [0]$$

Se sustituyen los coeficientes de **A**, **B**, **C** y **D** del sistema de conmutación en la ecuación de estado (3.12).

$$\dot{x} = Ax + Bu$$

$$[e_5] = \left[\frac{-m_1^2}{L_1} (R_{d1} + R_1) \right] [P_5] + [m_1][e_1]$$

La ecuación de salida (3.13) examinan el esfuerzo y flujo que circula a través de R_d , del *diodo*, estudiando la pausa del sistema dinámico.

$$y = Cx + Du$$

$$\begin{bmatrix} e_2 \\ f_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{R_{d1}m_1}{L_1} \\ \frac{m_1}{L_1} \end{bmatrix} [P_5] + [0][e_1]$$

De igual manera obtenemos las ecuaciones de entrada $u(t)$, salida $y(t)$, del modelado matemático en BG, se deriva a la simulación correspondiente en los dos software Simnon y 20-sim, del circuito de conmutación con carga RL.

3.4.1 Simulación en Simnon de un Circuito RL con Diodo

El circuito de la figura 3.11, con un carga RL la cual, la resistencia impide el paso de flujo entre mayor sea el valor de la resistencia, en cambio la inercia tiene la propiedad de almacenar energía mediante la creación de un campo magnético, cuando circula un flujo a través de ella.

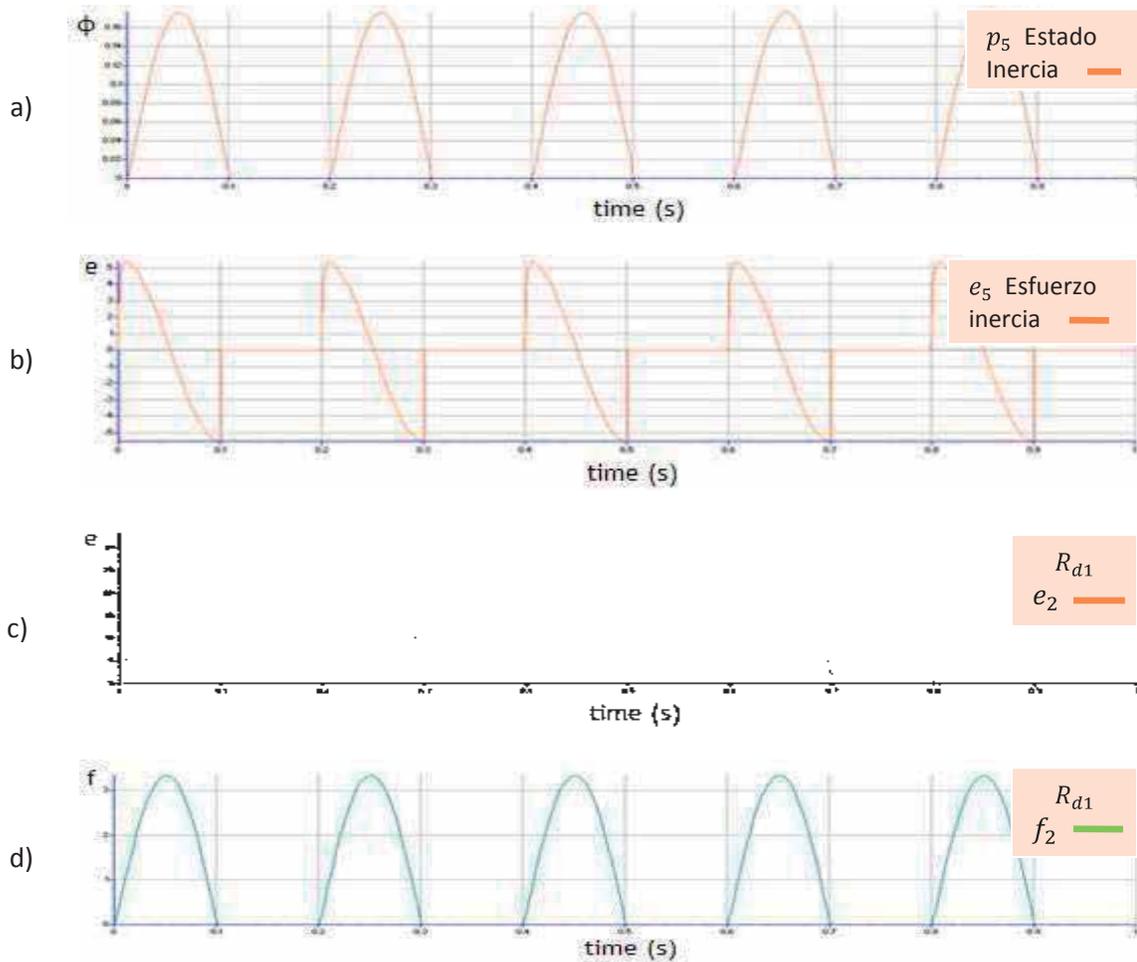


Figura 3.14 Diodo con Carga RL en Simnon. a) Estado de inercia p_5 ; b) Esfuerzo a través de la Inercia e_5 ; c) Esfuerzo de la resistencia interna del diodo e_2 , d) Flujo de la resistencia interna del diodo f_2 .

Al activar el interruptor se genera una tensión que circula a través de R_1 el cual intentara hacer circular un flujo por el circuito, dado que el estado q_5 de la figura 3.14a, impide un cambio discontinuo del flujo. La inercia genera una tensión del valor adecuado MS_e , asegurando la continuidad del flujo y eliminado el flujo que circula a través de R_1 . Debido a que la corriente en la inercia no puede variar de forma discontinua. En efecto, si lo hiciera su derivada seria infinita observe la figura 3.14b.

Respecto a la R_{d1} , del diodo rectifica la señal adecuadamente circulado en el estado $m=1$, referente al esfuerzo e_2 , y flujo f_2 , que circula a través de ella con un valor diez veces que la del esfuerzo como se muestra en la figura 3.14c y 3.14d.

3.4.2 Simulación en 20-sim de un Circuito RL con Diodo

Tomando en consideración la causalidad correspondiente de la tabla 3.3, se realiza en modelado en BG correcto del sistema para observar su estado dinámico del circuito de la figura 3.11, como se muestra en la imagen 3.15.

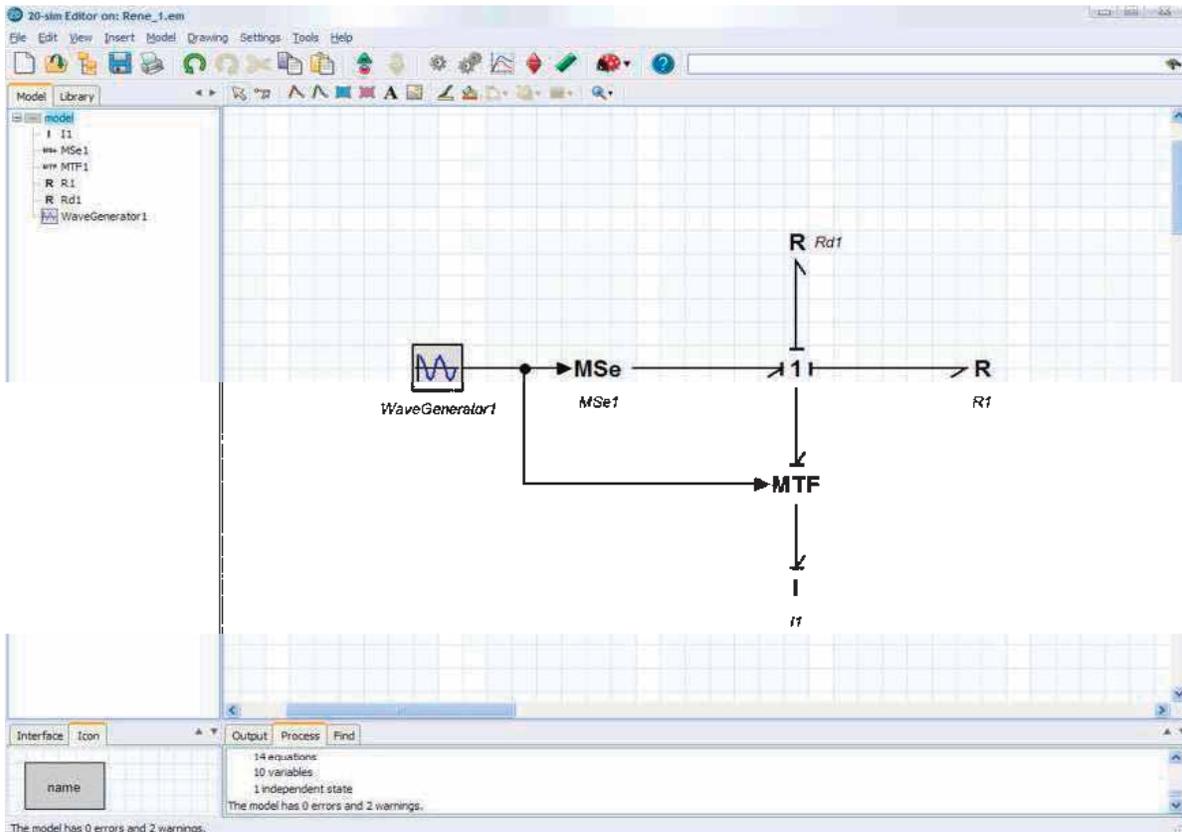


Figura 3.15 Representación en BG con carga RL.

Partiendo del modelado en BG obtenemos la representación gráfica del estado dinámico de inercia, observando el comportamiento de cada una de las variables obtenidas y comparándolas nuevamente con el software Simnon.

Perciba en la figura 3.16, las variables de estado son las mismas que las que se obtuvieron en Simnon por lo tanto el sistema electrónico es el adecuado para obtener el modelado más sencillo y oportuno, mostrando de nuevamente la eficiencia y potencial para el análisis en cualquier sistema físico.

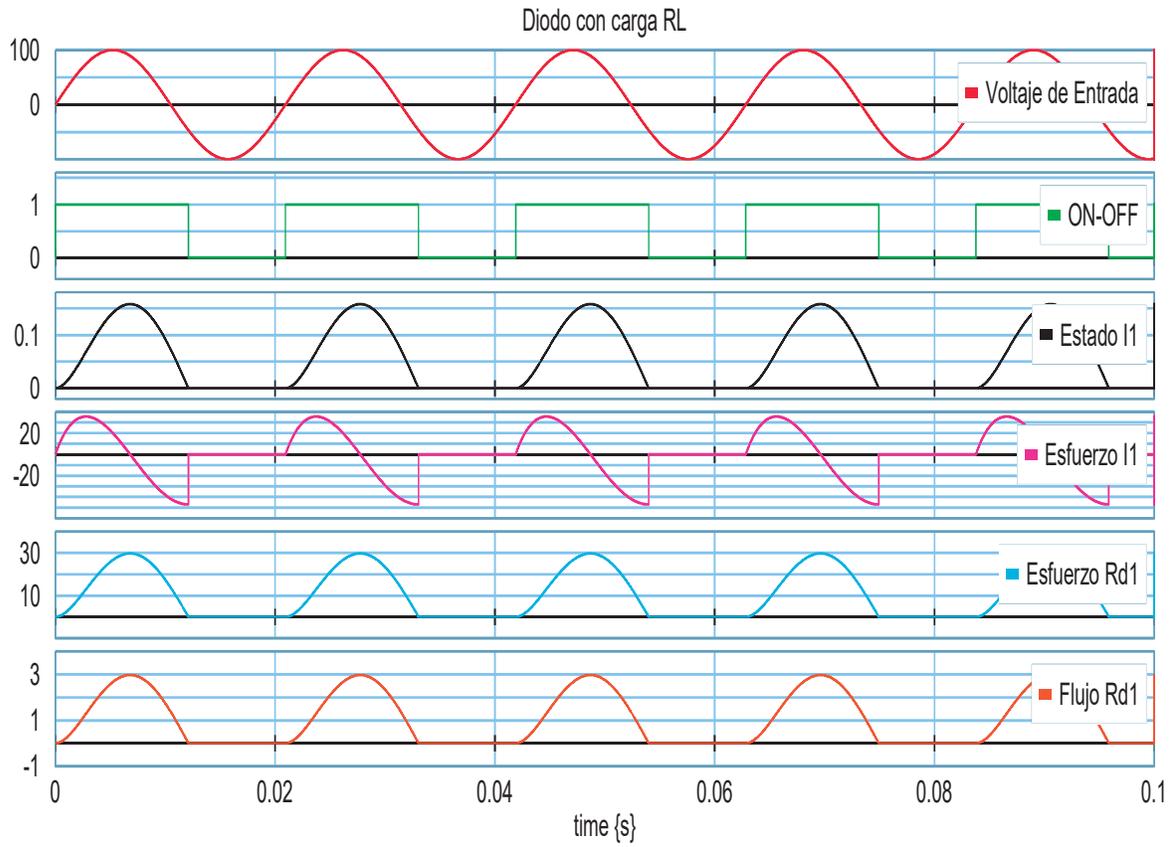


Figura 3.16 Modelado del Diodo con Carga RL en 20-sim.

Se obtienen las mismas graficas propios al estado P_5 de inercia, esfuerzo e_5 que circula a través del mismo, agregando el estado de activación y/o desactivación del interruptor (*ON-OFF*), analizando el esfuerzo e_{Rd1} y flujo f_{Rd1} , son rectificadas ambas a través de la señal de entrada senoidal.

3.5 Modelado de un Circuito con más de un Diodo Caso – I

En el siguiente circuito de la figura 3.17, se examina el comportamiento de dos diodos, es interesante observar, el estado que sufre cada uno de estos interruptores cuando el D_1 , se encuentra polarizado inversamente respecto al D_2 , que esta en polarización directa aplicando en cada un de los D_1 y D_2 , una carga RL, que se encuentran el paralelo con la fuente de alimentación.

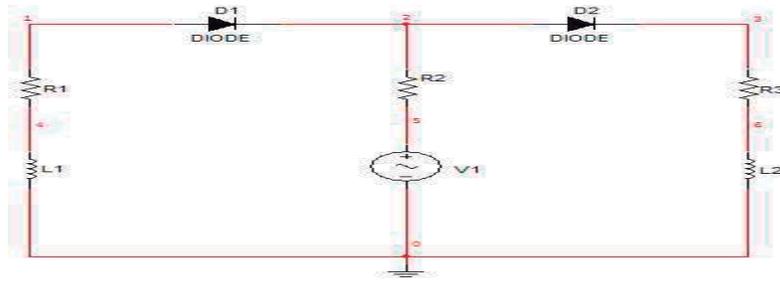


Figura 3.17 Diodo caso-I con carga RL.

Ampliando el panorama de los circuitos de conmutación se extiende el funcionamiento cuando se cuenta con más de un diodo, el objetivo es analizar la forma de iterar de cada uno de ellos cuando son activados y desactivados los interruptores, como se muestra en la figura 3.17. En este caso el D_2 , se comporta como un corto-circuito mientras que el D_1 , es un circuito abierto y recíprocamente.

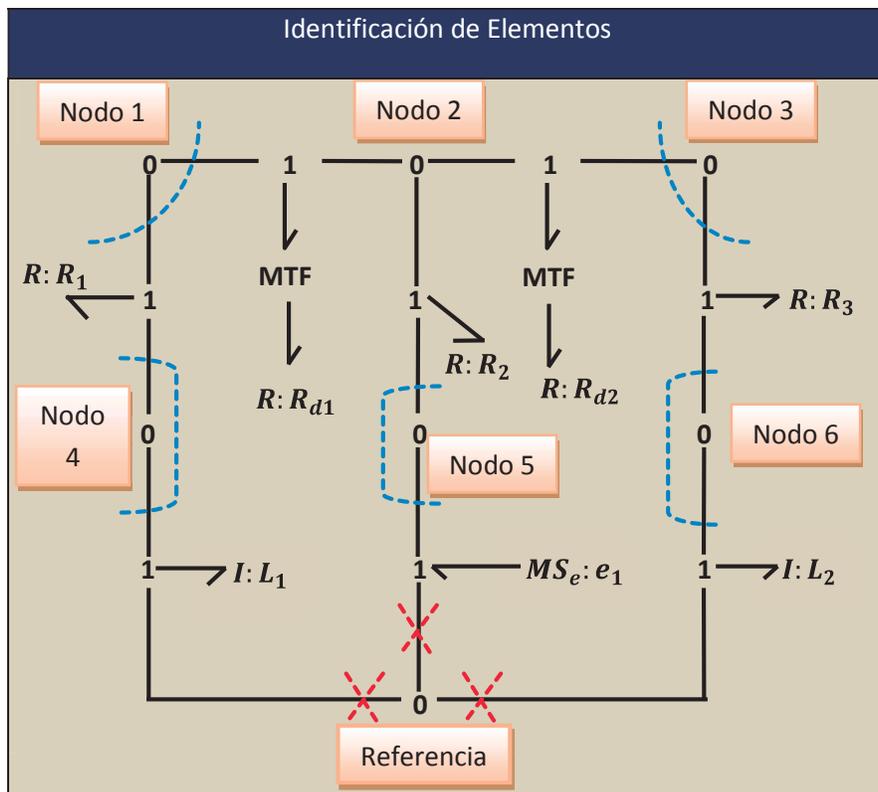


Figura 3.18 Caso – I, en BG.

Primordialmente se reduce el circuito en base al **procedimiento-1**, ubicando los *Puertos, uniones* (0,1), y dirección del flujo como se muestra en la figura 3.18, de la misma manera que los ejemplos anteriores.

De igual modo se enumeran los bonds para obtener las variables de estado dinámico del sistema como se muestra en la figura 3.19.

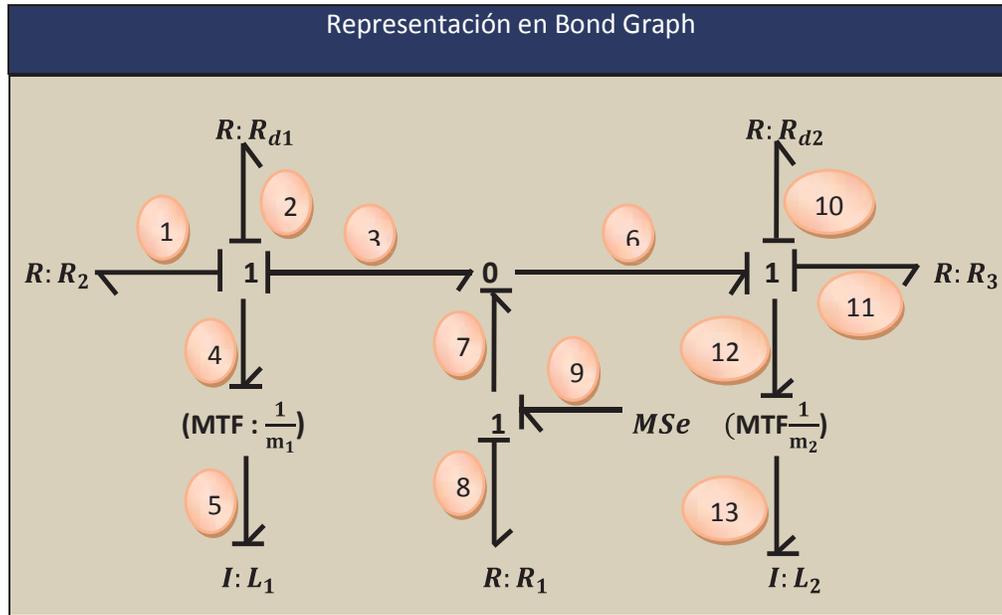


Figura 3.19 Modelado en BG caso-I.

De la misma forma obtenemos el Bond Graph correspondiente del caso-I, de la figura 3.17. Estipulamos los vectores de entrada $u(t) = e_9$ y salida

$$y = \begin{bmatrix} e_2 \\ f_2 \\ e_{10} \\ f_{10} \end{bmatrix}, \text{ respecto al } D_1 (e_2, f_2) \text{ y } D_2 (e_{10}, f_{10}), \text{ estas variables determinaran}$$

el comportamiento de la resistencia interna de los interruptores, además las matrices D_{in} , D_{out} de manera igual $x(t)$, $\dot{x}(t)$ y $z(t)$ conforme al Puerto-1.

$$D_{in} = \begin{bmatrix} f_1 \\ f_2 \\ f_8 \\ f_{10} \\ f_{11} \end{bmatrix} \quad D_{out} = \begin{bmatrix} e_1 \\ e_2 \\ e_8 \\ e_{10} \\ e_{11} \end{bmatrix} \quad x = \begin{bmatrix} P_5 \\ P_{13} \end{bmatrix} \quad \dot{x} = \begin{bmatrix} e_5 \\ e_{13} \end{bmatrix} \quad z = \begin{bmatrix} f_5 \\ f_{13} \end{bmatrix}$$

Posteriormente se sustituyen las variables $x(t)$, $\dot{x}(t)$, $z(t)$, D_{in} , D_{out} , $u(t)$ y $y(t)$ en la matriz de estructura de unión.

$$\begin{bmatrix} e_5 \\ e_{13} \\ f_1 \\ f_2 \\ f_8 \\ f_{10} \\ f_{11} \\ e_2 \\ f_2 \\ e_{10} \\ f_{10} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -m_1 & -m_1 & m_1 & 0 & 0 & -m_1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -m_2 & -m_2 & -m_2 & m_2 \\ \hline m_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ m_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -m_1 & m_2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & m_2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & m_2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \hline 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ m_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & m_2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_5 \\ f_{13} \\ e_1 \\ e_2 \\ e_8 \\ e_{10} \\ e_{11} \\ e_9 \end{bmatrix}$$

Se auxilia de las propiedades *P1* y *P2*, asegurando que las variables sean las adecuadas, para la obtención del sistema dinámico.

$$D_{out} = LD_{in} \quad Z = Fx$$

$$\begin{bmatrix} e_1 \\ e_2 \\ e_8 \\ e_{10} \\ e_{11} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & R_{d1} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & R_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & R_{d2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & R_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_1 \\ f_2 \\ f_8 \\ f_{10} \\ f_{11} \end{bmatrix} \quad \begin{bmatrix} f_5 \\ f_{13} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{L_1} & 0 \\ 0 & \frac{1}{L_2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_5 \\ P_{13} \end{bmatrix}$$

Se determina los vectores **A**, **B**, **C**, **D** y **M**, el vector **M** es igual al vector **L** considerando que la matriz $S_{22} = 0$.

$$A = (S_{11} + S_{12}MS_{21})F$$

$$A = \left(\begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -m_1 & -m_1 & m_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -m_2 & -m_2 & -m_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R_2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & R_{d1} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & R_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & R_{d2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & R_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} m_1 & 0 \\ m_1 & 0 \\ -m_1 & m_2 \\ 0 & m_2 \\ 0 & m_2 \end{bmatrix} \right) \begin{bmatrix} \frac{1}{L_1} & 0 \\ 0 & \frac{1}{L_2} \end{bmatrix}$$

$$A = \begin{bmatrix} \frac{1}{L_1}(-m_1^2 R_2 - m_1^2 R_{d1} - m_1^2 R_1) & \frac{1}{L_2}(m_1 m_2 R_1) \\ \frac{1}{L_1}(m_1 m_2 R_1) & \frac{1}{L_2}(-m_2^2 R_1 - m_2^2 R_{d2} - m_2^2 R_3) \end{bmatrix}$$

$$B = (S_{13} + S_{12}MS_{23})$$

$$\mathbf{B} = \left(\begin{array}{c} \left[\begin{array}{cc} -m_1 & \\ m_2 & \end{array} \right] + \left[\begin{array}{cc|cc|cc} -m_1 & -m_1 & m_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -m_2 & -m_2 & -m_2 & -m_2 \end{array} \right] \left[\begin{array}{cc|cc|cc} R_2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & R_{d1} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & R_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & R_{d2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & R_3 & 0 \end{array} \right] \left[\begin{array}{c} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{array} \right] \end{array} \right)$$

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} -m_1 \\ m_2 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{C} = (S_{31} + S_{32}MS_{21})F$$

$$\mathbf{C} = \left(\begin{array}{c} \left[\begin{array}{cc} 0 & 0 \\ m_1 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & m_2 \end{array} \right] + \left[\begin{array}{cc|cc|cc} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{array} \right] \left[\begin{array}{cc|cc|cc} R_2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & R_{d1} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & R_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & R_{d2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & R_3 & 0 \end{array} \right] \left[\begin{array}{cc} m_1 & 0 \\ m_1 & 0 \\ -m_1 & m_2 \\ 0 & m_2 \\ 0 & m_2 \end{array} \right] \left[\begin{array}{cc} \frac{1}{L_1} & 0 \\ 0 & \frac{1}{L_2} \end{array} \right] \end{array} \right)$$

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} \frac{1}{L_1}(R_{d1}m_1) & 0 \\ \frac{1}{L_1}(m_1) & 0 \\ 0 & \frac{1}{L_2}(R_{d2}m_2) \\ 0 & \frac{1}{L_2}(m_2) \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{D} = (S_{33} + S_{32}MS_{23})$$

$$\mathbf{D} = \left(\begin{array}{c} \left[\begin{array}{c} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{array} \right] + \left[\begin{array}{cc|cc|cc} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{array} \right] \left[\begin{array}{cc|cc|cc} R_2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & R_{d1} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & R_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & R_{d2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & R_3 & 0 \end{array} \right] \left[\begin{array}{c} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{array} \right] \end{array} \right)$$

$$\mathbf{D} = [0]$$

El sistema se representa por medio de la ecuación de entrada la cual nos permitirá analizar su estado dinámico:

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{Ax} + \mathbf{Bu}$$

$$\begin{bmatrix} e_5 \\ e_{13} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{L_1}(-m_1^2R_2 - m_1^2R_{d1} - m_1^2R_1) & \frac{1}{L_2}(m_1m_2R_1) \\ \frac{1}{L_1}(m_1m_2R_1) & \frac{1}{L_2}(-m_2^2R_1 - m_2^2R_{d2} - m_2^2R_3) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_5 \\ P_{13} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -m_1 \\ m_2 \end{bmatrix} [e_9]$$

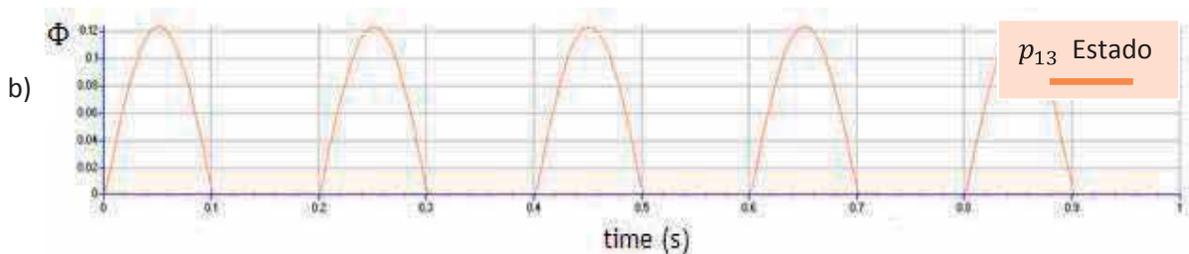
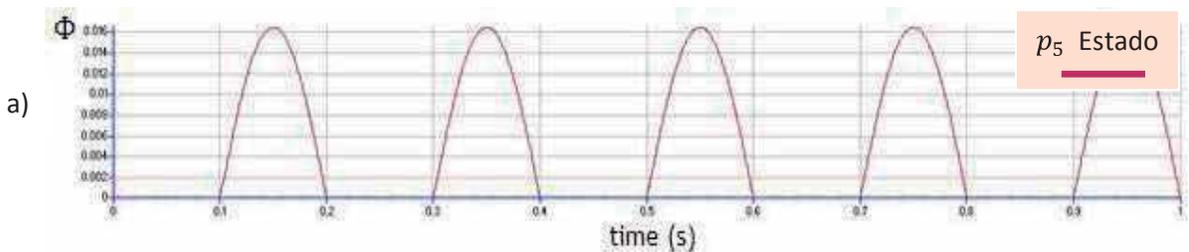
La ecuación de salida representa el estado dinámico de los interruptores contemplando el esfuerzo y flujo a través de ellos.

$$y = Cx + Du$$

$$\begin{bmatrix} e_2 \\ f_2 \\ e_{10} \\ f_{10} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{L_1}(R_{d1}m_1) & 0 \\ \frac{1}{L_1}(m_1) & 0 \\ 0 & \frac{1}{L_2}(R_{d2}m_2) \\ 0 & \frac{1}{L_2}(m_2) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_5 \\ P_{13} \end{bmatrix} + [0][e_9]$$

3.5.1 Simulación en Simnon de un Circuito con más de un Diodo – I

Conforme al circuito de la figura 3.17, tiene el mismo funcionamiento del modelado del diodo con carga RL de la figura 3.11, como se muestra el D_2 se activará lo cual empezará a conducir adecuadamente, generando una tensión a través de la carga R_3 y L_2 ignorando completamente al D_1 no conduce durante un corto tiempo. De forma contraria D_2 se mantiene como un circuito abierto, mientras D_1 se activa generando una tensión a través de la carga R_1 y L_1 .



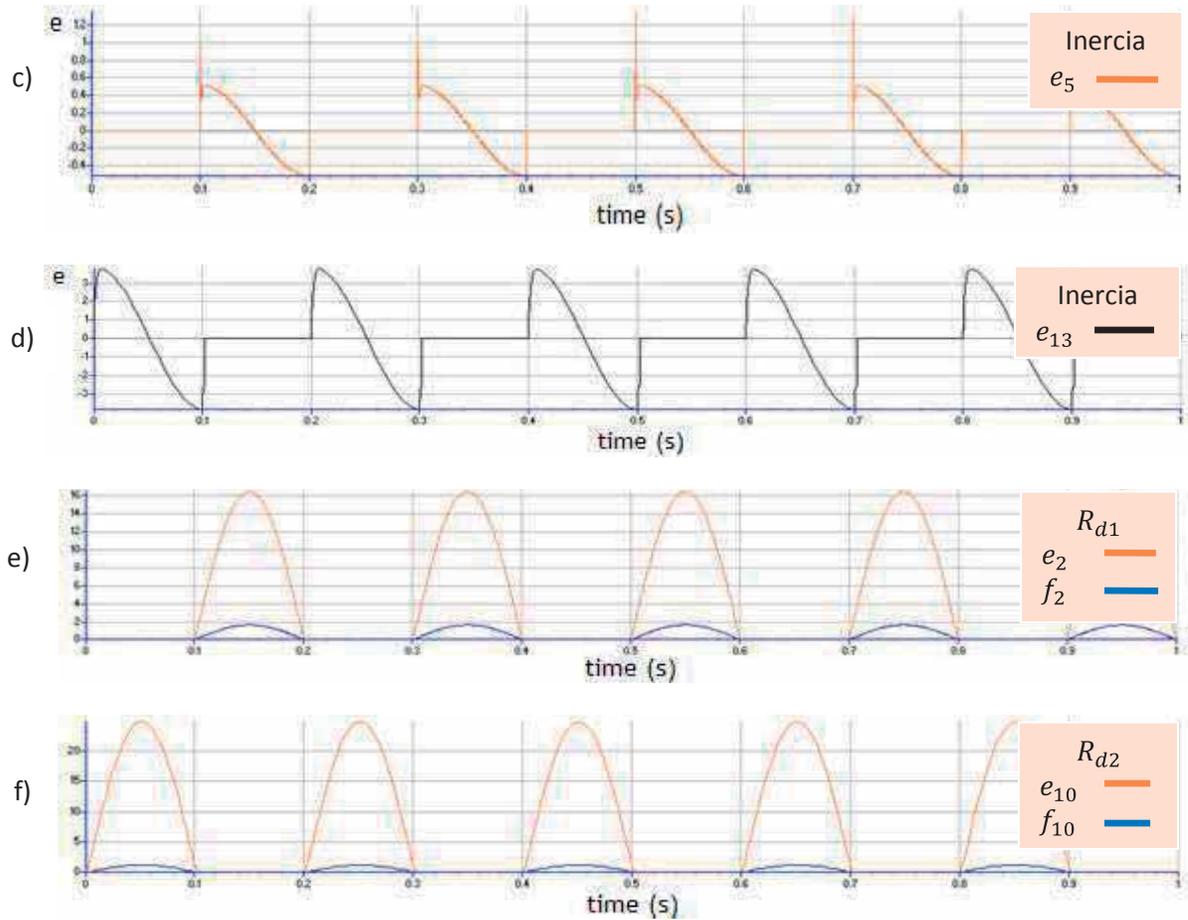


Figura 3.20 Caso –I. a) estado p_5 de inercia; b) estado p_{13} de inercia; c) e_5 esfuerzo de inercia; d) e_{13} esfuerzo de inercia; e) e_2, f_2 esfuerzo y flujo de R_{d1} ; f) e_{10}, f_{10} esfuerzo y flujo en R_{d2} .

Generando repetitivamente un switcheo determinado por la señal de entrada, así como de la polarización en la que se encuentren dichos interruptores como se muestra en la figura 3.20.

3.5.2 Simulación en 20-sim de un Circuito con más de un Diodo caso – I

Para expresar la representación gráfica de Simnon se Modela el Caso-I, en 20-sim exhibe la estructura física de intercambio de potencia en el sistema. Observe el BG de la figura 3.21.

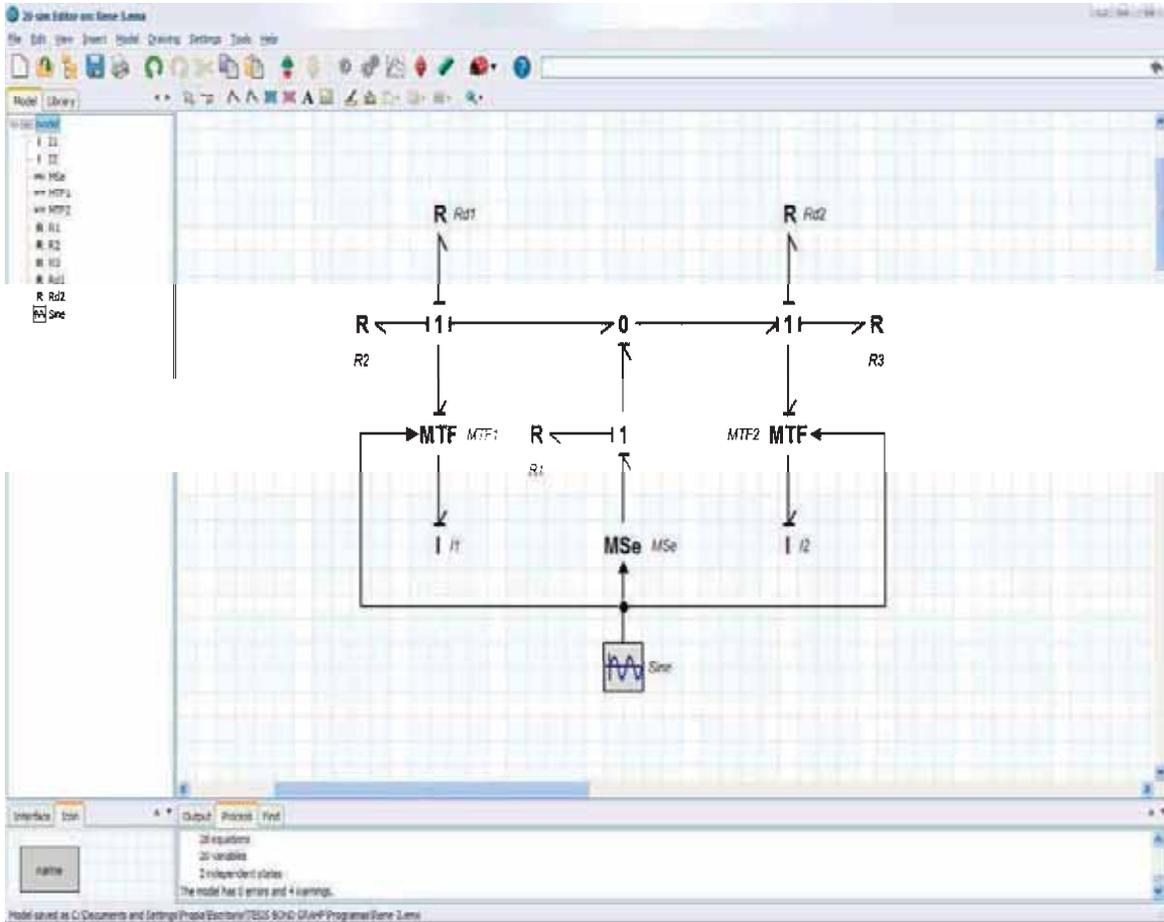


Figura 3.21 Representación en BG caso- I.

Explotando las ventajas de 20-sim para la representación de los estados obteniendo el BG correspondiente se obtiene nuevamente la simulación es de la misma manera que la del software Simnon en base a ecuaciones diferenciales se representa gráficamente el modelado del sistema electrónico. Indicando el gran potencial para el análisis de sistemas físicos observe la ilustración 3.22, determinando que los dos software muestran el mismo comportamiento.

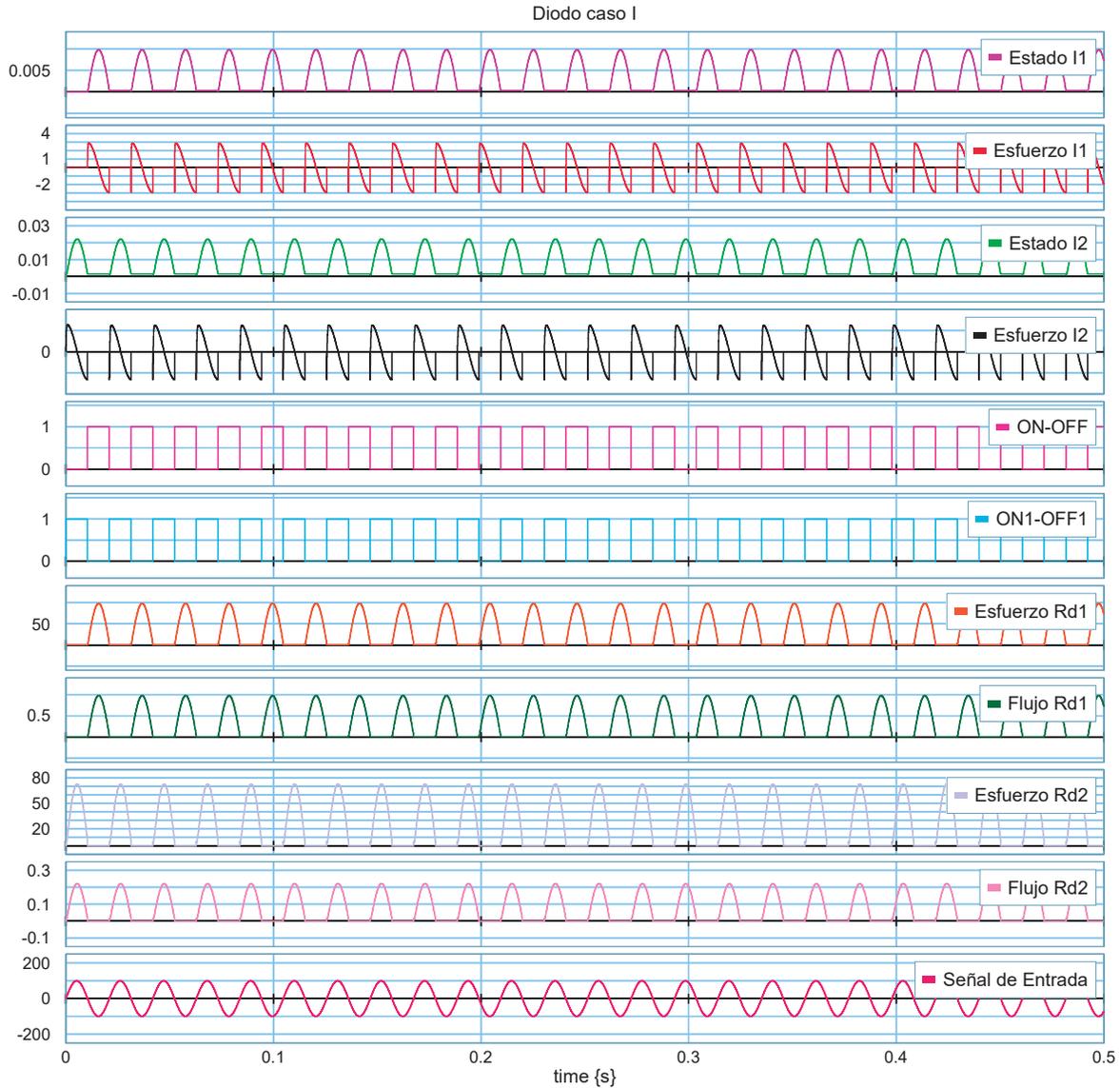


Figura 3.22 Modelado del Caso-I en 20-sim.

Preste atención a los estados $ON-OFF (D_1)$ y $ON_1-OFF_1 (D_2)$, indicando en primer lugar la activación del D_2 , conforme la señal de entrada cambie de un valor positivo a negativo y viceversa.

3.6 Modelado de un circuito con más de un Diodo Caso- II

La figura 3.23, muestra un circuito de la misma manera que el del caso-I ahora con una carga RC, en conjunto con dos diodos. De tal manera se proceder al modelado del sistema dinámico establecido.

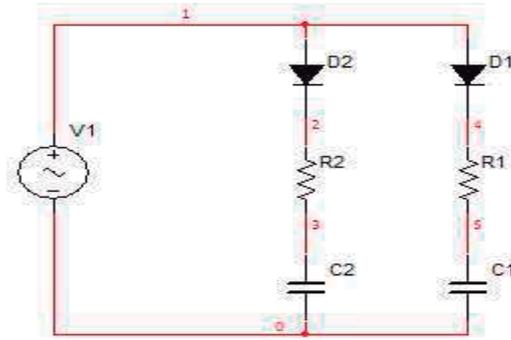


Figura 3.23 Diodo caso- II con carga RC.

Identificamos los *bonds* correspondiente el sistema de la figura 3.24, así como la colocación de los elementos a través de los puertos y uniones adecuados, se observa que en el caso-I y caso-II empieza aumentar el grado de componentes de un circuito de conmutación.

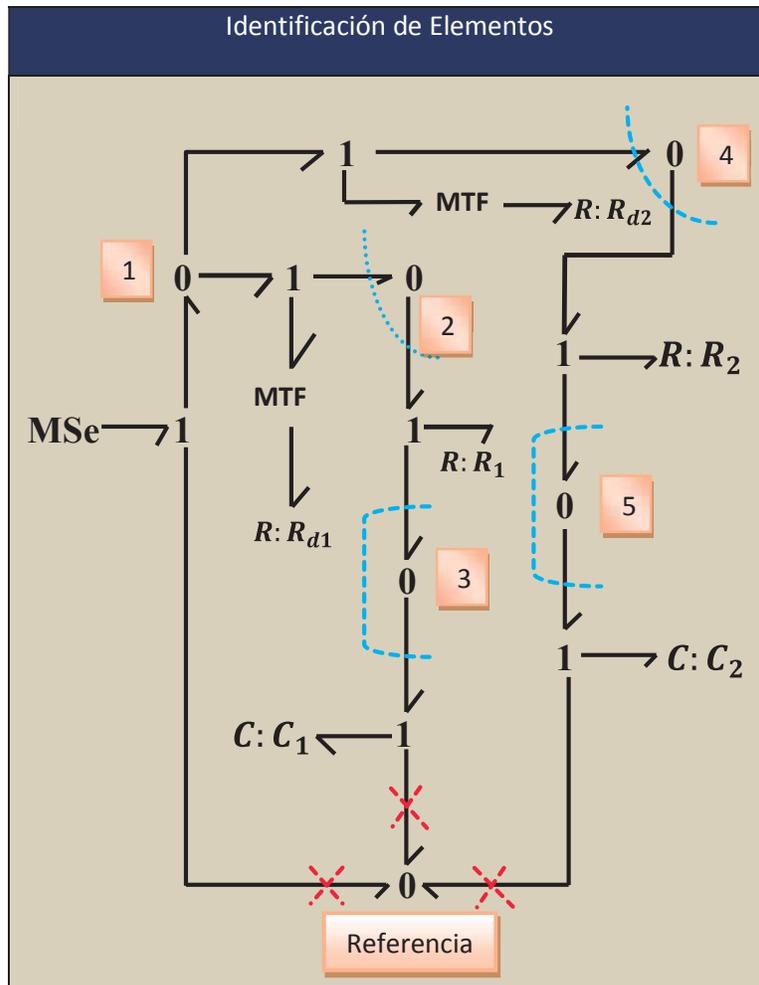


Figura 3.24 Caso-II en BG.

Tomando los pasos adecuados del procedimiento-1, obtenemos el BG que rige al sistema, que se ilustra en la figura 3.25.

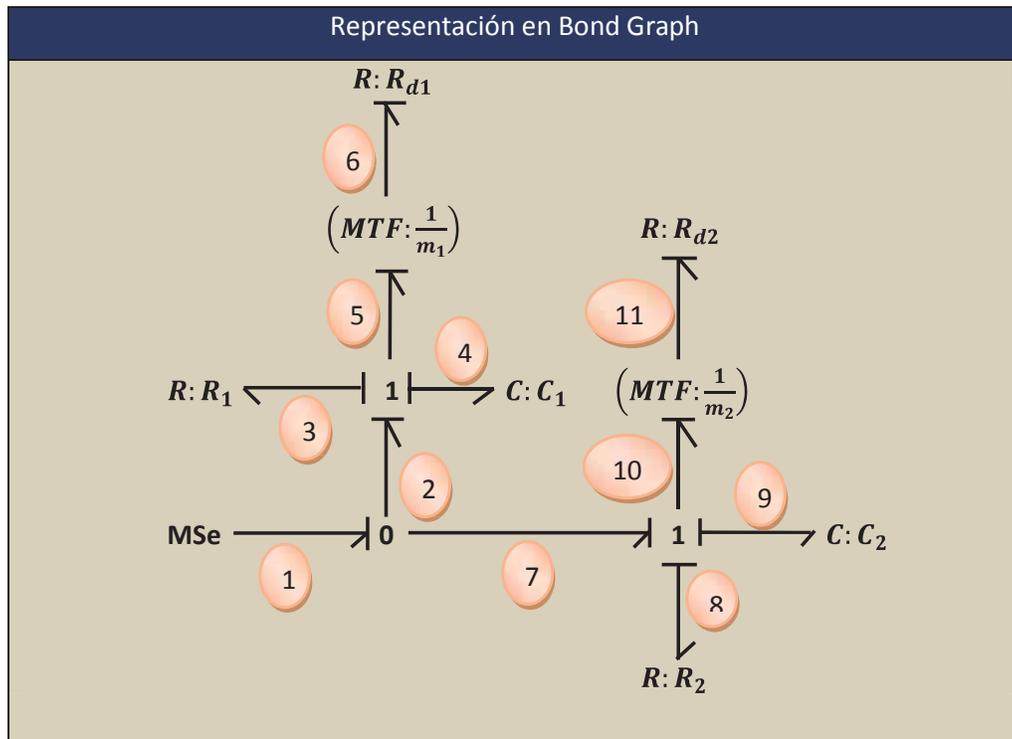


Figura 3.25 Modelado en BG caso-II.

Obtenemos los parámetros adecuados de los vectores de sistema correspondiente al modelado del caso-II como en los ejemplos anteriores. Los cuales son:

$$D_{in} = \begin{bmatrix} f_3 \\ e_6 \\ f_8 \\ e_{11} \end{bmatrix} \quad D_{out} = \begin{bmatrix} e_3 \\ f_6 \\ e_8 \\ f_{11} \end{bmatrix} \quad x = \begin{bmatrix} q_4 \\ q_9 \end{bmatrix} \quad \dot{x} = \begin{bmatrix} f_4 \\ f_9 \end{bmatrix} \quad z = \begin{bmatrix} e_4 \\ e_9 \end{bmatrix}$$

Así como entrada de la señal y salidas en cada uno de los interruptores del sistema de conmutación.

$$u = [e_1] \quad y = \begin{bmatrix} e_6 \\ f_6 \\ e_{11} \\ f_{11} \end{bmatrix}$$

Partiendo de las vectores obtenemos la matriz de estructura de unión.

$$\begin{bmatrix} f_4 \\ f_9 \\ f_3 \\ e_6 \\ f_8 \\ e_{11} \\ e_6 \\ f_6 \\ e_{11} \\ f_{11} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & m_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & m_2 & 0 \\ \hline 0 & 0 & 0 & m_1 & 0 & 0 & 0 \\ -m_1 & 0 & -m_1 & 0 & 0 & 0 & m_1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & m_2 & 0 \\ 0 & -m_2 & 0 & 0 & -m_2 & 0 & m_2 \\ \hline -m_1 & 0 & -m_1 & 0 & 0 & 0 & m_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -m_2 & 0 & 0 & -m_2 & 0 & -m_2 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e_4 \\ e_9 \\ e_3 \\ f_6 \\ e_8 \\ f_{11} \\ e_1 \end{bmatrix}$$

Se llenan las matrices L y F , para la obtención de las matrices **A**, **B**, **C**, **D** y **M**.

$$D_{out} = LD_{in} \quad Z = Fx$$

$$\begin{bmatrix} e_3 \\ f_6 \\ e_8 \\ f_{11} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{R_{d1}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & R_2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{R_{d2}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_3 \\ e_6 \\ f_8 \\ e_{11} \end{bmatrix} \quad \begin{bmatrix} e_4 \\ e_9 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{c_1} & 0 \\ 0 & \frac{1}{c_2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} q_4 \\ q_9 \end{bmatrix}$$

Partiendo de las ecs. (3.14) a (3.18) obtenemos los vectores del sistema.

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

$$M = \left(\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 0 & m_1 & 0 & 0 \\ -m_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & m_2 \\ 0 & 0 & -m_2 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{R_{d1}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & R_2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{R_{d2}} \end{bmatrix} \right)^{-1} \begin{bmatrix} R_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{R_{d1}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & R_2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{R_{d2}} \end{bmatrix}$$

$$M = \begin{bmatrix} \frac{R_{d1}R_1}{(R_{d1} + m_1^2R_1)} & \frac{m_1}{R_{d1}(R_{d1} + m_1^2R_1)} & 0 & 0 \\ \frac{-R_{d1}m_1R_1^2}{(R_{d1} + m_1^2R_1)} & \frac{1}{(R_{d1} + m_1^2R_1)} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{R_{d2}R_2}{(R_{d2} + m_2^2R_2)} & \frac{m_2}{R_2(R_{d2} + m_2^2R_2)} \\ 0 & 0 & \frac{-R_2^2m_2R_{d2}}{(R_{d2} + m_2^2R_2)} & \frac{1}{(R_{d2} + m_2^2R_2)} \end{bmatrix}$$

$$A = (S_{11} + S_{12}MS_{21})F$$

$$A = \left(\begin{array}{c} \left[\begin{array}{cccc} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{array} \right] + \left[\begin{array}{cccc} 0 & m_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & m_2 \end{array} \right] \left[\begin{array}{cccc} \frac{R_{d1}R_1}{(R_{d1} + m_1^2R_1)} & \frac{m_1}{R_{d1}(R_{d1} + m_1^2R_1)} & 0 & 0 \\ \frac{-R_{d1}m_1R_1^2}{(R_{d1} + m_1^2R_1)} & \frac{1}{(R_{d1} + m_1^2R_1)} & 0 & 0 \\ \frac{R_{d2}R_2}{(R_{d2} + m_2^2R_2)} & \frac{m_2}{R_2(R_{d2} + m_2^2R_2)} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{-R_2^2m_2R_{d2}}{(R_{d2} + m_2^2R_2)} & \frac{1}{(R_{d2} + m_2^2R_2)} \end{array} \right] \left[\begin{array}{cc} 0 & 0 \\ -m_1 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & -m_2 \end{array} \right] \left[\begin{array}{cc} \frac{1}{C_1} & 0 \\ 0 & \frac{1}{C_2} \end{array} \right] \end{array} \right)$$

$$A = \begin{bmatrix} \left(\frac{1}{C_1}\right) \frac{-m_1^2}{(R_{d1} + m_1^2R_1)} & 0 \\ 0 & \left(\frac{1}{C_2}\right) \frac{-m_2^2}{(R_{d2} + m_2^2R_2)} \end{bmatrix}$$

$$B = (S_{13} + S_{12}MS_{23})$$

$$B = \left(\begin{array}{c} \left[\begin{array}{cccc} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{array} \right] + \left[\begin{array}{cccc} 0 & m_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & m_2 \end{array} \right] \left[\begin{array}{cccc} \frac{R_{d1}R_1}{(R_{d1} + m_1^2R_1)} & \frac{m_1}{R_{d1}(R_{d1} + m_1^2R_1)} & 0 & 0 \\ \frac{-R_{d1}m_1R_1^2}{(R_{d1} + m_1^2R_1)} & \frac{1}{(R_{d1} + m_1^2R_1)} & 0 & 0 \\ \frac{R_{d2}R_2}{(R_{d2} + m_2^2R_2)} & \frac{m_2}{R_2(R_{d2} + m_2^2R_2)} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{-R_2^2m_2R_{d2}}{(R_{d2} + m_2^2R_2)} & \frac{1}{(R_{d2} + m_2^2R_2)} \end{array} \right] \left[\begin{array}{c} 0 \\ m_1 \\ 0 \\ m_2 \end{array} \right] \end{array} \right)$$

$$B = \begin{bmatrix} \frac{m_1^2}{(R_{d1} + m_1^2R_1)} \\ \frac{m_2^2}{(R_{d2} + m_2^2R_2)} \end{bmatrix}$$

$$C = (S_{31} + S_{32}MS_{21})F$$

$$C = \left(\begin{array}{c} \left[\begin{array}{cccc} -m_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -m_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{array} \right] + \left[\begin{array}{cccc} -m_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -m_2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{array} \right] \left[\begin{array}{cccc} \frac{R_{d1}R_1}{(R_{d1} + m_1^2R_1)} & \frac{m_1}{R_{d1}(R_{d1} + m_1^2R_1)} & 0 & 0 \\ \frac{-R_{d1}m_1R_1^2}{(R_{d1} + m_1^2R_1)} & \frac{1}{(R_{d1} + m_1^2R_1)} & 0 & 0 \\ \frac{R_{d2}R_2}{(R_{d2} + m_2^2R_2)} & \frac{m_2}{R_2(R_{d2} + m_2^2R_2)} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{-R_2^2m_2R_{d2}}{(R_{d2} + m_2^2R_2)} & \frac{1}{(R_{d2} + m_2^2R_2)} \end{array} \right] \left[\begin{array}{cc} 0 & 0 \\ -m_1 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & -m_2 \end{array} \right] \left[\begin{array}{cc} \frac{1}{C_1} & 0 \\ 0 & \frac{1}{C_2} \end{array} \right] \end{array} \right)$$

$$C = \begin{bmatrix} \left(\frac{1}{C_1}\right) \frac{-m_1(R_{d1}^2 + R_{d1}m_1^2R_1 - m_1^2)}{R_{d1}(R_{d1} + m_1^2R_1)} & 0 \\ \left(\frac{1}{C_1}\right) \frac{-m_1}{(R_{d1} + m_1^2R_1)} & 0 \\ 0 & \left(\frac{1}{C_2}\right) \frac{-m_2(R_{d2}^2 + R_{d2}m_2^2R_2 - m_2^2)}{R_2(R_{d2} + m_2^2R_2)} \\ 0 & \left(\frac{1}{C_2}\right) \frac{-m_2}{(R_{d2} + m_2^2R_2)} \end{bmatrix}$$

$$D = (S_{33} + S_{32}MS_{23})$$

$$D = \left(\begin{bmatrix} m_1 \\ 0 \\ -m_2 \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -m_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -m_2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{R_{d1}R_1}{(R_{d1} + m_1^2R_1)} & \frac{m_1}{R_{d1}(R_{d1} + m_1^2R_1)} & 0 & 0 \\ \frac{-R_{d1}m_1R_1^2}{(R_{d1} + m_1^2R_1)} & \frac{1}{(R_{d1} + m_1^2R_1)} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{R_{d2}R_2}{(R_{d2} + m_2^2R_2)} & \frac{m_2}{R_2(R_{d2} + m_2^2R_2)} \\ 0 & 0 & \frac{-R_2^2m_2R_{d2}}{(R_{d2} + m_2^2R_2)} & \frac{1}{(R_{d2} + m_2^2R_2)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ m_1 \\ 0 \\ m_2 \end{bmatrix} \right)$$

$$D = \begin{bmatrix} \frac{m_1(R_{d1}^2 + R_{d1}m_1^2R_1 - m_1^2)}{R_{d1}(R_{d1} + m_1^2R_1)} \\ \frac{m_1}{(R_{d1} + m_1^2R_1)} \\ \frac{-m_2(R_{d2}^2 + R_{d2}m_2^2R_2 + m_2^2)}{R_2(R_{d2} + m_2^2R_2)} \\ \frac{m_2}{(R_{d2} + m_2^2R_2)} \end{bmatrix}$$

Analizando la ecuación de entrada y salida con las vectores obtenemos su estado dinámico:

$$\dot{x} = Ax + Bu$$

$$\begin{bmatrix} f_6 \\ f_{11} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \left(\frac{1}{C_1}\right) \frac{-m_1^2}{(R_{d1} + m_1^2R_1)} & 0 \\ 0 & \left(\frac{1}{C_2}\right) \frac{-m_2^2}{(R_{d2} + m_2^2R_2)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} q_6 \\ q_{11} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{m_1^2}{(R_{d1} + m_1^2R_1)} \\ \frac{m_2^2}{(R_{d2} + m_2^2R_2)} \end{bmatrix} [e_1]$$

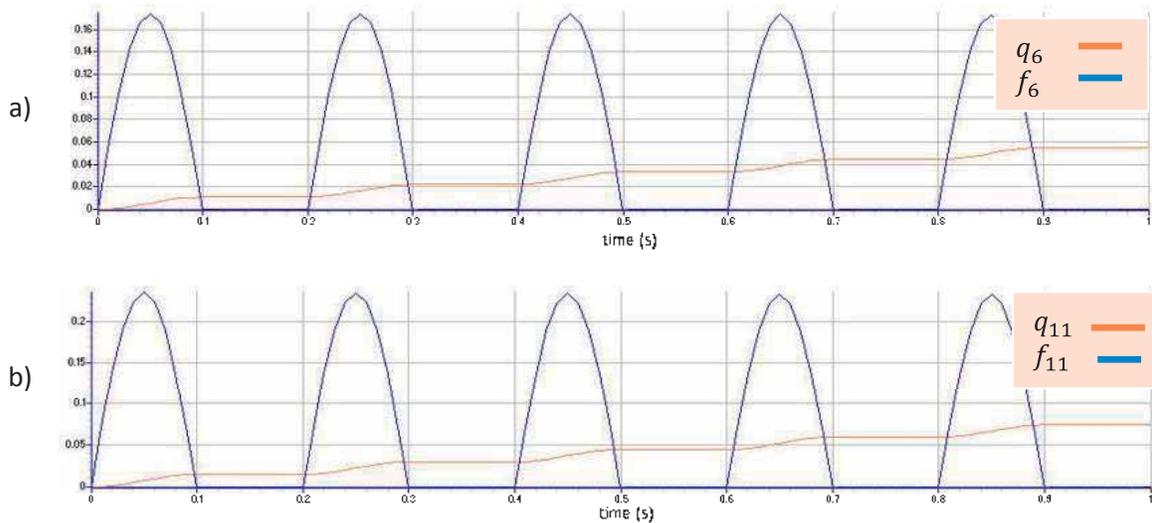
La salida del sistema corresponde a los estados de los interruptores para observar detalladamente el comportamiento de ellos en forma grafica.

$$y = Cx + Du$$

$$\begin{bmatrix} e_4 \\ f_4 \\ e_8 \\ f_8 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \left(\frac{1}{C_1}\right) \frac{-m_1(R_{d1}^2 + R_{d1}m_1^2R_1 - m_1^2)}{R_{d1}(R_{d1} + m_1^2R_1)} & 0 \\ \left(\frac{1}{C_1}\right) \frac{-m_1}{(R_{d1} + m_1^2R_1)} & 0 \\ 0 & \left(\frac{1}{C_2}\right) \frac{-m_2(R_{d2}^2 + R_{d2}m_2^2R_2 - m_2^2)}{R_2(R_{d2} + m_2^2R_2)} \\ 0 & \left(\frac{1}{C_2}\right) \frac{-m_2}{(R_{d2} + m_2^2R_2)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} q_6 \\ q_{11} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{m_1(R_{d1}^2 + R_{d1}m_1^2R_1 - m_1^2)}{R_{d1}(R_{d1} + m_1^2R_1)} \\ \frac{m_1}{(R_{d1} + m_1^2R_1)} \\ -\frac{m_2(R_{d2}^2 + R_{d2}m_2^2R_2 + m_2^2)}{R_2(R_{d2} + m_2^2R_2)} \\ \frac{m_2}{(R_{d2} + m_2^2R_2)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e_1 \end{bmatrix}$$

3.6.1 Simulación en Simnon de un Circuito con más de un Diodo caso - II

Dentro de este caso – II, utilizamos una carga RC, a través de D_1, D_2 se activan al mismo tiempo debido a que se encuentran activados los dos interruptores, a diferencia del caso – I, como se muestra en el circuito de la figura 3.26.



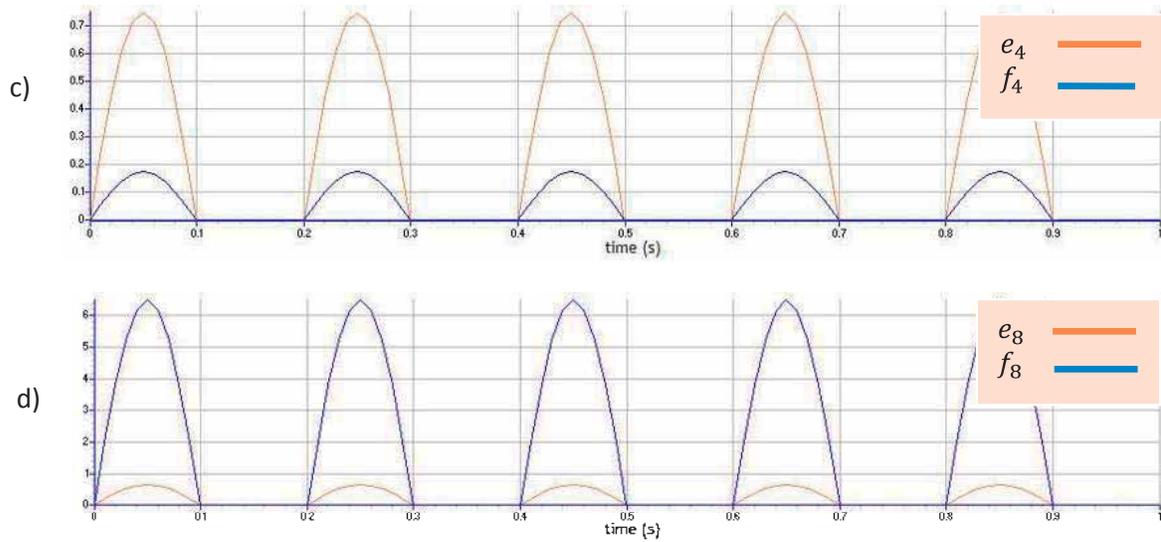


Figura 3.26. Caso – II. a) q_6, f_6 Estado dinámico del C_1 ; b) q_{11}, f_{11} Estado dinámico de C_2 ; c) e_4, f_4 esfuerzo y flujo de R_{d1} en D_1 ; d) e_8, f_8 esfuerzo y flujo R_{d2} en D_2 .

Observe el comportamiento de los esfuerzos en cada uno de los diodos R_{d1} y R_{d2} , la forma de onda prácticamente la misma con diferente magnitud, conforme D_1 , se activa del mismo modo que D_2 , por lo que circula un flujo en cada carga R_1C_1 y R_2C_2 .

Cuando se activa el D_2 empieza a cargar el capacitor C_2 positivamente en el primer ciclo de la señal positiva, en tanto el D_1 se activa, empieza el C_1 a cargarse, conforme la señal de alimentación MS_e , pase del estado positivo para $m=1$, y negativo para $m=0$, continuamente operaran los interruptores como se observa en la figura 3.26, los estados dinámicos del sistema.

3.6.2 Simulación en 20-sim de un Circuito con más de un Diodo caso – II

Nuevamente la representación del estado dinámico de una forma más sencilla aplicando la causalidad correspondiente en cada uno de los *bonds*, se simboliza en 20-sim de la figura 3.27, siendo el obtenido en la figura 3.25, aplicando un *bonds* activo a cada uno de los diodos, conforme al estado de polarización en la que se encuentren ubicados, consideremos nuevamente la causalidad del *MTF* de la tabla 3.3.

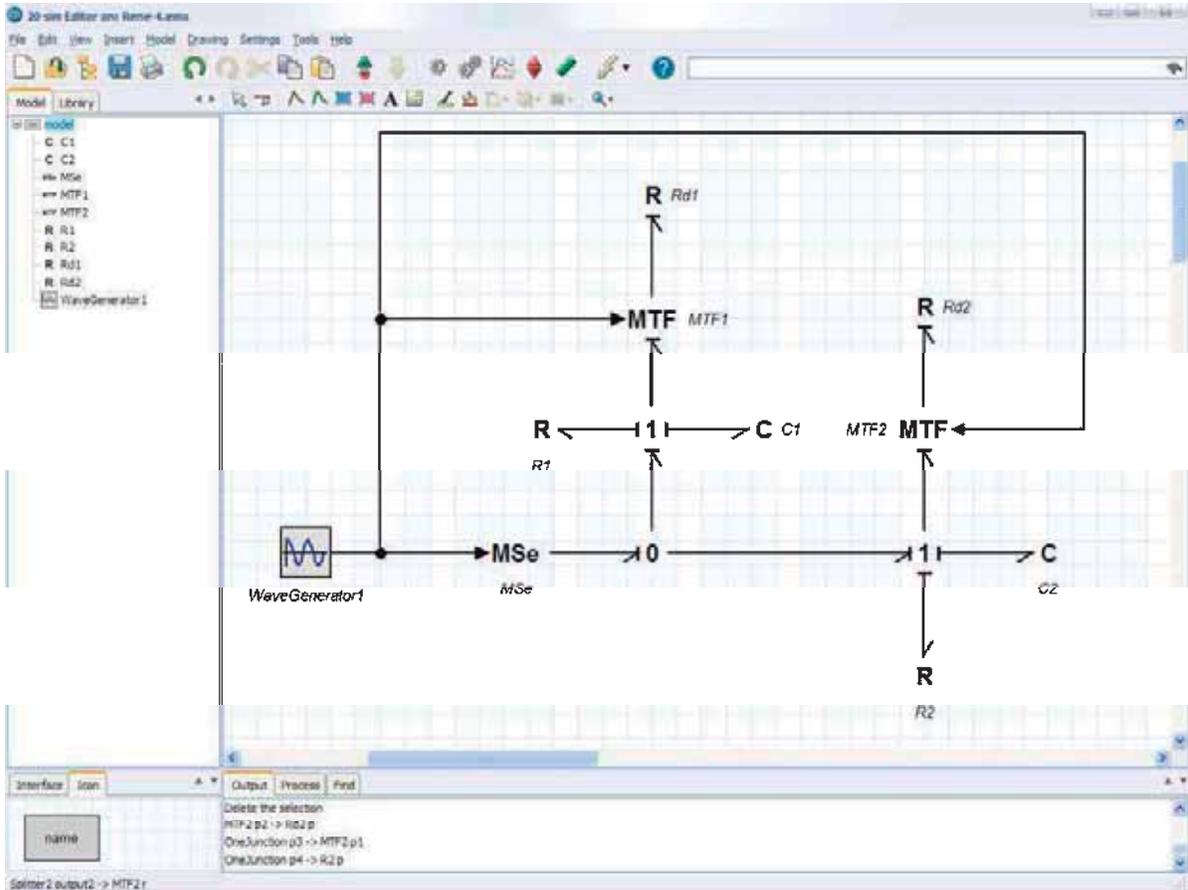


Figura 3.27 Representación en BG del caso- II.

Finalmente obtenemos de una forma más sencilla la representación del sistema de conmutación equivalente conformado por dos *diodos* en conjunto con una carga RC , mostrando de nuevamente los estados y salidas del estado dinámico observe la gráfica 3.28.

Observe que tiene el mismo comportamiento que en el simulador Simmon por lo tanto la representación en 20-sim es la adecuada partiendo principalmente de BG del sistema.

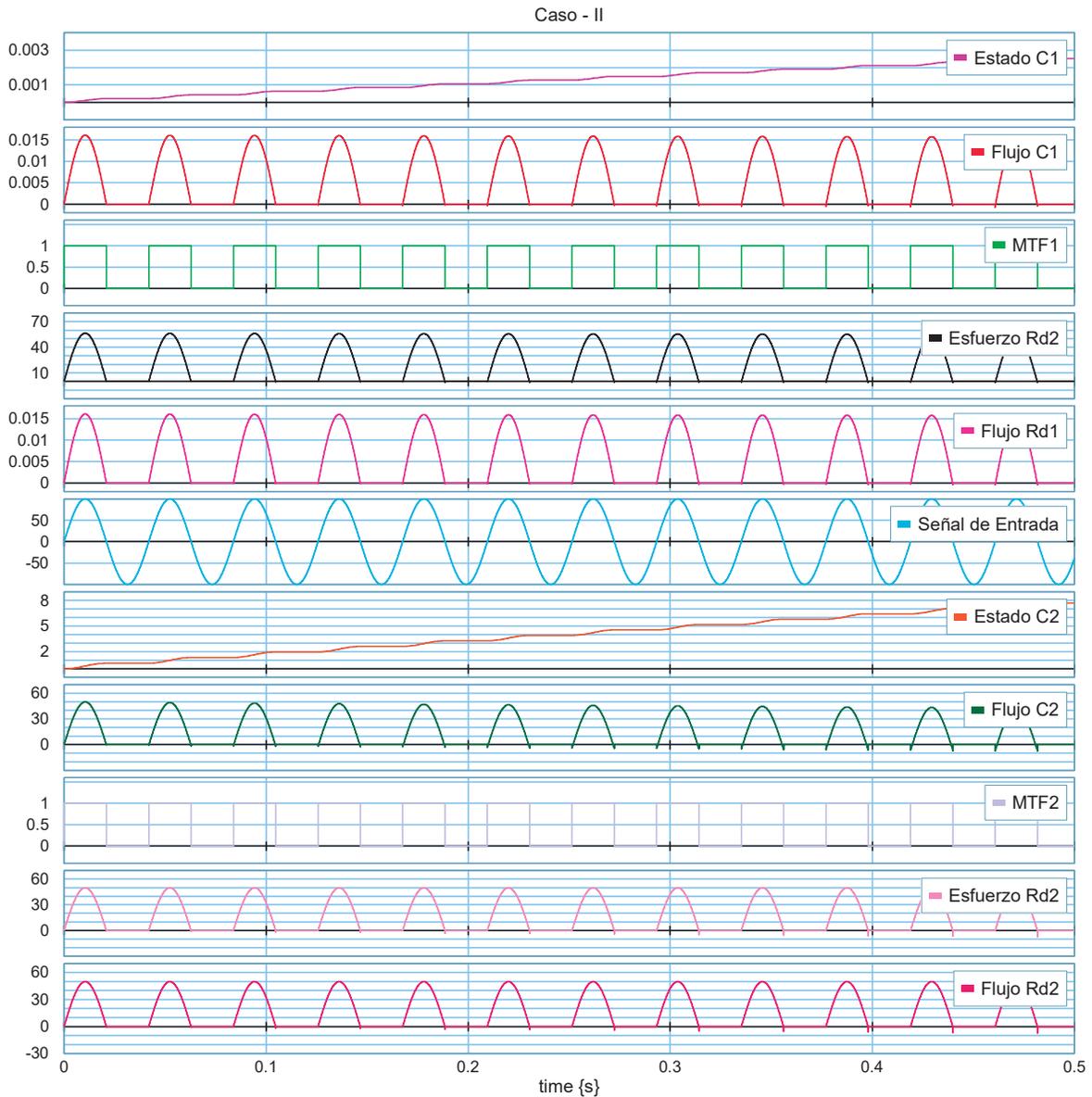


Figura 3.28 Modelado del Caso-II en 20-sim.

3.7 Modelado de un Circuito Rectificador de Tap Central

El siguiente circuito es muy popular encontrarlo debido a que se utiliza y se encuentra en gran parte de los dispositivos de electrónico, insertando un capacitor para observar el comportamiento. A lo que se estaba acostumbrado a la respuesta del sistema que es completamente rectificar la señal de AC a DC como se muestra en la figura 3.29.

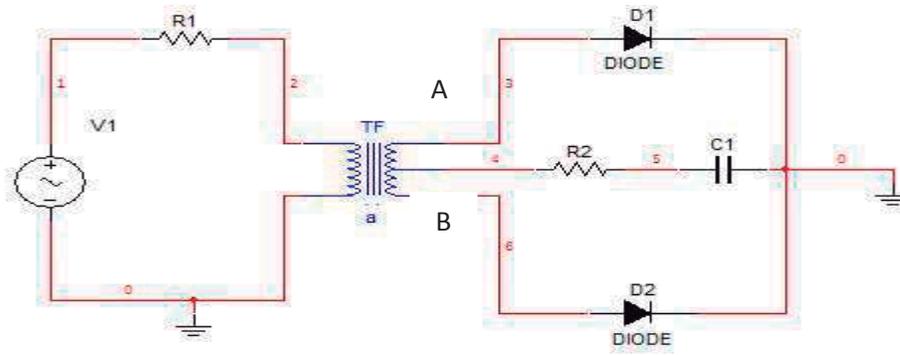


Figura 3.29 Rectificador Tap Central con carga RC.

Definiendo los elementos detalladamente debido a que se contempla la unión de un transformador con derivación central se localizan las uniones y puertos como se muestra en la figura 3.30.

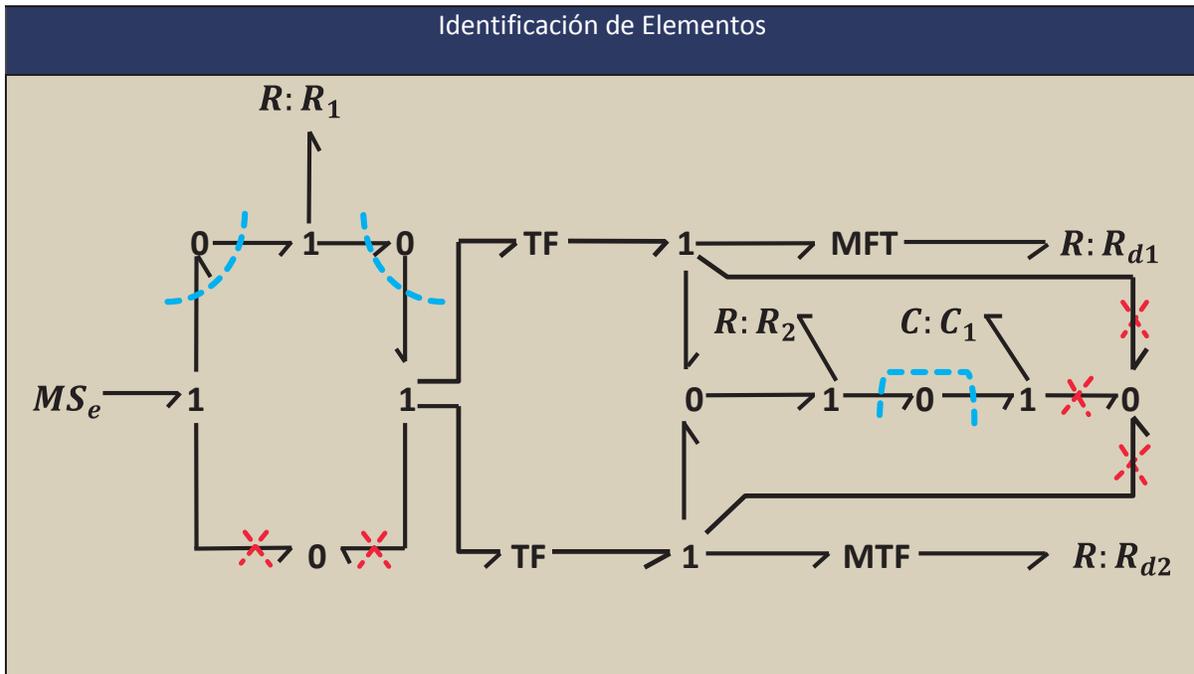


Figura 3.30 Rectificador Tap Central con carga RC en BG.

Finalmente tomando la consideración de reducción de *bonds*, así como la localización de los elementos del sistema obtenemos el BG correspondiente en la imagen 3.31.

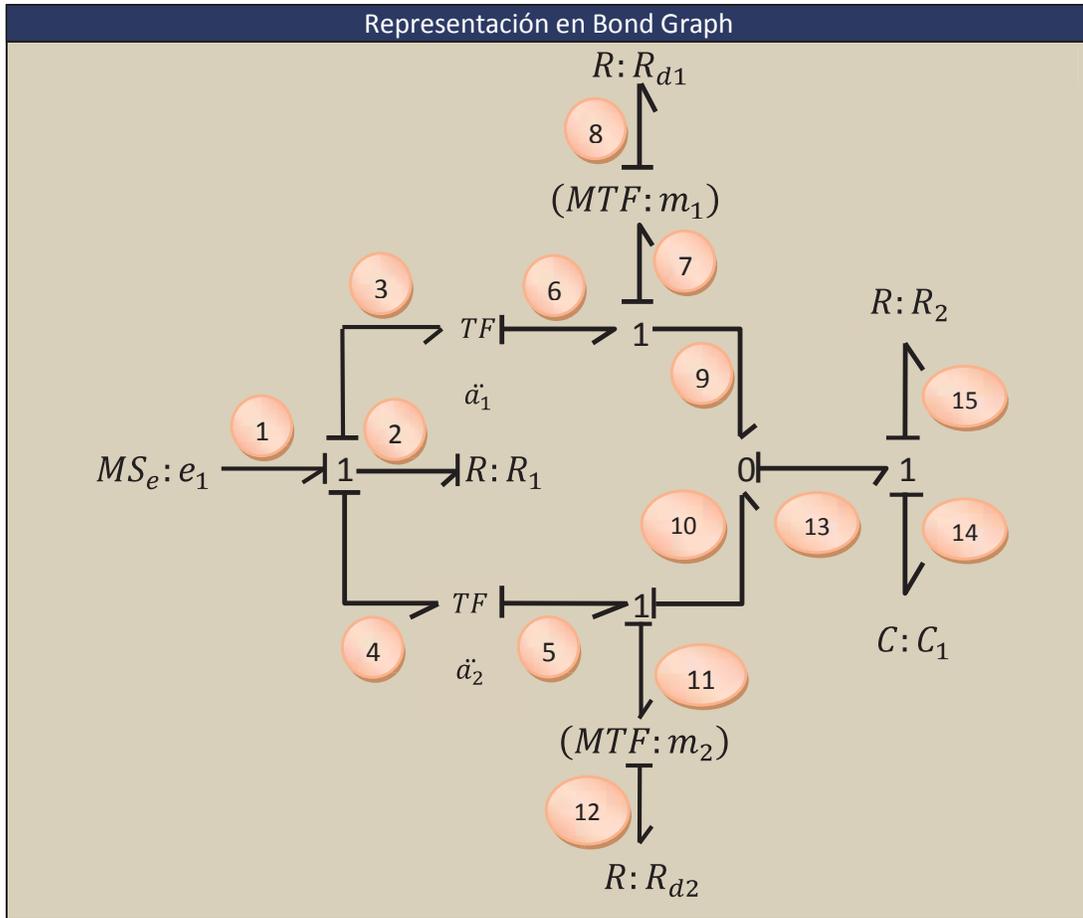


Figura 3.31 Modelado en BG del Rectificador con Tap Central.

Finalmente obtenemos los vectores adecuados del rectificador para el modelado dinámico del sistema correspondiente a $u(t)$, $y(t)$, $x(t)$, $\dot{x}(t)$, $z(t)$, D_{in} y D_{out} .

$$D_{in} = \begin{bmatrix} e_2 \\ f_8 \\ f_{12} \\ f_{15} \end{bmatrix} \quad D_{out} = \begin{bmatrix} f_2 \\ e_8 \\ e_{12} \\ e_{15} \end{bmatrix} \quad x = [q_{14}] \quad \dot{x} = [f_{14}] \quad z = [e_{14}]$$

$$u = [e_1] \quad y = \begin{bmatrix} e_8 \\ f_8 \\ e_{12} \\ f_{12} \end{bmatrix}$$

Una vez obtenidos las matrices realizamos el vaciado en la matriz de unión del sistema.

La relación del transformador TF se encuentra en la tabla 2.7 correspondiente a la causalidad del *Puerto-2* (transformadores y giradores) del capítulo anterior, por lo que se parte para obtener la matriz de unión.

$$\begin{bmatrix} f_{14} \\ e_2 \\ f_8 \\ f_{12} \\ f_{15} \\ e_8 \\ f_8 \\ e_{12} \\ f_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & (a_1 + a_2) & 0 & 0 & 0 & 0 \\ (-a_1 - a_2) & 0 & -m_1 a_1 & -a_2 m_2 & (-a_1 - a_2) & 1 \\ 0 & m_1 a_1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & a_2 m_2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & (a_1 + a_2) & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & m_1 a_1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & m_2 a_2 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e_{14} \\ f_2 \\ e_8 \\ e_{12} \\ e_{15} \\ e_1 \end{bmatrix}$$

Aplicando las propiedades $P1$, $P2$ establecemos los vector L , F correspondiente a la diagonal de disipación, almacenamiento respectivamente.

$$D_{out} = L D_{in} \quad Z = F x$$

$$\begin{bmatrix} f_2 \\ e_8 \\ e_{12} \\ e_{15} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{R_1} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & R_{d1} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & R_{d2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & R_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e_2 \\ f_8 \\ f_{12} \\ f_{15} \end{bmatrix} \quad [e_{14}] = \left[\frac{1}{C_1} \right] [q_{14}]$$

Por ultimo se procede al cálculo de las matrices **A**, **B**, **C**, **D** y **M** de las ecs. (3.14) a (3.18).

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

$$M = \left(\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 0 & -m_1 a_1 & -a_2 m_2 & (-a_1 - a_2) \\ m_1 a_1 & 0 & 0 & 0 \\ a_2 m_2 & 0 & 0 & 0 \\ (a_1 + a_2) & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \right) \left(\begin{bmatrix} \frac{1}{R_1} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & R_{d1} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & R_{d2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & R_2 \end{bmatrix} \right)^{-1} \left(\begin{bmatrix} \frac{1}{R_1} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & R_{d1} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & R_{d2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & R_2 \end{bmatrix} \right)$$

$$\beta = (a_1^2(R_{d1}m_1^2 + R_2) + 2a_1a_2R_2 + a_2^2(R_{d2}m_2^2 + R_2) + R_1)$$

$$M = \begin{bmatrix} \left(\frac{1}{\beta} \right) \left(\frac{-a_1 R_{d1}^2 m_1 R_1}{\beta} \right) \left(\frac{-a_2 m_2 R_1 R_{d2}^2}{\beta} \right) \left(\frac{-R_1 R_2^2 (a_1 + a_2)}{\beta} \right) \\ \left(\frac{a_1 m_1}{R_1(\beta)} \right) \left(\frac{R_{d1}(a_1^2 R_2 + 2a_1 a_2 R_2 + a_2^2 (R_{d2} m_2^2 + R_2) + R_1)}{\beta} \right) \left(\frac{-a_1 a_2 R_{d2}^2 m_1 m_2}{\beta} \right) \left(\frac{-a_1 m_1 R_2^2 (a_1 + a_2)}{\beta} \right) \\ \left(\frac{a_2 m_2}{R_1(\beta)} \right) \left(\frac{-a_1 a_2 R_{d1}^2 m_1 m_2}{\beta} \right) \left(\frac{R_{d2}(a_1^2 (R_{d1} m_1^2 + R_2) + 2a_1 a_2 R_2 + a_2^2 R_2 + R_1)}{\beta} \right) \left(\frac{-a_2 R_2^2 m_2 (a_1 + a_2)}{\beta} \right) \\ \left(\frac{(a_1 + a_2)}{R_1(\beta)} \right) \left(\frac{-a_1 R_{d1}^2 m_1 (a_1 + a_2)}{\beta} \right) \left(\frac{-a_2 R_{d2}^2 m_2 (a_1 + a_2)}{\beta} \right) \left(\frac{R_2 (a_1^2 R_{d1} m_1^2 + a_2^2 R_{d2} m_2^2 + R_1)}{\beta} \right) \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{A} = (S_{11} + S_{12}MS_{21})F$$

$$\mathbf{A} = \left(\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} + [(a_1 + a_2) \quad 0 \quad 0 \quad 0][M] \begin{bmatrix} (-a_1 - a_2) \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \right) \left(\frac{1}{C_1} \right)$$

$$\mathbf{A} = \left[\left(\frac{1}{C_1} \right) \frac{(-a_1 - a_2)^2}{\beta} \right]$$

$$\mathbf{B} = (S_{13} + S_{12}MS_{23})$$

$$\mathbf{B} = \left(\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} + [(a_1 + a_2) \quad 0 \quad 0 \quad 0][M] \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \right)$$

$$\mathbf{B} = \left[\frac{(a_1 + a_2)}{\beta} \right]$$

$$\mathbf{C} = (S_{31} + S_{32}MS_{21})F$$

$$\mathbf{C} = \left(\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ m_1 a_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ m_2 a_2 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} [M] \begin{bmatrix} (-a_1 - a_2) \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \right) \left[\frac{1}{C_1} \right]$$

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} \left(\frac{1}{C_1} \right) \frac{-a_1 m_1 (a_1 + a_2)}{R_1(\beta)} \\ \left(\frac{1}{C_1} \right) \frac{-a_1 m_1 (a_1 + a_2)}{\beta} \\ \left(\frac{1}{C_1} \right) \frac{-a_2 m_2 (a_1 + a_2)}{R_1(\beta)} \\ \left(\frac{1}{C_1} \right) \frac{-a_2 m_2 (a_1 + a_2)}{\beta} \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{D} = (S_{33} + S_{32}MS_{23})$$

$$\mathbf{D} = \left(\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ m_1 a_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ m_2 a_2 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} [M] \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \right)$$

$$\mathbf{D} = \begin{bmatrix} \frac{a_1 m_1}{R_1(\beta)} \\ \frac{a_1 m_1}{\beta} \\ \frac{a_2 m_2}{R_1(\beta)} \\ \frac{a_2 m_2}{\beta} \end{bmatrix}$$

Sustituyendo los vectores **A**, **B**, **C** y **D** del sistema de conmutación en la ecuación de estado (3.12).

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{B}\mathbf{u}$$

$$[f_{14}] = \left[\left(\frac{1}{C_1} \right) \frac{(-a_1 - a_2)^2}{\beta} \right] [q_{14}] + \left[\frac{(a_1 + a_2)}{\beta} \right] [e_1]$$

La ecuación de salida (3.13), del sistema concierne a cada uno de los interruptores.

$$\mathbf{y} = \mathbf{C}\mathbf{x} + \mathbf{D}\mathbf{u}$$

$$\begin{bmatrix} e_8 \\ f_8 \\ e_{12} \\ f_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \left(\frac{1}{C_1} \right) \frac{-a_1 m_1 (a_1 + a_2)}{R_1(\beta)} \\ \left(\frac{1}{C_1} \right) \frac{-a_1 m_1 (a_1 + a_2)}{\beta} \\ \left(\frac{1}{C_1} \right) \frac{-a_2 m_2 (a_1 + a_2)}{R_1(\beta)} \\ \left(\frac{1}{C_1} \right) \frac{-a_2 m_2 (a_1 + a_2)}{\beta} \end{bmatrix} [q_{14}] + \begin{bmatrix} \frac{a_1 m_1}{R_1(\beta)} \\ \frac{a_1 m_1}{\beta} \\ \frac{a_2 m_2}{R_1(\beta)} \\ \frac{a_2 m_2}{\beta} \end{bmatrix} [e_1]$$

De manera igual obtenemos el modelado matemático en BG, se deriva la simulación correspondiente en los dos software Simnon y 20-sim, del sistema.

3.7.1 Simulación en Simnon de un Circuito Rectificador de Tap Central

El circuito más simple denominado *rectificador de onda completa*. Los *diodos* rectificadores trabajan en la región directa para permitir el paso de unos ciclos y en la región inversa para bloquear los otros, evitando que entren en la región de ruptura.

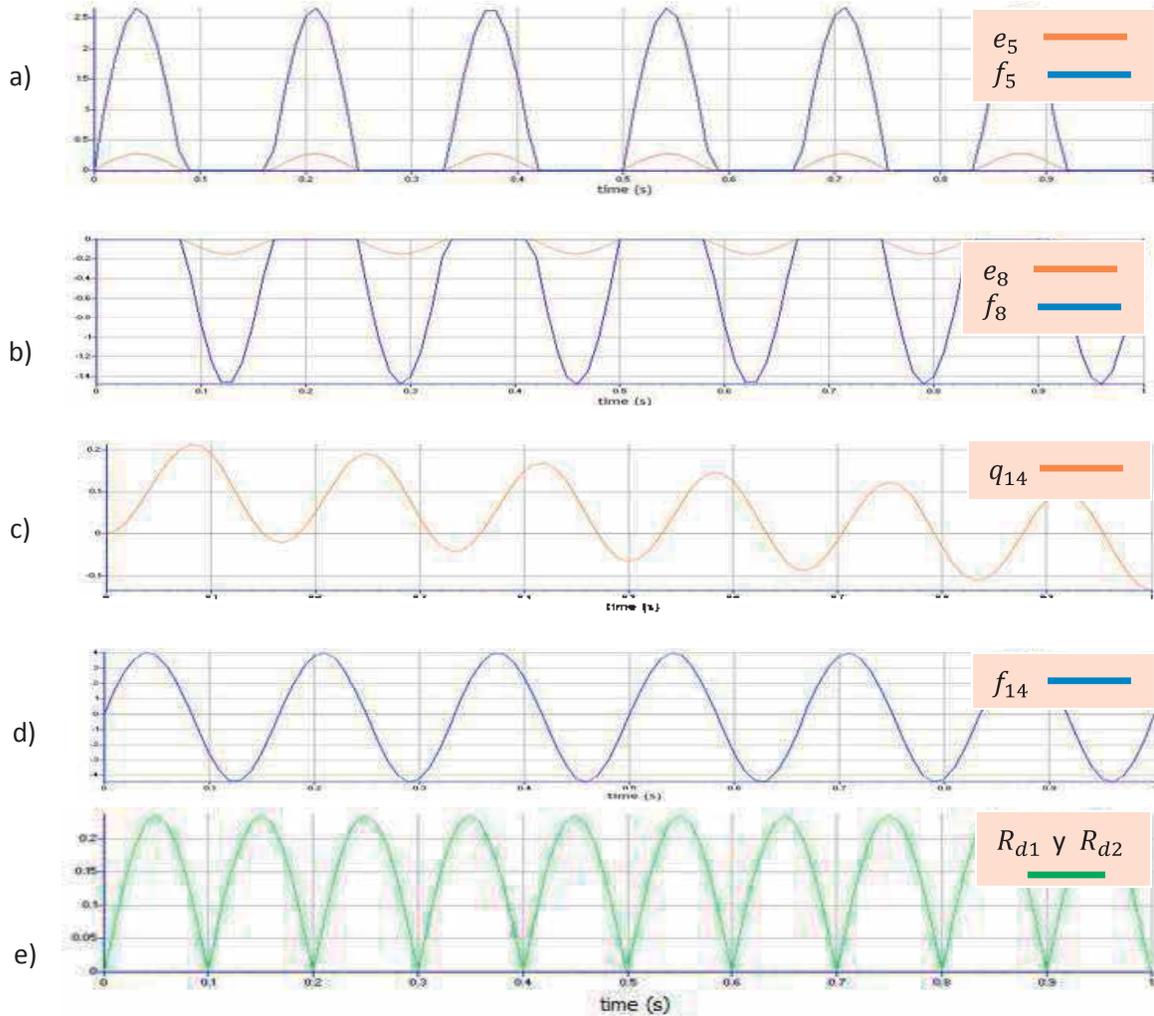


Figura 3.32 Rectificador de onda completa. a) e_5, f_5 Corresponden al D_1 ; b) e_8, f_8 corresponden al D_2 ; c) Estado C_1 Capacitivo q_{14} ; d) Flujo f_{14} a través de C_1 . e) Señal Rectificada con Tap-Central.

Durante el intervalo de tiempo en el que en el primario del transformador se aplica un semiciclo positivo, aparece una tensión positiva entre el punto A del secundario y la toma intermedia, mientras que en la terminal B del secundario es negativo respecto a la toma intermedia. La tensión positiva del punto A intentara hacer circular una corriente por el *diodo* D_1 en sentido directo. Idealmente el modelo equivalente sea un cortocircuito. El voltaje negativo de B intentara hacer circular una corriente en sentido inverso por el diodo D_2 , por lo que este equivaldrá a un circuito abierto.

Durante el intervalo en el que se aplica al primario un semiciclo negativo, aparece en la terminal A una tensión negativa respecto a la toma intermedia que provoca que D_1 aparezca como circuito abierto. Sin embargo,

en este caso, la terminal B será positiva respecto a la toma central, por lo que originara una corriente positiva por el diodo D_2 en sentido directo logrando conducir. Esto continuara constantemente mientras la forma de onda cambie de un semiciclo positivo a uno negativo, mientras que en el estado del sistema capacitivo se mantienen ambos sentidos de la señal senoidal, que procede a la activación de cada uno de los diodos D_1 y D_2 provocando que se manifieste la forma de onda en el capacitor C_1 se va atenuando conforme el switcheo se activa y/o desactivan observe la fig. 3.32c, obteniendo una forma senoidal del flujo como se muestra en la imagen 3.32d.

Logrando la rectificación de la señal de onda completa con Tap-central como se muestra en la figura 3.32e, conforme cada uno de los diodos a través de R_{d1} y R_{d2} .

3.7.2 Simulación en 20-sim de un Circuito Rectificador de Tap Central

Implementación en el software 20-sim mejorando la representación determinamos un funcionamiento adecuado como se muestra en la figura 3.33.

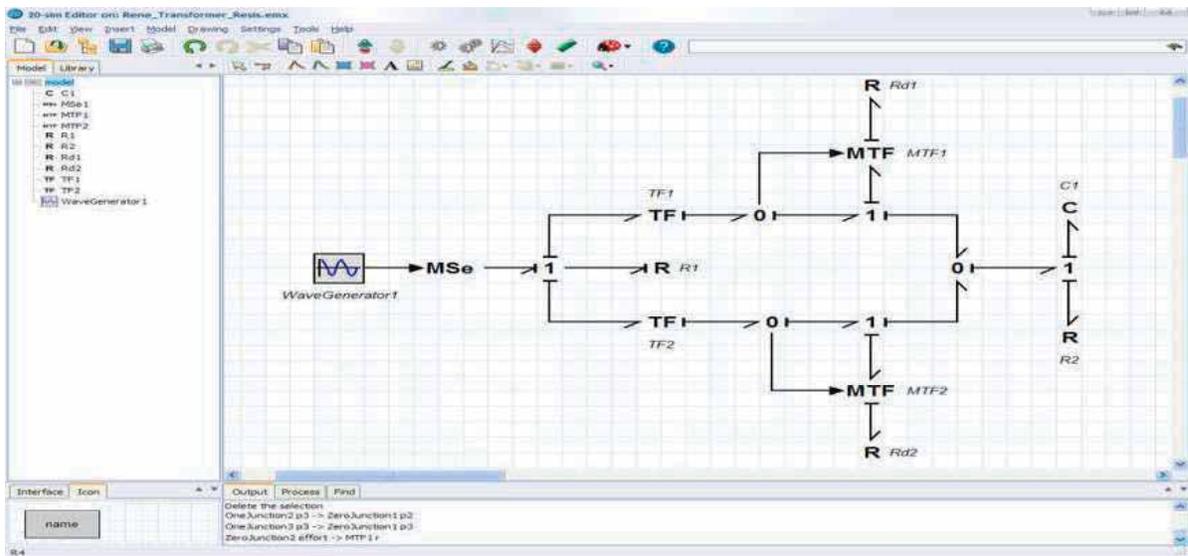


Figura 3.33 Representación en BG Rectificador de Media Onda.

La representación en BG se agregó una *union-0* después de cada uno de los Transformadores (TF_1 , TF_2), para tomar el *bonds activo*, recordando que la *union-0* proporciona un esfuerzo permitiendo activar cada uno de los diodos

(MTF_1 , MTF_2), manteniendo la forma de onda senoidal que circula en las uniones correspondientes logrando un adecuado funcionamiento.

El comportamiento es el mismo que se presentó con el software Simnon, mientras que en 20-sim de una manera sencilla se logra analizar más fácilmente como se muestra en la figura 3.34.

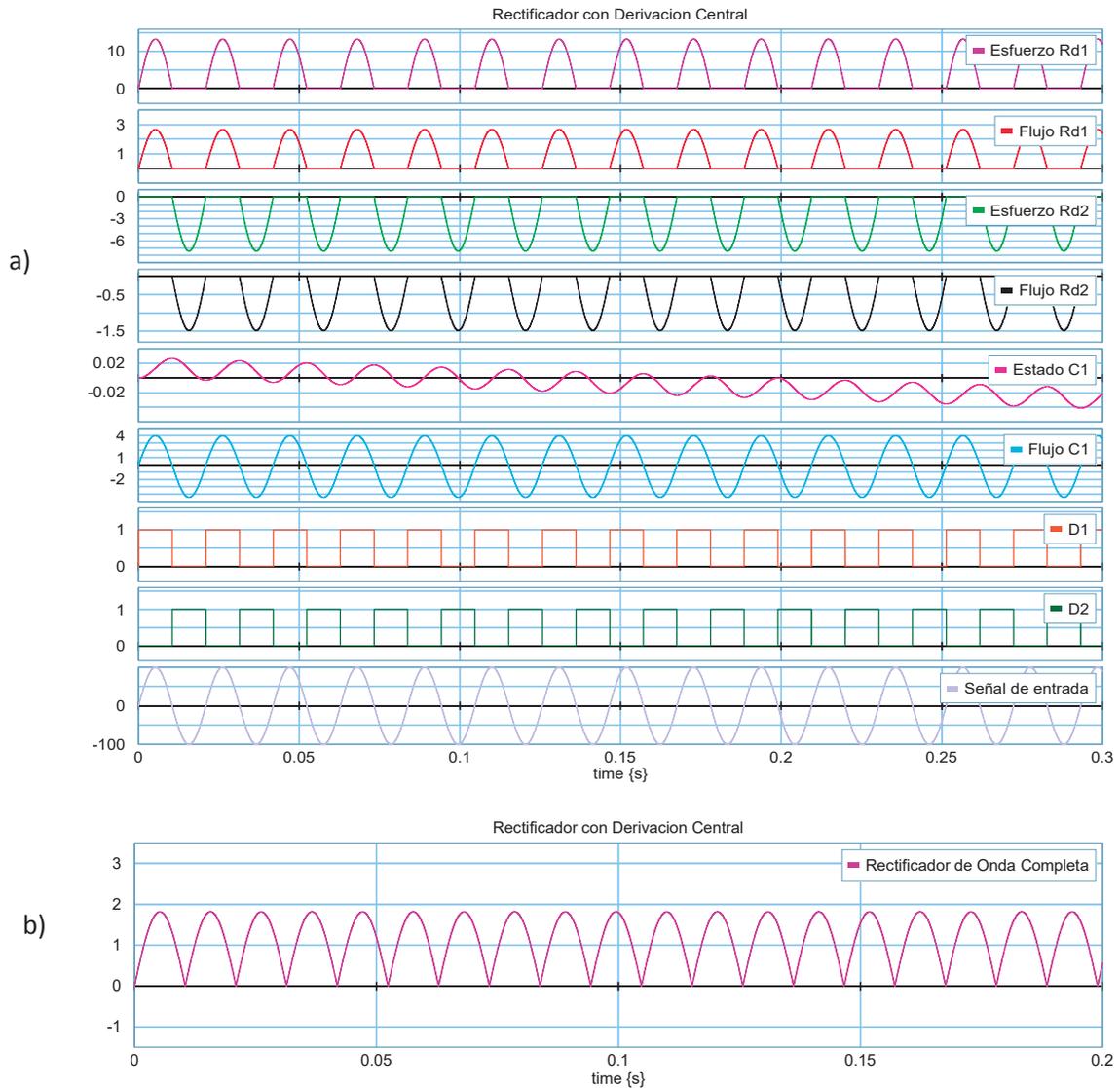


Figura 3.34 Representación en BG del rectificador de media onda. a) Activación de los diodos al D_1 y D_2 así como las variables de estado correspondiente al esfuerzo y flujo R_{d1} , R_{d2} y C_1 ; b) Rectificador de onda completa.

Por último se concreta el funcionamiento del rectificador con derivación central es el adecuado como se muestra en la figura 3.34b, lo cuál garantiza la

representación gráfica de los estados que analizamos detalladamente los parámetros que se obtienen matemáticamente en Simnon.

3.8 Trayectoria Causal

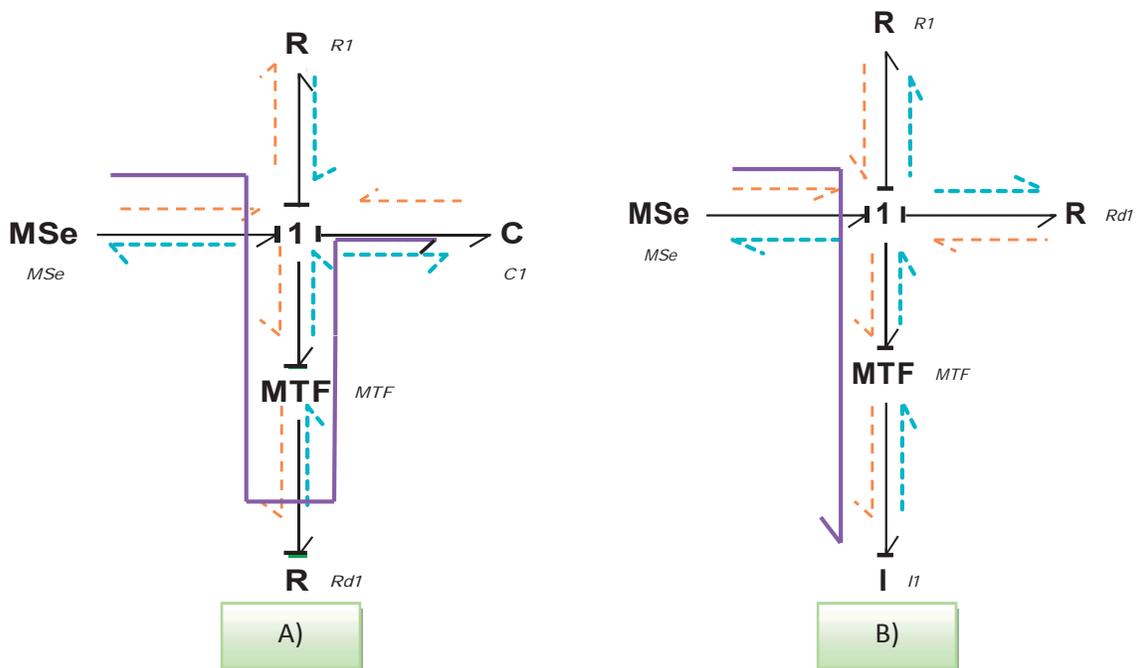
La trayectoria Causal (TC), garantiza un buen funcionamiento en el lenguaje de Bond Graph se deben considerar los siguientes parámetros.

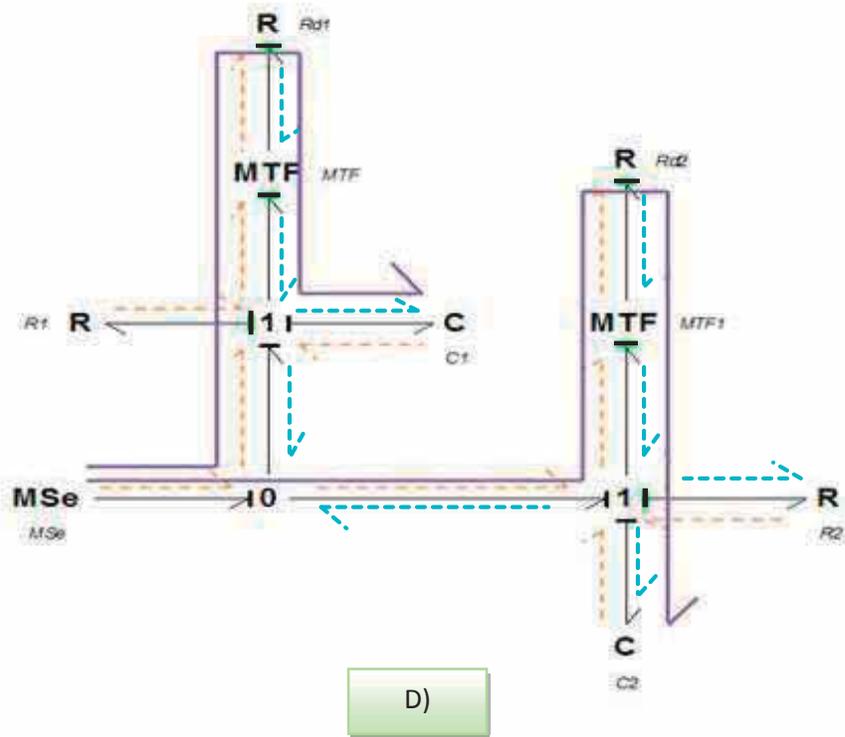
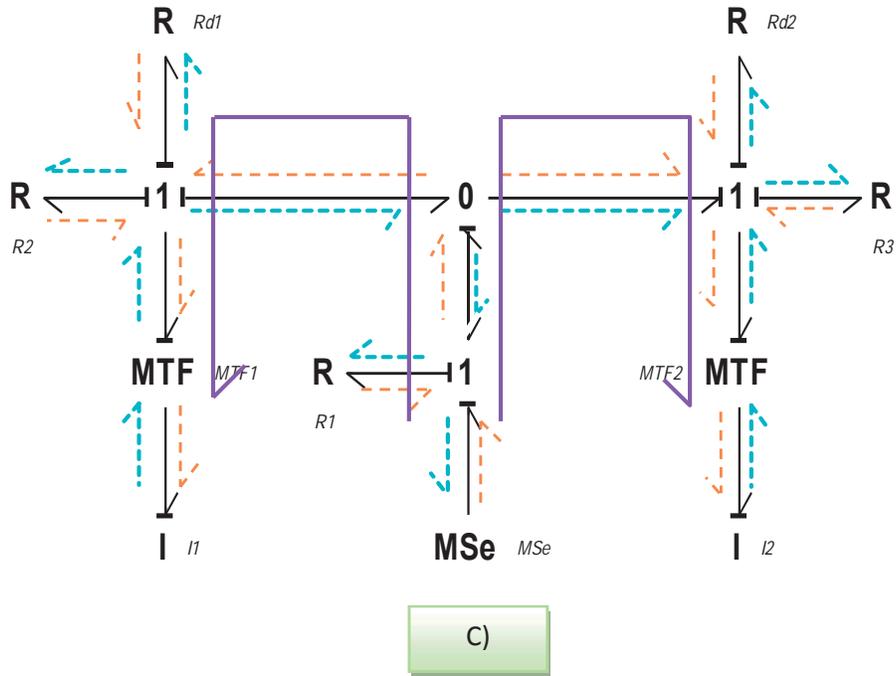
Por medio de la matriz de unión:
$$\begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} \\ S_{21} & S_{22} & S_{23} \\ S_{31} & S_{32} & S_{33} \end{bmatrix}$$

donde,

- Los vectores claves S_{13} ó S_{23} deben tener un estado m_n que multiplique a los vectores.
- El vector **B**, se tiene que encontrar m_n multiplicando para avalar la rectificación de los n diodos existan en el sistema.

En la figura 3.35, se muestra el funcionamiento adecuado del modelado de sistemas en conmutación por medio del *esfuerzo* (- - - - -) y *flujo* (- - - - -) como resultado obtenemos la trayectoria causal (———).





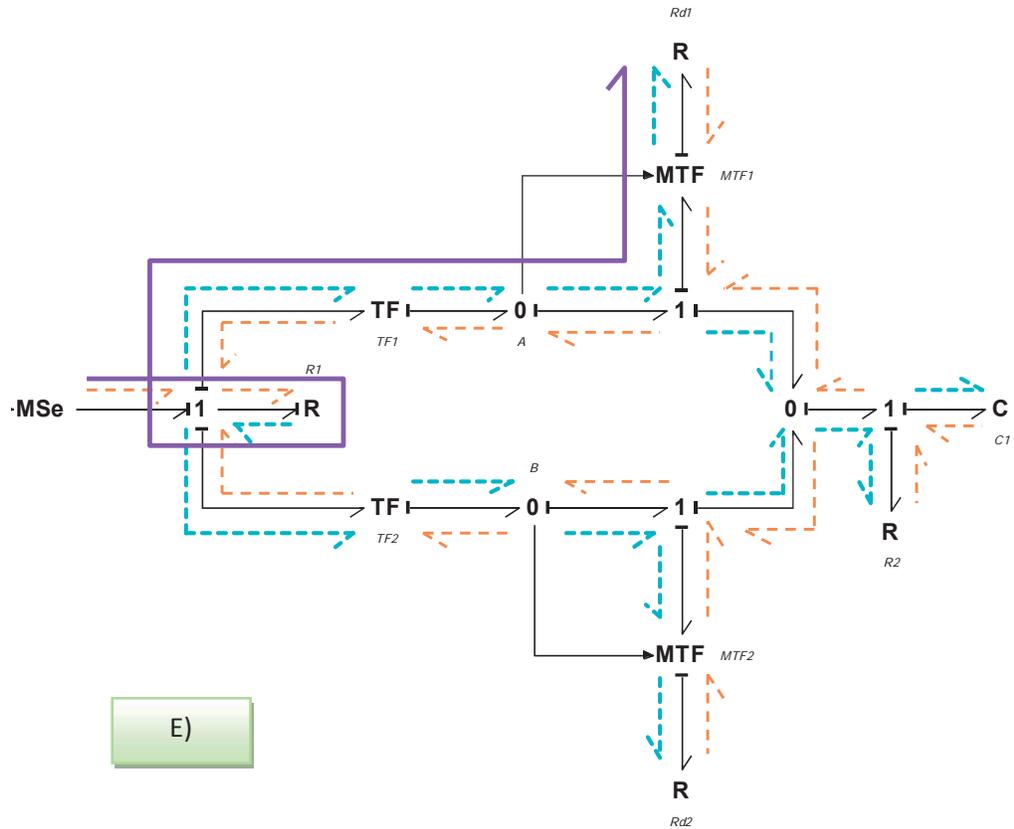


Figura 3.35 Trayectoria causal (TC). a) Circuito con diodo con carga RC; b) Circuito con diodo con carga RL; c) diodo caso-I con carga RL; d) diodo caso- II con carga RC; e) Rectificador Tap Central con carga RC.

Finalmente considerando la trayectoria causal y la representación en Bond Graph, se contempla en el capítulo IV estas recomendaciones las cuáles dará una respuesta dinámica del sistema, así como otro componente llamado *tiristor*.

Capítulo 4

Rectificadores Controlados

Un *tiristor* es un dispositivo semiconductor con tres terminales: ánodo, cátodo y compuerta. En la figura 4.1, se muestra el símbolo correspondiente.

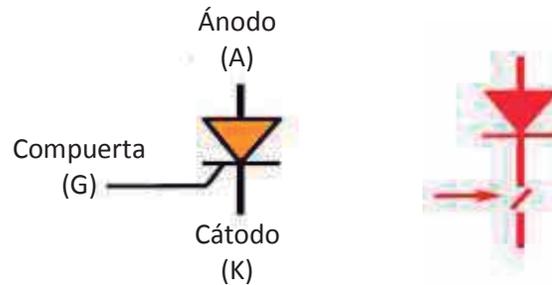


Figura 4.1 Símbolo del tiristor.

Cuenta con la misma propiedad del *diodo* a diferencia de que el *tiristor* es controlado por un disparo en la compuerta donde empieza a conducir logrando controlar la región de operación. Para este caso, el ángulo de disparo lo relacionamos a partir de que el voltaje activará el *tiristor* sin sobrepasar el voltaje máximo.

Los tiristores tienen menores pérdidas por conducción en estado encendido y mayor especificación de manejo de potencia, existiendo diversos comportamientos en el encendido y apagado, como son:

1. Tiristores controlados por fase (SCR).
2. Tiristores de tríodo bidireccional (TRIAC).
3. Tiristores apagados por compuerta (GTO).

Entre otros tipos de tiristores se tiene control adecuado en el sistema, para nuestro estudio, se vislumbra el potencial del *tiristor*.

4.1 Convertidor controlado por dos fases (Bifásico)

Observemos el circuito de la figura 4.2, con una carga resistiva controlado por dos fuentes con diferentes ángulos de disparo en cada uno de los tiristores. Por parte de las fuentes durante el medio ciclo positivo del

voltaje de alimentación, el ánodo del primer tiristor T_1 , es positivo con respecto a su cátodo por lo que se encuentra en *polarización directa*, cuando se dispara en un $\omega t = \alpha$, el tiristor conduce a través de la carga que comparte con T_2 de tal forma que T_1 conduce de la misma manera que T_2 . Cuando el voltaje de entrada comienza a decaer negativamente, el ánodo del tiristor es negativo con respecto a su cátodo indicando que se encuentra en *polarización inversa*.

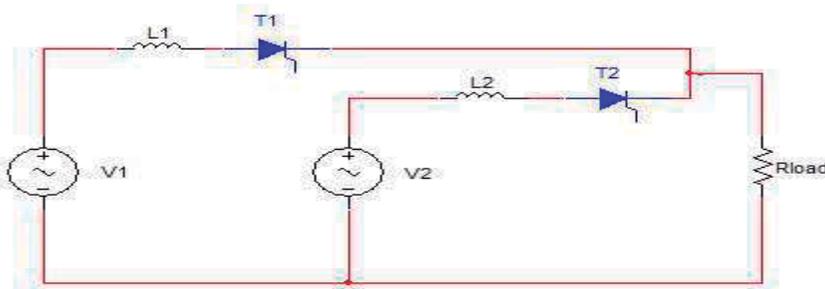


Figura 4.2 Circuito de Conmutación controlado por dos fases.

Para observar detalladamente el cambio y la respuesta en cada uno de los tiristores T_1 y T_2 , es recomendable que el voltaje de entrada se encuentre defasado un ángulo α distinto entre cada fuente, así como del disparo en la compuerta del tiristor. De lo contrario observaremos el mismo comportamiento en cada una de las fuentes y de los tiristores logrando que $T_1 = T_2$, por lo que no sería una forma adecuada del sistema dinámico que se pretende determinar y tener un control de T_1, T_2 .

$$\text{Cuando } \begin{cases} V_1 > 0 & T_1 \rightarrow ON \\ V_2 > 0 & T_2 \rightarrow ON \end{cases}$$

4.1.1 Representación en BG del Convertidor controlado por dos fases (Bifásico)

De acuerdo al procedimiento-1 del capítulo anterior se determina el *bond* correspondiente del sistema, la modulación del *tiristor* es de la misma manera que la del diodo, la ventaja es de tener un control sobre la compuerta a un determinado ángulo de disparo activando cada tiristor que se encuentre dentro del sistema de conmutación.

Tomando la causalidad correspondiente, la numeración en cada uno de los *bonds*, la trayectoria causal logrando el modelado dinámico del sistema.

Identificando los elementos para el análisis adecuado en bases a los siguientes vectores claves obtendremos la respuesta del estado dinámico en los puntos donde la respuesta de los *bonds* determinaremos el comportamiento conforme al ángulo α de disparo a través de los *tiristores* (T_1, T_2) graficaremos conforme cada uno de ellos si en realidad el sistema es controlable a diferencia del *diodo* lo cual puede conducir a un simple cambio de temperatura del medio ambiente y no garantiza un control del sistema.

Establecemos los parámetros de entrada de la figura 4.2, $u = \begin{bmatrix} e_1 \\ e_6 \end{bmatrix}$, salida $y = \begin{bmatrix} e_2 \\ f_2 \\ e_7 \\ f_7 \end{bmatrix}$ determina el estado de cada tiristor conforme a la resistencia interna de los interruptores controlados, incluyendo los vectores claves del sistema $x(t), \dot{x}(t), z(t), D_{in}$ y D_{out} , por lo tanto:

$$D_{in} = \begin{bmatrix} f_2 \\ f_7 \\ f_{11} \end{bmatrix} \quad D_{out} = \begin{bmatrix} e_2 \\ e_7 \\ e_{11} \end{bmatrix} \quad x = \begin{bmatrix} P_5 \\ P_{10} \end{bmatrix} \quad \dot{x} = \begin{bmatrix} e_5 \\ e_{10} \end{bmatrix} \quad z = \begin{bmatrix} f_5 \\ f_{10} \end{bmatrix}$$

Se completa la matriz de unión que comprende al modelado del convertidor controlado por fase.

$$\begin{bmatrix} e_5 \\ e_{10} \\ f_2 \\ f_7 \\ f_{11} \\ e_2 \\ f_2 \\ e_7 \\ f_7 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -m_1 & 0 & -m_1 & m_1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -m_2 & -m_2 & 0 & m_2 \\ \hline m_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & m_2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ m_1 & m_2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \hline 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ m_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & m_2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_5 \\ f_{10} \\ e_2 \\ e_7 \\ e_{11} \\ e_1 \\ e_6 \end{bmatrix}$$

Para que la matriz de unión sea la adecuada se aplican las propiedades $P1, P2$ determinando el vector apropiado por lo que partimos de los siguientes

vectores **L** y **F** para determinar el cálculo de las matrices **A**, **B**, **C**, **D** y **M**. Que nos permite modelar el estado dinámico a través de Simpon gracias a las ecuaciones.

$$D_{out} = LD_{in} \quad Z = Fx$$

$$\begin{bmatrix} e_2 \\ e_7 \\ e_{11} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_{d1} & 0 & 0 \\ 0 & R_{d2} & 0 \\ 0 & 0 & R_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_2 \\ f_7 \\ f_{11} \end{bmatrix} \quad \begin{bmatrix} f_5 \\ f_{10} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{L_1} & 0 \\ 0 & \frac{1}{L_2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_5 \\ P_{10} \end{bmatrix}$$

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

donde, **M** es igual al vector **L** considerando que el vector $S_{22} = 0$.

$$\mathbf{A} = (S_{11} + S_{12}MS_{21})F$$

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} -m_1^2(R_{d1} + R_1) & -(m_1m_2R_1) \\ -(m_1m_2R_1) & -m_2^2(R_{d2} + R_1) \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{B} = (S_{13} + S_{12}MS_{23})$$

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} m_1 & 0 \\ 0 & m_2 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{C} = (S_{31} + S_{32}MS_{21})F$$

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} \left(\frac{1}{L_1}\right)(m_1R_{d1}) & 0 \\ \left(\frac{1}{L_1}\right)(m_1) & 0 \\ 0 & \left(\frac{1}{L_2}\right)(m_2R_{d2}) \\ 0 & \left(\frac{1}{L_2}\right)(m_2) \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{D} = (S_{33} + S_{32}MS_{23})$$

$$\mathbf{D} = [0]$$

Partiendo del estado dinámico se sustituyen las variables obtenidas por el sistema que se representa a través de la siguiente ecuación (3.12).

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{Ax} + \mathbf{Bu}$$

$$\begin{bmatrix} e_5 \\ e_{10} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -m_1^2(R_{d1} + R_1) & -(m_1 m_2 R_1) \\ -(m_1 m_2 R_1) & -m_2^2(R_{d2} + R_1) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_5 \\ P_{10} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} m_1 & 0 \\ 0 & m_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e_1 \\ e_6 \end{bmatrix}$$

La salida del estado dinámico corresponde al estado de activación de cada *tiristor* conforme la ecuación (3.13) muestra la pausa, para el análisis del sistema.

$$\mathbf{y} = \mathbf{C}\mathbf{x} + \mathbf{D}\mathbf{u}$$

$$\begin{bmatrix} e_2 \\ f_2 \\ e_7 \\ f_7 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \left(\frac{1}{L_1}\right)(m_1 R_{d1}) & 0 \\ \left(\frac{1}{L_1}\right)(m_1) & 0 \\ 0 & \left(\frac{1}{L_2}\right)(m_2 R_{d2}) \\ 0 & \left(\frac{1}{L_2}\right)(m_2) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_5 \\ P_{10} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e_1 \\ e_6 \end{bmatrix}$$

Una vez logrando obtener las ecuaciones de Estado dinámico se parte a la correspondiente simulación en base a las ecuaciones matemáticas del sistema de igual manera se comparan el modelado a través de dos software las cuales son Simnon y 20-sim.

4.1.2 Simulación en Simnon del Convertidor controlado por dos fases (Bifásico)

En la figura 4.2, se representa un rectificador controlado de media onda en paralelo con carga resistiva, el cual, como se puede observar corresponde a un rectificador de media onda conformado por dos fuentes de alimentación independiente, con lo que al analizar una fuente se observará el mismo análisis en la segunda fuente para este caso se ha sustituido el diodo por un tiristor.

En la primer fuente de alimentación, encontramos que a partir de un instante $\alpha=0$ la tensión de alimentación comienza el semiciclo positivo, con lo que queda polarizado directamente puesto que el tiristor permanece bloqueado hasta que reciba un pulso de disparo de puerta.

El ángulo de disparo de cada uno de los tiristores se opto por aplicar un voltaje a la compuerta para que se activara sin sobrepasar el voltaje de

alimentación, es decir si el voltaje máximo es de 100v, lo consideramos como un ángulo de 90°. El disparo sea el correspondiente de igual manera para otro ángulo de activación como se muestra en la tabla 4.1.

Ángulo de Disparo. (0° a 180°)	Voltaje de Alimentación. (0v a $v_s=100v$)	Voltaje de Disparo para los tiristores.
0°	0	0
45°	50	50
90°	100	100

Tabla 4.1 Relación ángulo-voltaje de disparo de activación.

Se aplica un pulso de disparo al tiristor, este se activará en conducción y el voltaje v_s aparecerá aplicado a la carga permaneciendo durante el resto del semiciclo positivo en cada uno de las dos fuentes, hasta el instante en el que la corriente se anula y por lo tanto se bloquea hasta el siguiente semiciclo positivo. En la figura 4.3, se ilustra el comportamiento de cada uno de los tiristores con diferente ángulo de disparo.

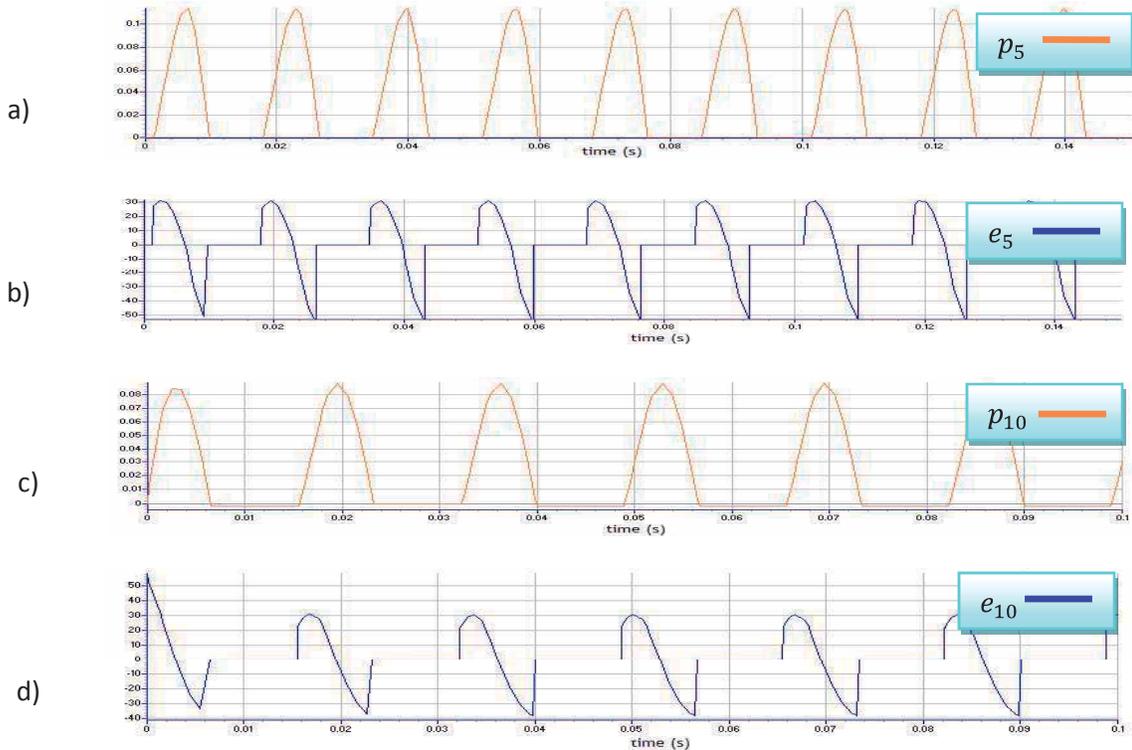


Figura 4.3 Estado del controlado por dos fases (Bifásico). a) Estado de Inercia p_5 ; b) Esfuerzo e_5 ; c) Inercia p_{10} ; d) Esfuerzo e_{10} .

El voltaje de disparo para los *tiristores* T_1 es de 50v, T_2 es de 20 que corresponden a un ángulo de activación equivalente a T_1 de 45° y T_2 de 18° .

En la figura 4.4, se observa la activación de los T_1 y T_2 analizando el comportamiento de la resistencia interna de cada uno de ellos mostrando el esfuerzo y flujo de los *bonds* correspondientes.

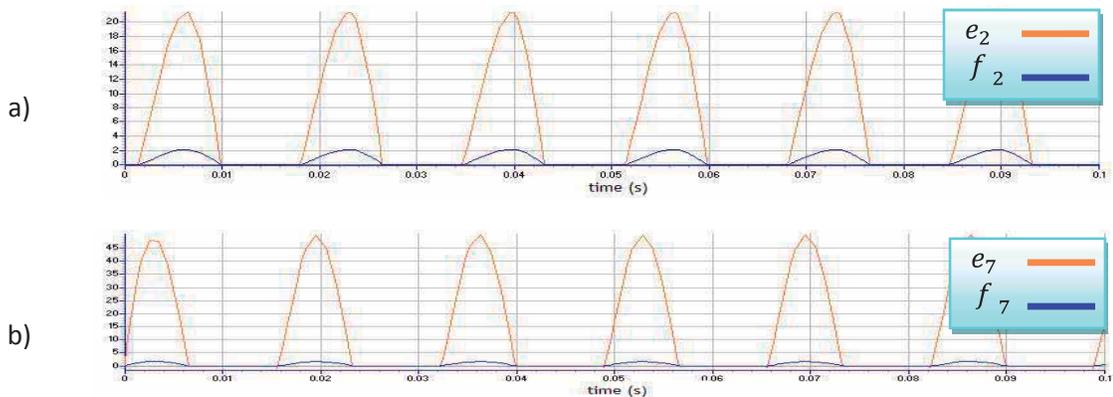


Figura 4.4 Control de Fase de disparo en cada uno de los tiristores. a) Estado Rd1; b) Estado Rd2.

Recordemos que el voltaje de alimentación de V_1 con respecto a V_2 esta defasado 120° debido a que si se deja de la misma manera $V_1=V_2$ tendríamos el mismo comportamiento aunque el ángulo de disparo en la compuerta activara a los interruptores, con esto aparte de tener un control de los tiristores, observamos el desfase de las fuentes como se observa en la figura 4.4.

Conforme la representación en Simnon nos damos cuenta cuando se activan los T_1 y T_2 ahora para comprobar las graficas en 20-sim a partir de la Bond Graph de sistema.

4.1.3 Simulación en 20-sim del Convertidor controlado por dos fases (Bifásico)

Vaciando el BG correspondiente se realiza el modelado en 20-sim, como se ilustra en la figura 4.5, se puede observando el estado dinámico en cada uno de los bonds los cuales permitirá demostrar los resultados mostrados en Simnon, acertando con lo que en algunos libros de electrónica de potencia

nos muestran la respuesta con respecto a Bond Graph se analiza de una manera más sencilla.

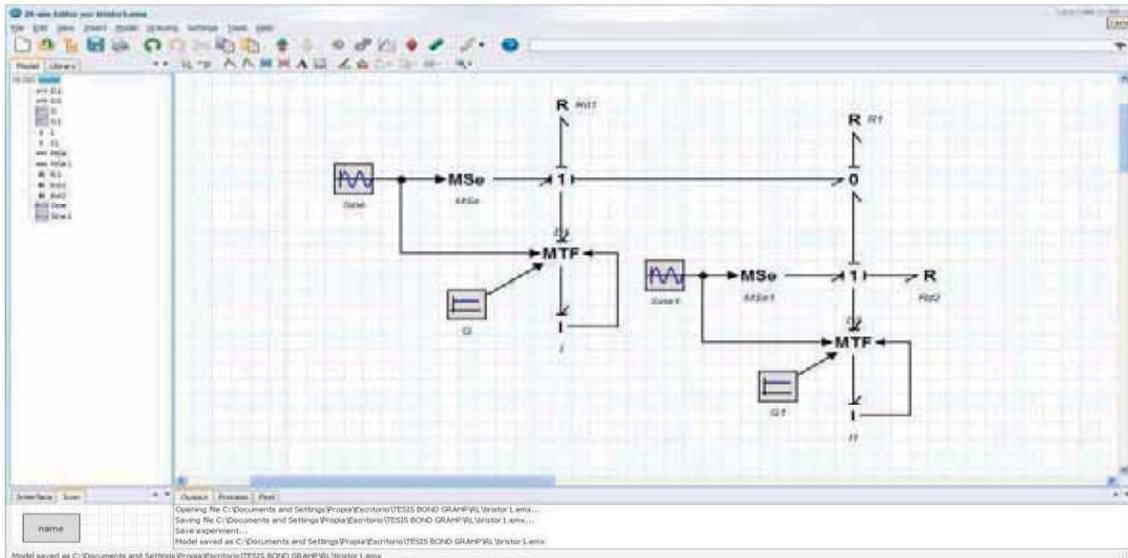


Figura 4.5 Simulación en 20-sim del convertidor controlado por dos fases (Bifásico).

La imagen 4.6, muestra es estado de correspondiente a la primer fuente de alimentación con respecto al T_1 es decir, que el $\alpha = 0^\circ$ por lo que la corriente se mantiene en un instante en el ciclo positivo y el *tiristor* deberá conducir aún cuando la señal de entrada empieza a decrecer, debido a la energía almacenada en el inductor se mantiene un instante conduce una pequeña parte del ciclo negativo. Dejando pasar solamente una parte del ciclo con respecto a la *resistencia interna* del T_1 en relación al esfuerzo y flujo en R_{d1} .

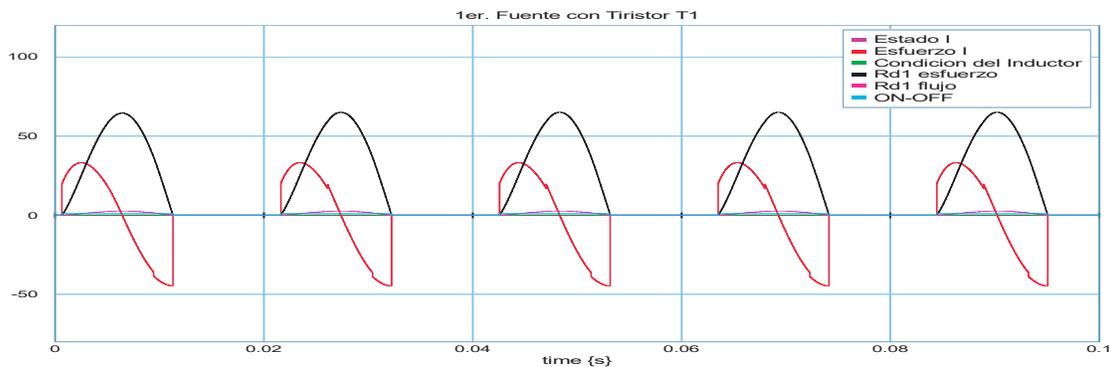


Figura 4.6 Rectificador controlado de media Onda con carga R.

Las siguientes graficas de la figura 4.7, muestra el estado dinámico de cada uno de *tiristores* basado en el rectificador de media onda debido a que es la misma respuesta con diferente ángulo de disparo y desfasado cada una de las fuentes de alimentación.

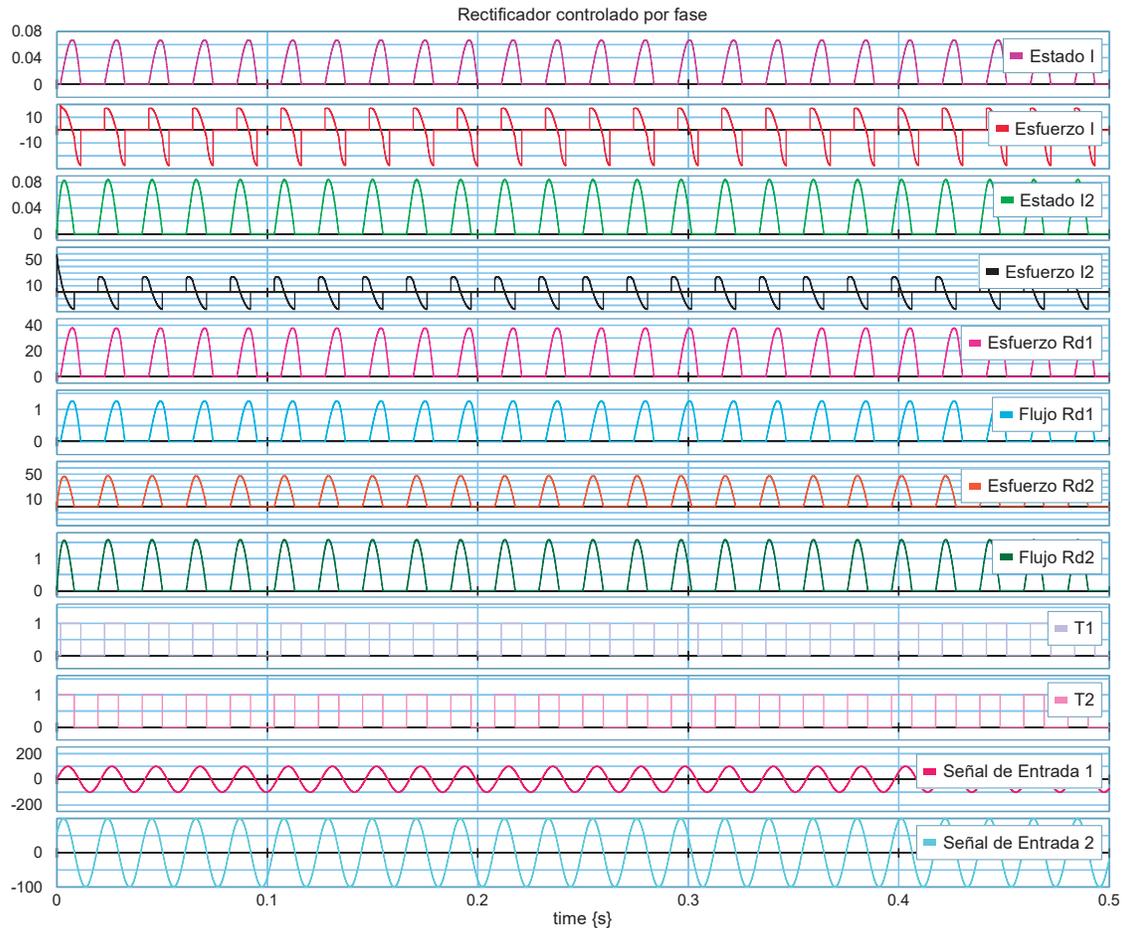


Figura 4.7 Estado Dinámico del Rectificador controlado por dos fases (Bifásico).

4.2 Convertidores Trifásico de Media Onda con carga Resistiva

Este tipo de convertidor trifásico proporciona un voltaje mayor a la salida por esta razón los convertidores trifásicos para la alimentación de diversas cargas como la de *Motores de CD*, propulsores de velocidad variables de alta potencia como se muestra en la figura 4.8.

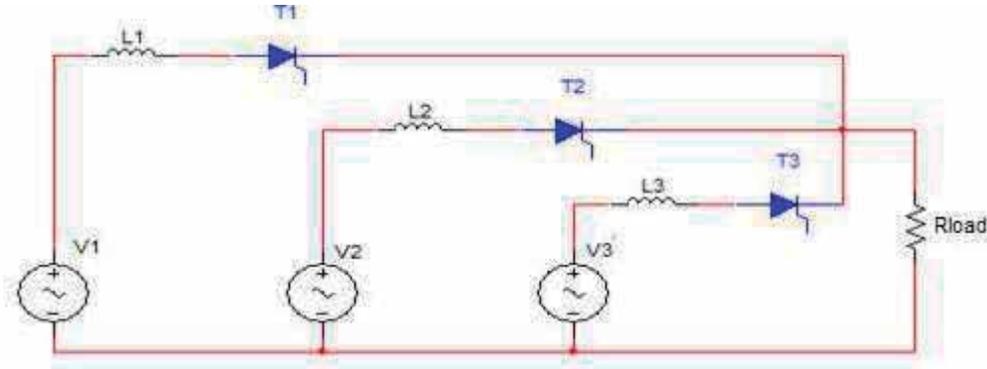


Fig. 4.8 Convertidor Trifásico de Media Onda.

Para la activación de disparo en cada uno de los tiristores es de la siguiente manera:

1. Se genera un pulso adecuado en la señal en cada una de las fases de alimentación cuando el voltaje sea positivo retardando el pulso el ángulo aplicado entre la compuerta y cátodo a través de T_1 .
2. Se generan dos pulsos más para cada uno de los siguientes tiristores T_2 y T_3 respectivamente.
3. Los voltajes de línea de cada alimentación con respecto a neutro se encuentran defasados 120° entre cada una de las fuentes. Esto genera una característica importante, la frecuencia de los rizados en el voltaje de salida es mayor a comparación con los demás convertidores monofásicos.

4.2.1 Representación en Bond Graph del Convertidores Trifásico de Media Onda con carga Resistiva

De la misma manera que el convertidor controlado por fase de la figura 4.2, localizamos los vectores claves de estado dinámico en base a la respuesta en cada bond correspondiente al análisis pertinente.

$$x = \begin{bmatrix} P_5 \\ P_{10} \\ P_{15} \end{bmatrix} \quad \dot{x} = \begin{bmatrix} e_5 \\ e_{10} \\ e_{15} \end{bmatrix} \quad z = \begin{bmatrix} f_5 \\ f_{10} \\ f_{15} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{L_1} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{L_2} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{L_3} \end{bmatrix}$$

$$D_{in} = \begin{bmatrix} f_2 \\ f_6 \\ f_{11} \\ f_{16} \end{bmatrix} \quad D_{out} = \begin{bmatrix} e_2 \\ e_6 \\ e_{11} \\ e_{16} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_{d1} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & R_{d2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & R_{d3} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & R_L \end{bmatrix}$$

$$u = \begin{bmatrix} e_1 \\ e_7 \\ e_{12} \end{bmatrix} \quad y = \begin{bmatrix} e_2 \\ f_2 \\ e_6 \\ f_6 \\ e_{11} \\ f_{11} \end{bmatrix}$$

Los vectores anteriores muestran las variables correspondientes a $x(t)$, $\dot{x}(t)$, $z(t)$, D_{in} y D_{out} entrada u y salida y . Una vez determinado y vaciado las variables partimos relleno la matriz de unión para determinar la respuesta del convertidor trifásico de media onda.

$$\begin{bmatrix} e_5 \\ e_{10} \\ e_{15} \\ f_2 \\ f_6 \\ f_{11} \\ f_{16} \\ e_2 \\ f_2 \\ e_6 \\ f_6 \\ e_{11} \\ f_{11} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & -m_1 & 0 & 0 & -m_1 & m_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -m_2 & 0 & -m_2 & 0 & m_2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -m_3 & -m_3 & 0 & 0 & m_3 \\ \hline m_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & m_2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & m_3 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \hline m_1 & m_2 & m_3 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \hline 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ m_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & m_2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & m_3 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_5 \\ f_{10} \\ f_{15} \\ e_2 \\ e_6 \\ e_{11} \\ e_{16} \\ e_1 \\ e_7 \\ e_{12} \end{bmatrix}$$

Aplicando las propiedades $P1$, $P2$ determinando el vector apropiado por lo que partimos para el cálculo de las matrices **A**, **B**, **C**, **D** y **M**. Que nos permite modelar el estado dinámico.

donde, **M** es igual al vector **L** considerando que el vector $S_{22} = 0$.

$$A = (S_{11} + S_{12}MS_{21})F$$

$$A = \begin{bmatrix} -m_1^2(R_{d1} + R_L)\left(\frac{1}{L_1}\right) & -m_1m_2R_L\left(\frac{1}{L_2}\right) & -m_1m_3R_L\left(\frac{1}{L_3}\right) \\ -m_1m_2R_L\left(\frac{1}{L_1}\right) & -m_2^2(R_{d2} + R_L)\left(\frac{1}{L_2}\right) & -m_2m_3R_L\left(\frac{1}{L_3}\right) \\ -m_1m_3R_L\left(\frac{1}{L_1}\right) & -m_2m_3R_L\left(\frac{1}{L_2}\right) & -m_3^2(R_{d3} + R_L)\left(\frac{1}{L_3}\right) \end{bmatrix}$$

$$B = (S_{13} + S_{12}MS_{23})$$

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} m_1 & 0 & 0 \\ 0 & m_2 & 0 \\ 0 & 0 & m_3 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{C} = (S_{31} + S_{32}MS_{21})F$$

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} \frac{1}{L_1}(m_1R_{d1}) & 0 & 0 \\ \frac{1}{L_1}(m_1) & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{L_1}(m_2R_{d2}) & 0 \\ 0 & \frac{1}{L_2}(m_2) & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{L_3}(m_3R_{d3}) \\ 0 & 0 & \frac{1}{L_3}(m_3) \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{D} = (S_{33} + S_{32}MS_{23})$$

$$\mathbf{D} = [0]$$

Los estados dinámicos se sustituyen para representar el estado dinámico.

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{Ax} + \mathbf{Bu}$$

$$\begin{bmatrix} e_5 \\ e_{10} \\ e_{15} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -m_1^2(R_{d1} + R_L)\left(\frac{1}{L_1}\right) & -m_1m_2R_L\left(\frac{1}{L_2}\right) & -m_1m_3R_L\left(\frac{1}{L_3}\right) \\ -m_1m_2R_L\left(\frac{1}{L_1}\right) & -m_2^2(R_{d2} + R_L)\left(\frac{1}{L_2}\right) & -m_2m_3R_L\left(\frac{1}{L_3}\right) \\ -m_1m_3R_L\left(\frac{1}{L_1}\right) & -m_2m_3R_L\left(\frac{1}{L_2}\right) & -m_3^2(R_{d3} + R_L)\left(\frac{1}{L_3}\right) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_5 \\ P_{10} \\ P_{15} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} m_1 & 0 & 0 \\ 0 & m_2 & 0 \\ 0 & 0 & m_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e_1 \\ e_7 \\ e_{12} \end{bmatrix}$$

El estado dinámico corresponde a la activación de cada *tiristor* donde muestra la pausa y análisis del sistema.

$$\mathbf{y} = \mathbf{Cx} + \mathbf{Du}$$

$$\begin{bmatrix} e_2 \\ f_2 \\ e_6 \\ f_6 \\ e_{11} \\ f_{11} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{L_1}(m_1R_{d1}) & 0 & 0 \\ \frac{1}{L_1}(m_1) & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{L_2}(m_2R_{d2}) & 0 \\ 0 & \frac{1}{L_2}(m_2) & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{L_3}(m_3R_{d3}) \\ 0 & 0 & \frac{1}{L_3}(m_3) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_5 \\ P_{10} \\ P_{15} \end{bmatrix} + [0] \begin{bmatrix} e_1 \\ e_7 \\ e_{12} \end{bmatrix}$$

A continuación se realiza la correspondiente simulación en base a las ecuaciones matemáticas del sistema de los modelos de comparación en Simnon y 20-sim.

4.2.2 Simulación en Simnon del Convertidor Trifásico de Media Onda con carga Resistiva

La forma de onda trifásica aparece a través de los voltajes cada uno con un defasamiento entre cada uno de ellos es la siguiente:

$$V_{an} = V_1 = V_m \sin(\omega t - \alpha)$$

$$V_{bn} = V_2 = V_m \sin(\omega t - \alpha)$$

$$V_{cn} = V_3 = V_m \sin(\omega t - \alpha)$$

Como se puede observar en la figura 4.9, la forma de onda trifásica de alimentación que circulara a través de la carga R.

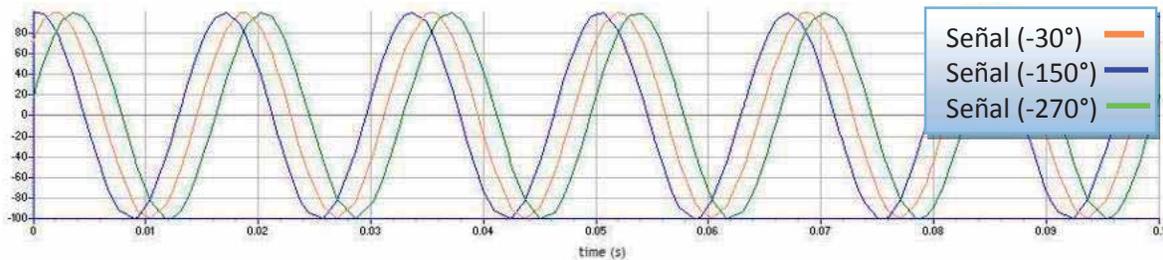
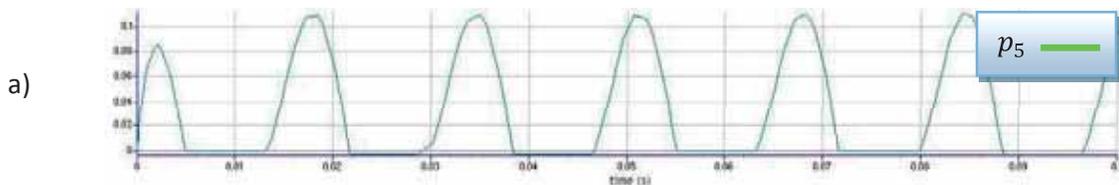


Figura 4.9 Fuente de alimentación trifásica.

La respuesta en cada estado de los elementos de almacenamientos de energía (I, I_1, I_2) muestra un comportamiento adecuado en cada una de las fases con lo que determinamos un buen funcionamiento del convertidor trifásico, conforme al disparo en cada compuerta de los tiristores T_1, T_2 y T_3 , como se muestra en la gráfica 4.10.



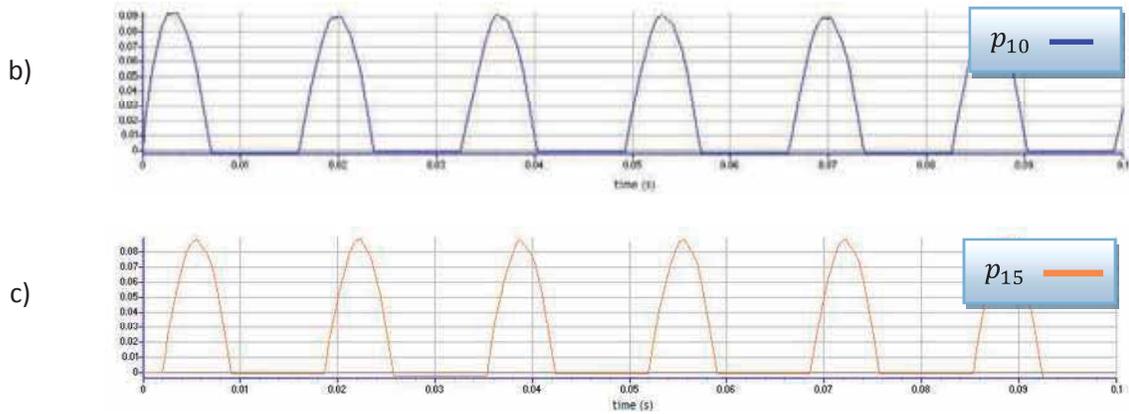


Figura 4.10 Estado dinámico de los elementos de almacenamiento de energía. a) Estado I_1 ; b) Estado I_2 ; c) Estado I_3 .

En la figura 4.11, se muestra detalladamente el estado dinámico que sufre cada estado de Inercia respecto al defasamiento respecto a cada línea de alimentación.

Voltaje de disparo en la compuerta de los tiristores es decir, $T_1 = 10$ v, $T_2 = 20$ v y $T_3 = 30$ v. A partir de estos voltajes se activan cada uno de los tiristores obteniendo un control adecuado del sistema.

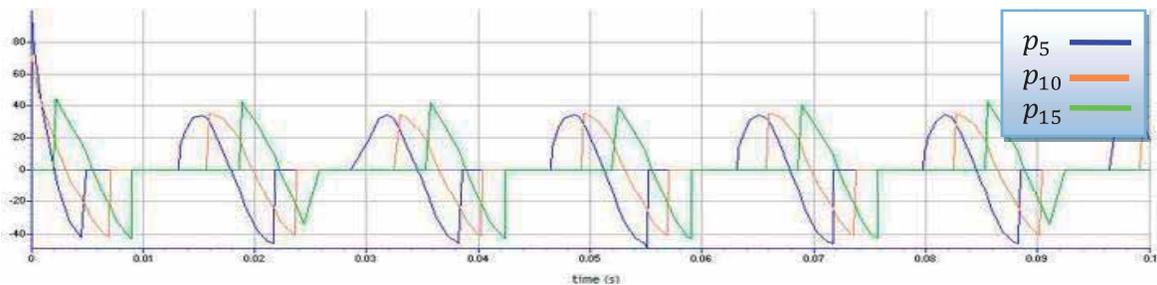


Figura 4.11 Esfuerzo de Inercia en T_1 , T_2 y T_3 .

La rectificación y activación de los *tiristores* es la adecuada respecto al esfuerzo y flujo que circula por la *resistencia interna* de T_1 , T_2 y T_3 , lo cual indica que se obtiene un control en el rectificador trifásico.

La figura 4.12, se observa la forma de onda en cada uno de los *tiristores*, mostrando positivamente la rectificación y circulación adecuada, es decir, para T_1 se dispara en 10v, T_2 en 50v y T_3 en 80v.

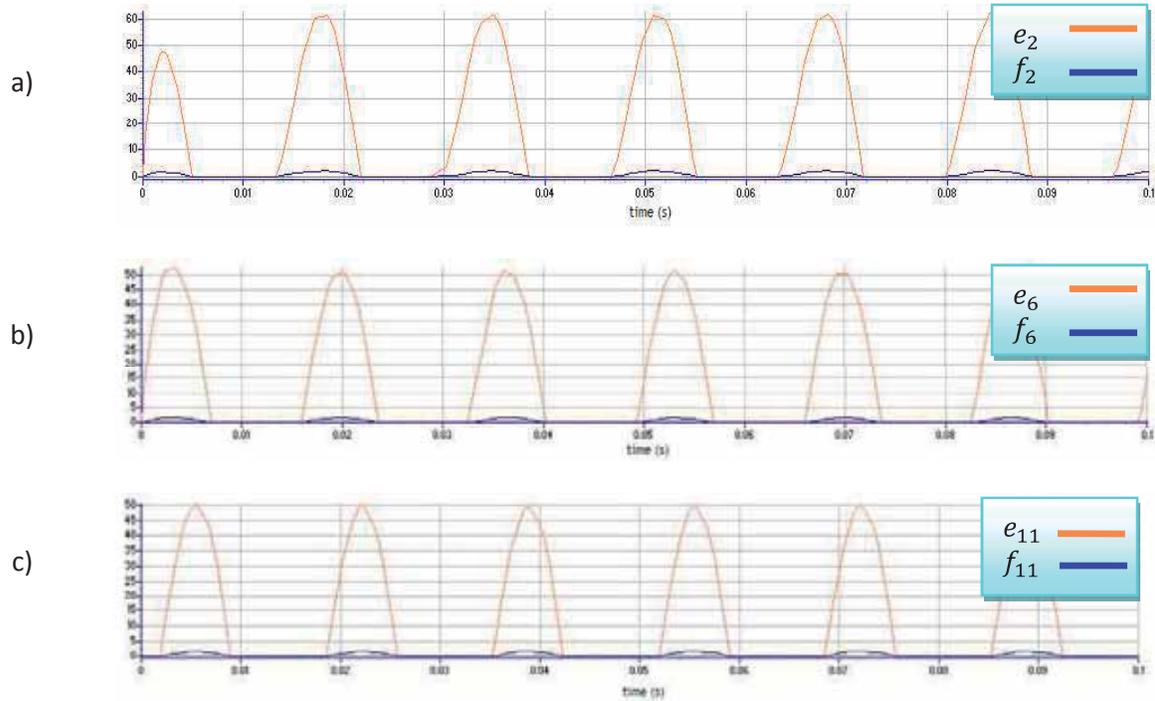


Figura 4.12 Respuesta y Activación de los Tiristores. a) Disparo en 10v; b) Disparo en 20v; c) Disparo en 30v.

Comprobando el buen funcionamiento de tiristores del rectificador trifásico controlado por fase de las ecuaciones obtenidas matemáticamente partiremos nuevamente al modelado del sistema para corroborar en 20-sim.

4.2.3 Simulación en 20-sim del Convertidor Trifásico de Media Onda con carga Resistiva

El Bond Graph de la figura 4.13, se realiza el modelado en 20-sim, la respuesta del estado dinámico en cada uno de los bonds permitiendo analizar de una manera más sencilla la representación gráfica.

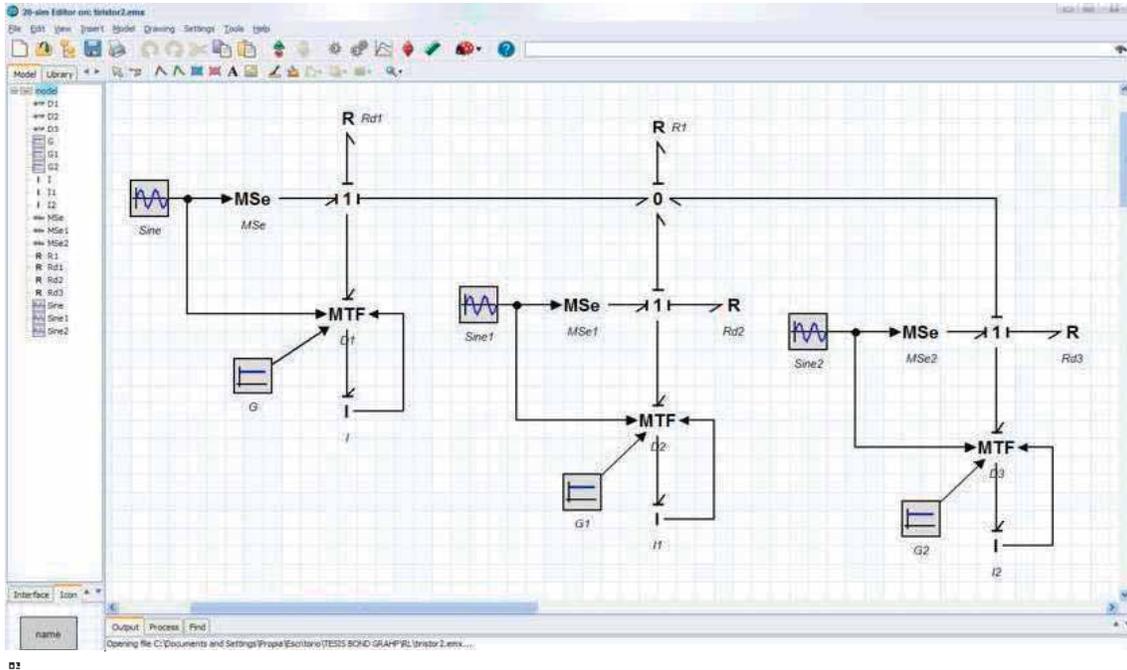


Figura 4.13 Modelado del convertidor Trifásico de media onda.

La forma de onda trifásica aparece en la figura 4.14, indicando un defasamiento en cada fuente de alimentación $V_s = V_m \sin(\omega t + \alpha)$.

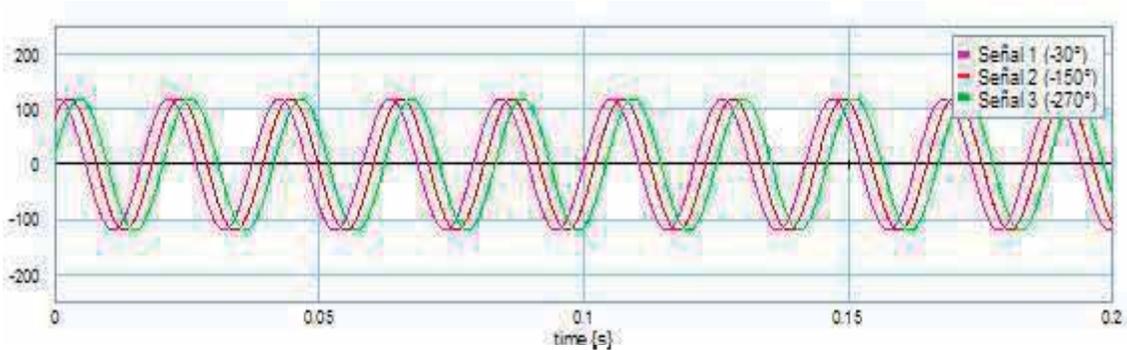


Figura 4.14 Señal Trifásica de alimentación.

La gráfica 4.15, corresponde a los estados de almacenamiento de energía por lo que la respuesta es la adecuada en base al principio de operación de un simple rectificador controlado de media onda con carga R_{load} .

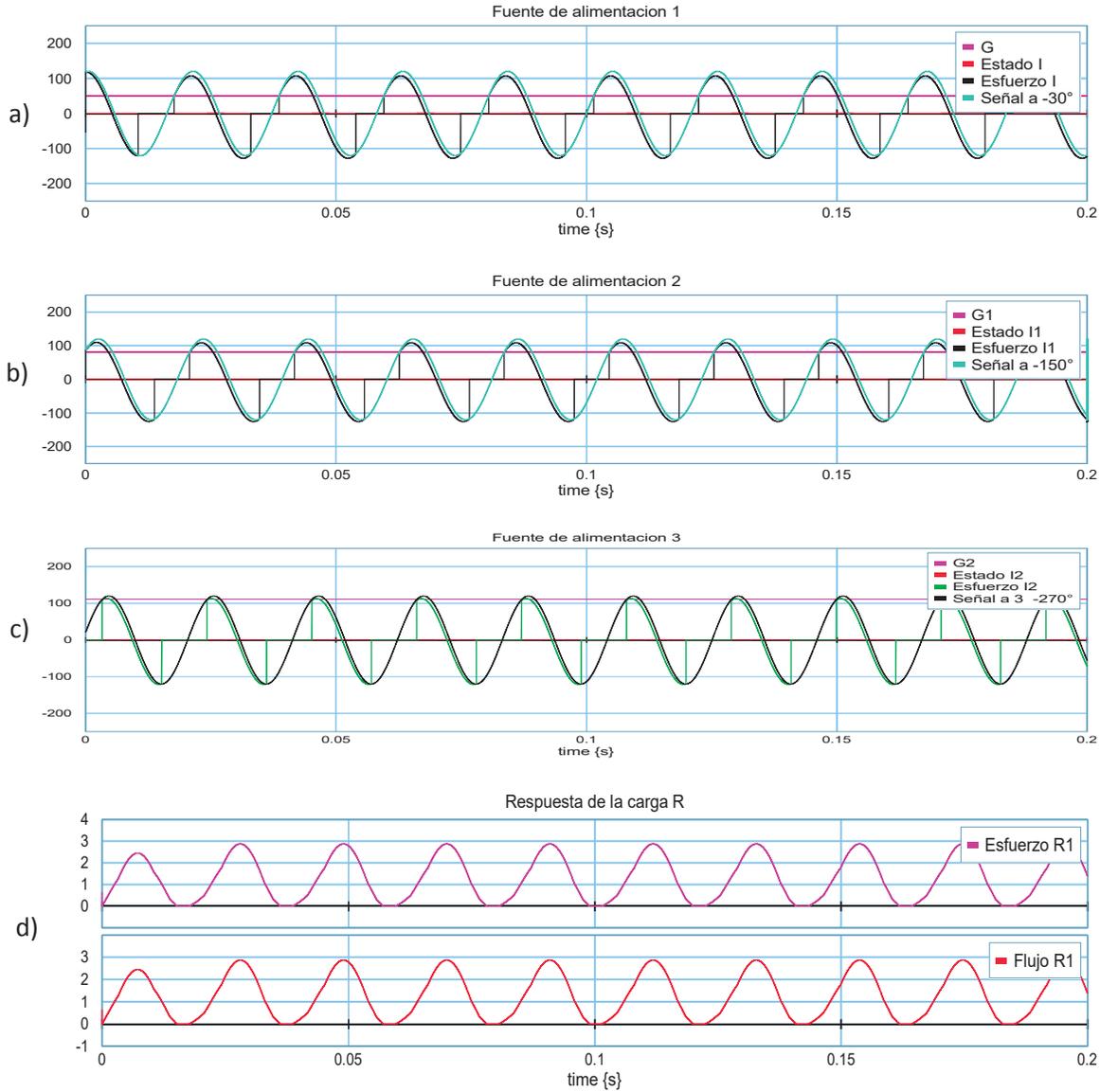


Figura 4.15 Estado dinámico de los elementos de almacenamiento de Energía. a) Estado y activación en T_1 ; b) Estado y activación T_2 ; c) Estado y activación T_3 ; d) Respuesta de la carga Resistiva R_1 .

En este rectificador encontramos con que a partir de un $\omega t = 0$, la fuente de alimentación comienza el semiciclo positivo, con lo que el tiristor conduce ya que se encuentra en polarización directa, ahora si en un $\omega t = \alpha$ se aplica un pulso de disparo este entrará en conducción de igual manera que T_2 y T_3 , activándolos con fases de alimentación diferentes.

$$V_1 = V_m \sin(\omega t - 30^\circ)$$

$$V_2 = V_m \sin(\omega t - 150^\circ)$$

$$V_3 = V_m \sin(\omega t - 270^\circ)$$

En la siguiente figura 4.16, se muestra la rectificación de los *tiristores* T_1 , T_2 y T_3 .

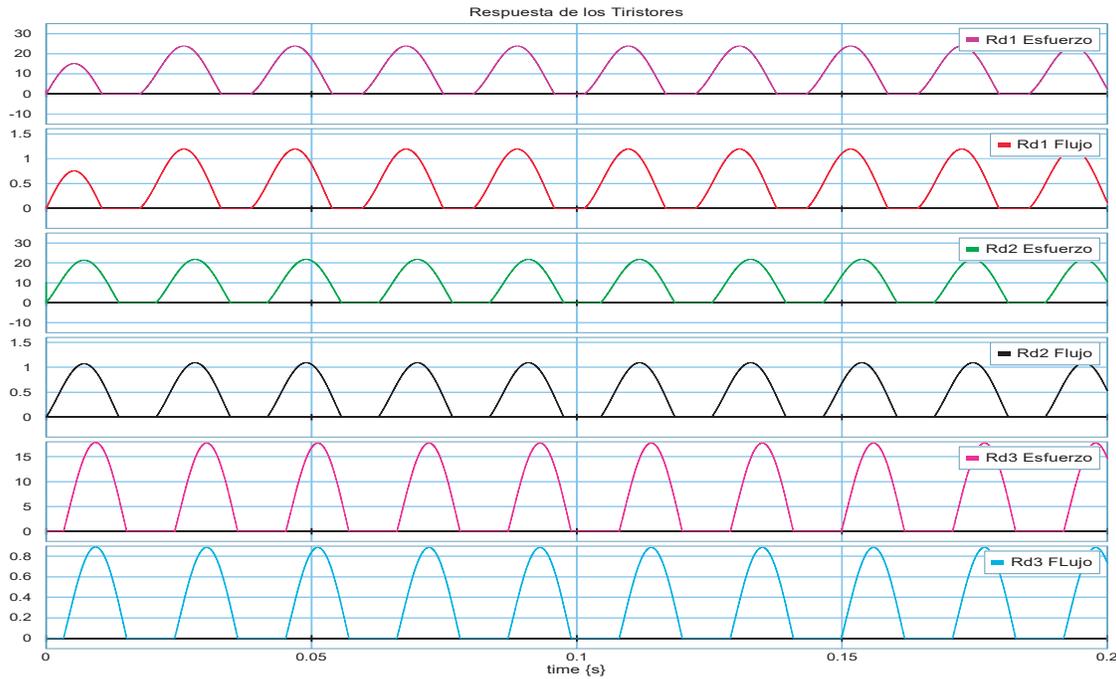


Figura 4.16 Estado dinámico de la resistencia interna de los tiristores T_1 , T_2 y T_3 .

Claramente la rectificación de los tiristores permite el paso de esfuerzo y flujo en el semiciclo positivo con su respectivo disparo en la compuerta, bloqueado de manera correcta en el semiciclo negativo quedando como un controlador de fase de media onda.

En la figura 4.17, se muestra el pulso de activación de cada tiristor conforme a cada fase de la fuente de alimentación de -30° , -150° y -270° respectivamente.

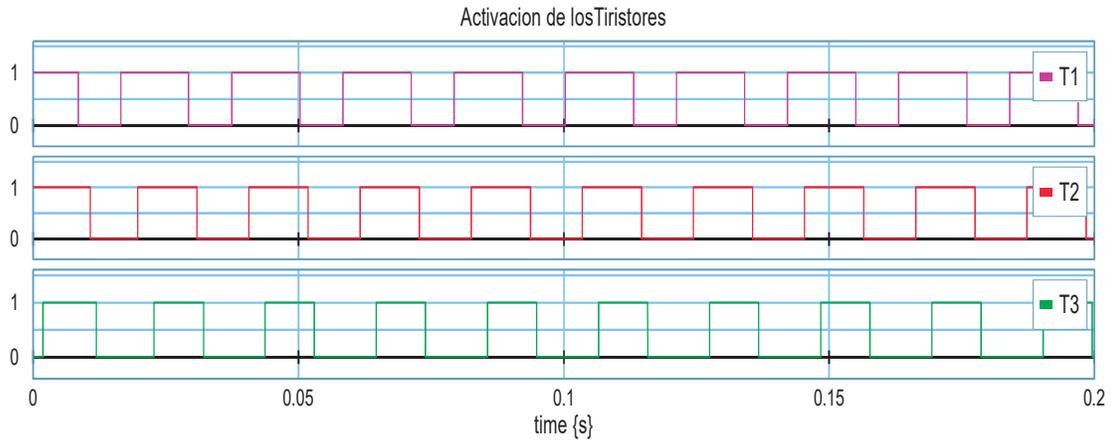


Figura 4.17 Activación de los Tiristores T_1 , T_2 y T_3 .

4.3 Convertidor Trifásico de Media Onda con carga RC

Ahora se le agrega una carga Resistiva-Capacitiva en paralelo al convertidor trifásico de media onda como se muestra en la figura 4.18.

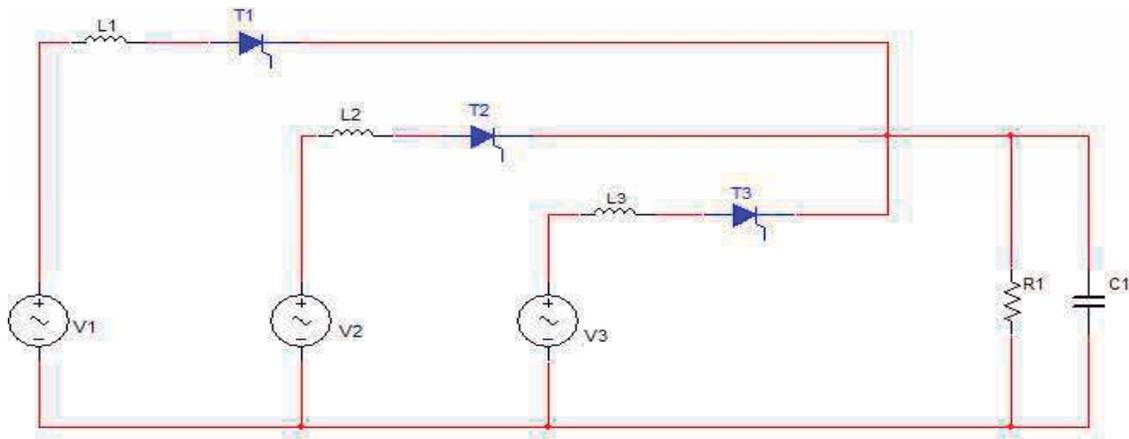


Figura 4.18 Convertidor trifásico con carga RC.

De igual manera una vez obtenido el bond graph correspondiente partimos de la simulación a través del simulador 20-sim como se muestra en la figura 4.19.

4.3.1 Simulación en 20-sim del Convertidor de Media onda con carga RC

La cual representa los estados de cada fuente de alimentación así como del elemento de inercia que se realizó el análisis pertinente, partiendo del análisis para determinar la respuesta dinámica al aplicar la carga Resistiva-Capacitiva.

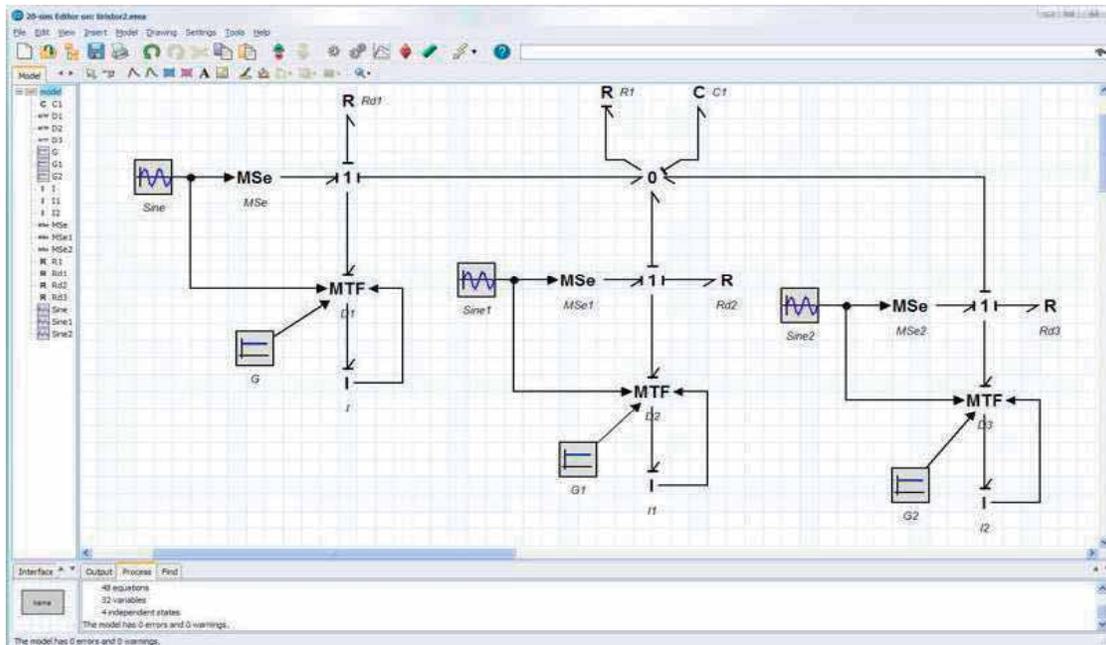


Figura 4.19 Modelado convertidor Trifásico con carga RC de media Onda.

La figura 4.20, muestra cada uno de tiristores obteniendo un control en la activación, corresponden en el siguiente orden en base los siguientes argumentos.

$$\begin{cases} T_1 \rightarrow \text{activación en } 10v \text{ estado ON} \\ T_2 \rightarrow \text{activación en } 50v \text{ estado ON} \\ T_3 \rightarrow \text{activación en } 80v \text{ estado ON} \end{cases}$$



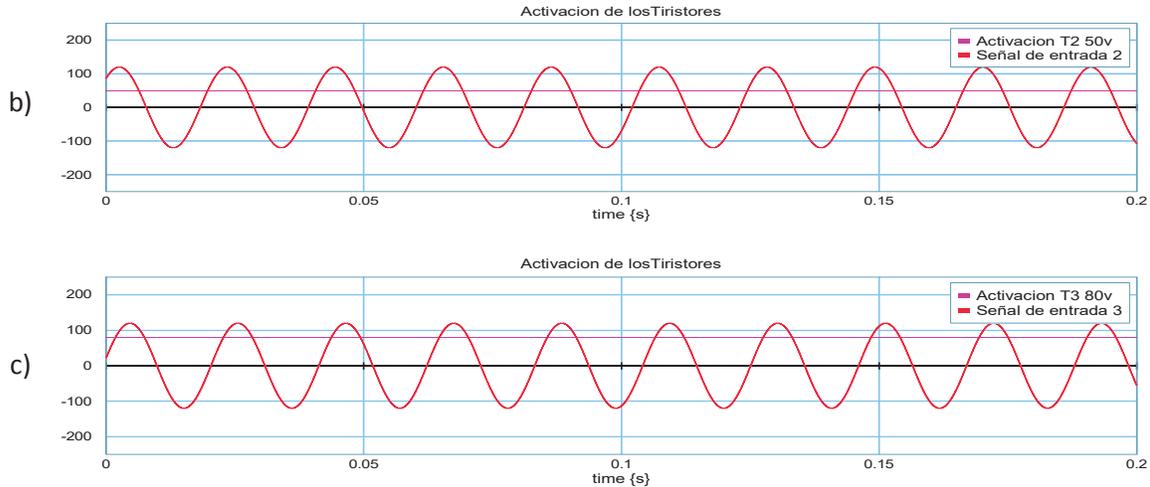


Figura 4.20 Activación de los Tiristores. a) T_1 , $V=10$ con $V_1 = V_m \sin(\omega t - 30^\circ)$; b) T_2 , con $V=50v$ $V_2 = V_m \sin(\omega t - 150^\circ)$; c) T_3 , con $V=80v$ $V_3 = V_m \sin(\omega t - 270^\circ)$.

El análisis del estado dinámico del comportamiento de la carga Resistiva-Capacitiva, es decir, si partimos de la respuesta de la carga capacitiva se observa que el estado va creciendo exponencialmente mientras que el flujo que circula a través del capacitor en un corto tiempo se llama *estado transitorio*, hasta mantenerse en *estado estable* de la señal, debido a la activación y defasamiento de cada uno de los tiristores.

La carga resistiva se mantiene creciendo exponencialmente un instante hasta que se mantiene constante las variables de estado, el esfuerzo y flujo, donde los dos elementos se encuentran en paralelo por lo tanto se observa que el estado C y R iguales con diferente magnitud a diferencia del flujo capacitivo como se puede observar en la figura 4.21.

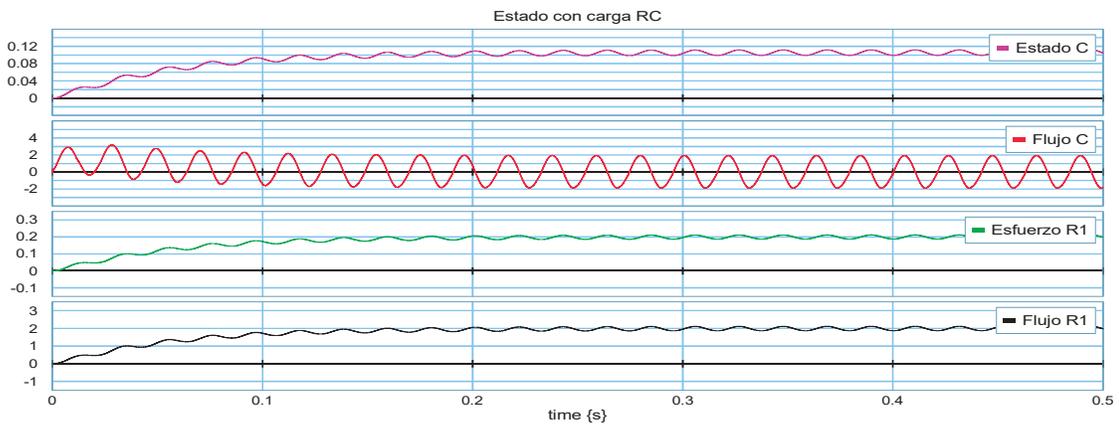


Figura 4.21 Respuesta del convertidor con carga RC controlado por fase.

4.4 Rectificador Monofásico controlado (Puente de Tiristores)

En la figura 4.22, se puede observar el esquema correspondiente de un rectificador monofásico totalmente controlado. La activación de cada uno de los *tiristores* T_1 , T_2 , T_3 y T_4 se activan en el siguiente orden, cuando el voltaje de alimentación del semiciclo positivo los tiristores T_1 y T_4 se encuentran polarizados adecuadamente mientras que por la parte del semiciclo negativo se activa T_2 y T_3 .

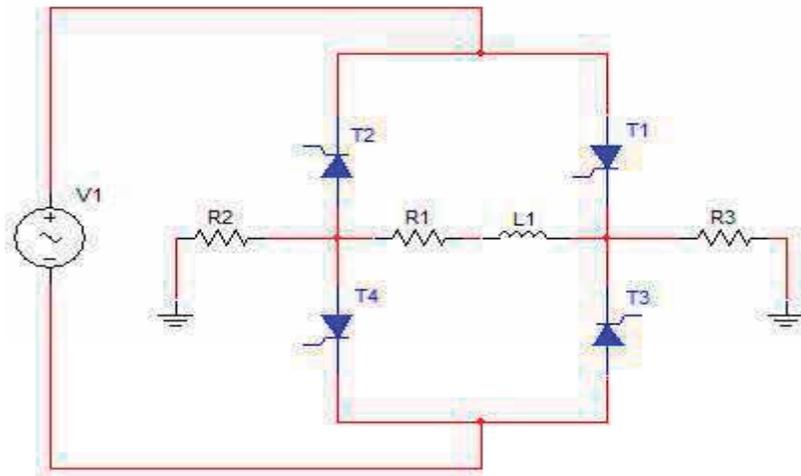


Figura 4.22 Puente con tiristores.

Se determina claramente el comportamiento de cada uno de los tiristores así como de la respuesta de la resistencia interna de T_1 , T_2 , T_3 y T_4 a través del simulador de 20-sim.

4.4.1 Simulación en 20-sim Rectificador Monofásico controlado (Puente de Tiristores)

En la figura 4.23, se muestra el BG correspondiente para poder determinar el estado dinámico del sistema.

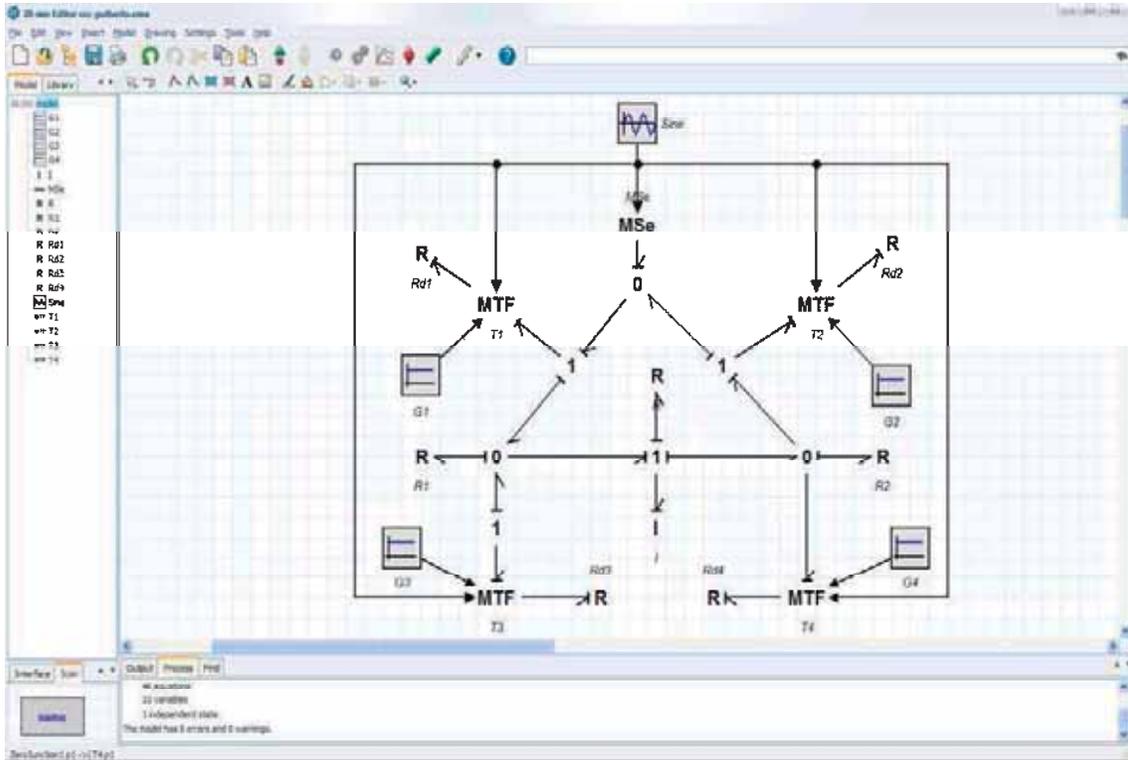


Figura 4.23 Modelado en BG del Rectificador de Media Onda.

En la figura 4.24, se muestra la rectificación del *Puente con Tiristores* activando cada uno de ellos en la siguiente orden conforme a la tabla 4.1.

Tiristores	Semiciclo positivo	Semiciclo negativo	Voltaje de Activación
T_1	✓		30 v
T_2	✓		-20 v
T_3		✓	-20 v
T_4		✓	30 v

Tabla 4.2 Activación de los Tiristores T1, T2, T3 y T4.

Finalmente se logra la rectificación a través del modelado en BG logrando obtener un control, así como la activación en cada uno de los *tiristores*. Sobre el primer semiciclo positivo se activan T_1 bloqueando T_2 por lo que la circulación es sobre la carga resistiva-inductiva haciendo que conduzca el T_4 y bloqueado T_3 ahora en el semiciclo negativo se activa el T_3 bloqueado T_4 por lo que la conducción es de nuevo por la resistencia e inercia activando T_2 y bloqueado T_1 .

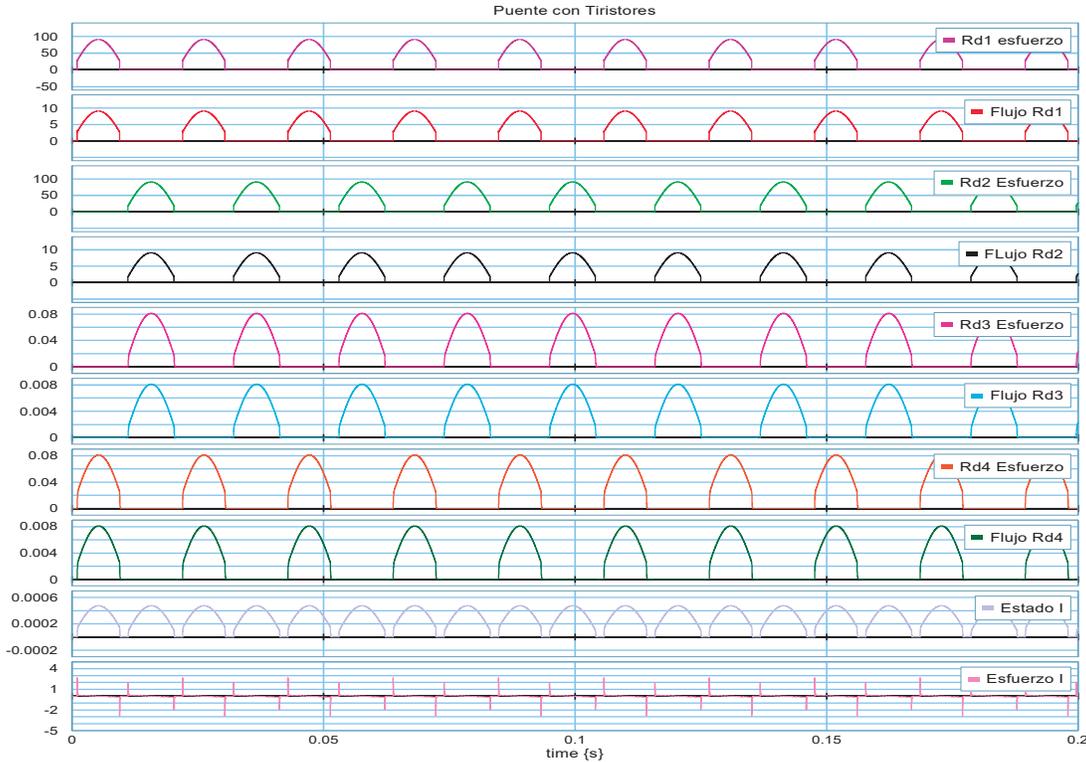


Figura 4.24 Rectificador de media Onda Controlado.

El estado de inercia es rectificador completamente mientras que el semiciclo positivo se activa T_1 y T_4 , mientras que por parte del semiciclo negativo se bloquean los siguientes *tiristores* T_2 y T_3 , la forma de onda de R_{d1} , R_{d2} , R_{d3} y R_{d4} , corresponde a la activación y desactivación de cada uno de los *tiristores*, como se muestra en la figura 4.24.

4.5 Modelado de un Motor de CD como carga a un Convertidor de Media Onda Trifásico controlado

Los elementos básicos de un *Motor de CD* controlado por armadura se muestran en la figura 4.25, es decir, al aplicar un voltaje V_s a la entrada se produce una corriente I_a a través de la armadura que esta compuesta por la R_a y de la Inercia L_a , produciendo un *par* que es proporcional al producto del flujo magnético y de la corriente de Armadura.

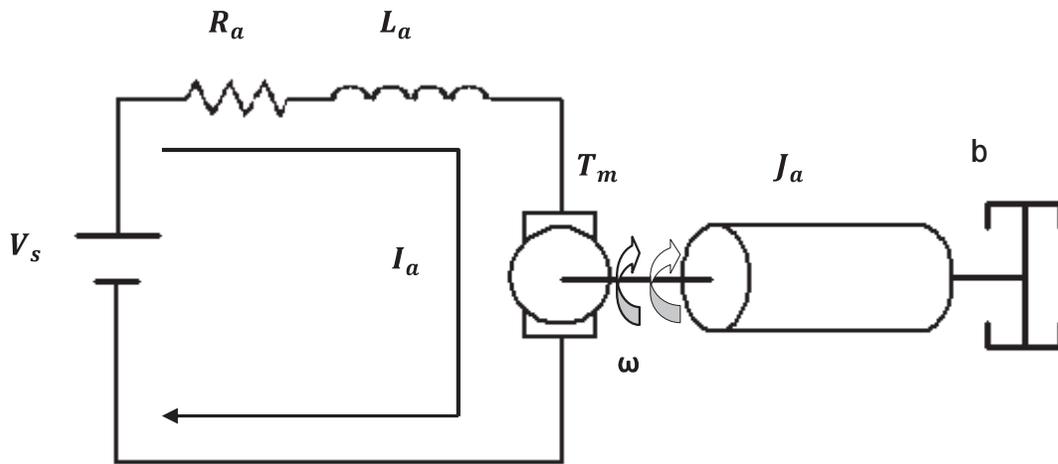


Figura 4.25 Motor de CD controlado por Armadura.

Lo que se pretende es tener un control sobre el *Motor de CD* por medio de un convertidor trifásico de media onda, usando la metodología del Bond Graph. A continuación se obtiene la representación correcta en Bond Graph aplicando el procedimiento-1 para un motor de corriente directa que se muestra en la figura 4.26.

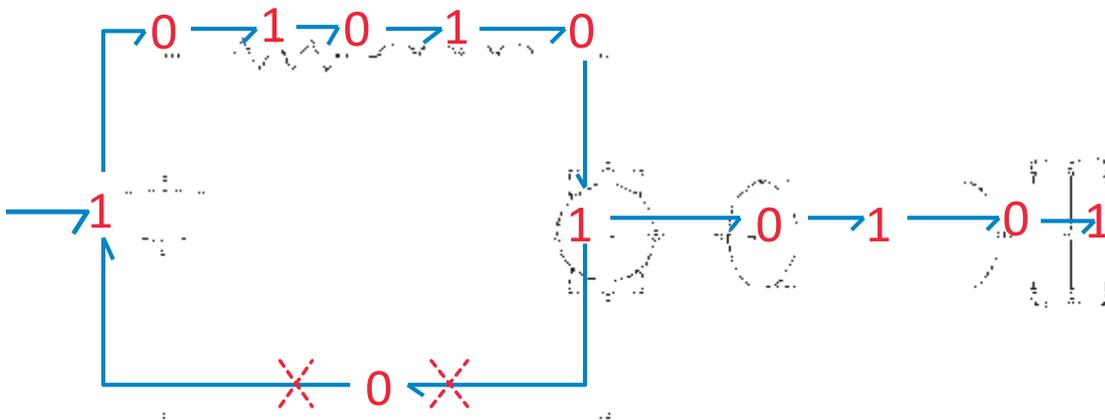


Figura 4.26 Procedimiento-1 localización de los elementos en Bond Graph.

Una vez localizado los elementos correspondientes y reducidos los *bonds*, se obtiene el Bond Graph correspondiente del *Motor de CD*, con la adecuada causalidad al sistema, se tendrá el modelado del sistema como se muestra en la figura 4.27.

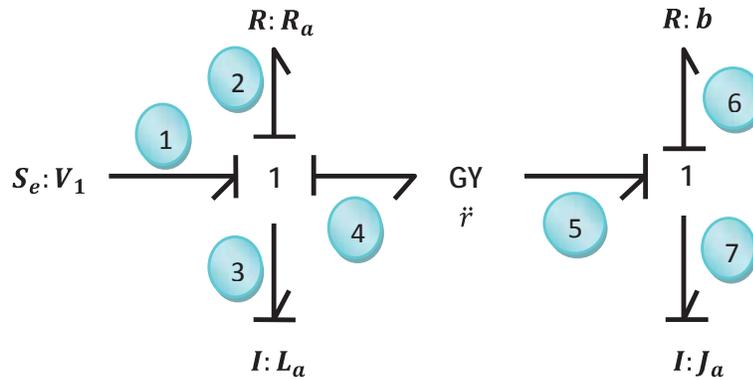


Figura 4.27 Bond Graph correspondiente al Motor de CD controlado por armadura.

Partiendo del rectificador trifásico de media onda con una carga de un *Motor de CD* controlado por armadura observe la figura 4.28, se acopla el motor adecuadamente al rectificador con lo que observaremos el comportamiento de la velocidad angular ω .

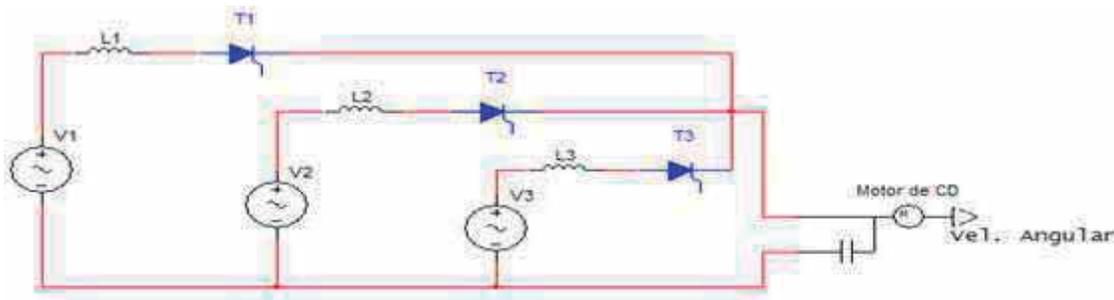


Figura 4.28 Motor de CD controlado por un rectificador trifásico de media onda.

Como se muestra en la figura 4.29, se realiza la simulación, donde se pretende comprobar con la poderosa herramienta 20-sim, la cual ha mostrada gran eficiencia al realizar modelado de sistemas en diferentes dominios por lo que el ejemplo de la figura 4.28, es una clara oportunidad del análisis dinámico a través del lenguaje de Bond Graph.

4.5.1 Simulación en 20-sim del Motor de CD como carga a un Convertidor de Media onda Trifásico controlado

Partiendo del BG correspondiente de la figura 4.29, como se ilustra a continuación se analiza el sistema dinámico como carga al rectificador trifásico de media onda acoplado a un *Motor de CD*.

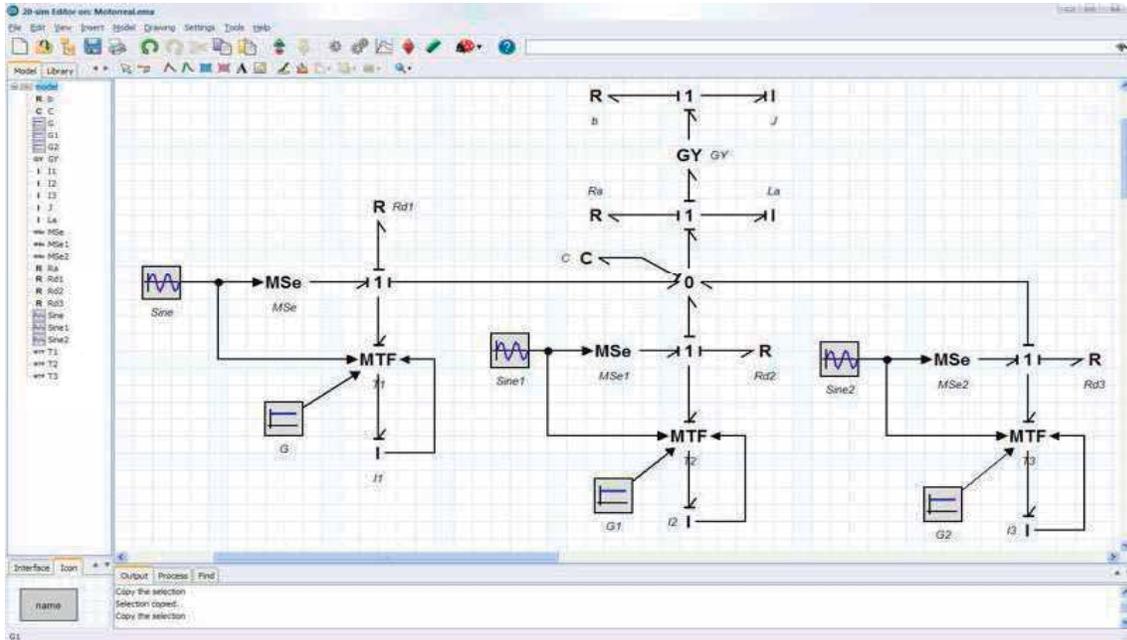


Figura 4.29 Modelado en BG del Rectificador de Media Onda Trifásico con carga de un Motor de CD.

Como se mostró en la sección 4.4, la respuesta de los tiristores es la adecuada para cada uno T_1 , T_2 y T_3 . Logrando un disparo en la compuerta por lo que tendremos un control sobre el *Motor de CD* controlado por armadura por lo tanto se muestra el análisis de la velocidad Angular ω , que en particular se determina dinámicamente la respuesta.

La velocidad angular en el motor, sufre cambios al mantenerse constante aceleración y desaceleración esto provoca un desgaste y un esfuerzo en el motor como se puede apreciar en la figura 4.30.

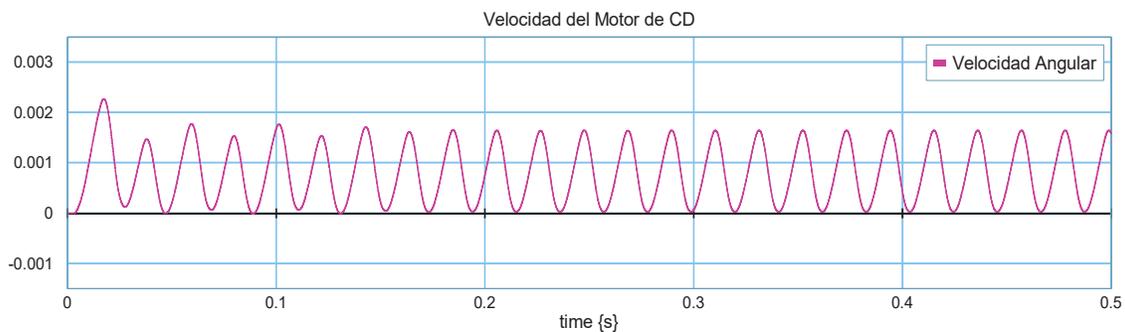


Figura 4.30 Velocidad angular ω del Motor de CD.

Para que el *Motor de CD* para que tenga un adecuado arranque y control de la velocidad angular se debería comportar como se muestra en la figura 4.31, la cual, desde un punto de vista cuando son activados los *tiristores* la velocidad empieza a crecer exponencialmente en un tiempo corto para que el motor mantenga una velocidad angular ω constante sin que sufra ningún cambio el sistema.

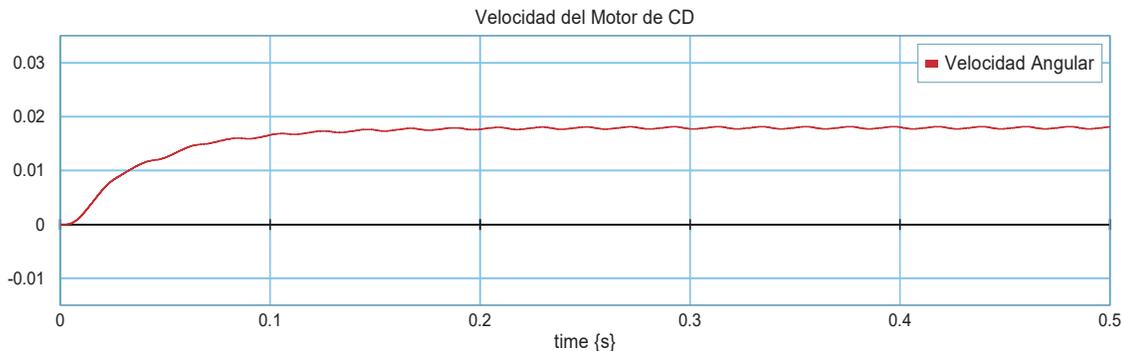


Figura 4.31 Velocidad angular del Motor de CD idealmente.

Los resultados obtenidos en cada una de las simulaciones son optimistas en base a que la respuesta es la misma que se muestra en los libros de electrónica de potencia logrando realizar un modelado adecuado y acertado de una forma sencilla y audaz, quedando conforme con cada uno de los circuitos en conmutación, observando detalladamente el análisis oportuno, lo cual indica que el sistema está operando de manera exitosa logrando resolver este tipo de problemas que tradicionalmente era un esfuerzo matemático, sin lograr obtener la respuesta con sistemas en diferentes dominios.

Capítulo 5

Conclusiones y recomendaciones

Con el propósito de impulsar un desarrollo en el estudio Electrónico hemos presentado un nuevo enfoque en la enseñanza del método de Bond Graph, con vista a la formación básica e integral, que viven en un mundo inmerso en una sociedad tecnológicamente avanzada.

Se puede formular la siguiente pregunta ¿Por qué utilizar el lenguaje de Bond Graph para el modelado de sistemas dinámicos?, es una buena pregunta sin embargo es bueno hacer hincapié que ha mostrado un gran potencial para modelado en diferentes dominios estableciendo una familiarización en las variables de *esfuerzo* y *flujo* obteniendo con el producto de ambos potencia, indicando en un sistema eléctrico *voltaje* y *corriente* de igual manera para el sistema mecánico e hidráulico. Se logra partir de un Sistema Eléctrico a un Mecánico, Eléctrico a un Hidráulico y viceversa con esto no se limita al modelado de un sólo sistema físico mostrando gran potencial y eficiencia en la obtención de los parámetros dinámicos en cada uno de los elementos que se encuentran dentro del sistema.

¿De que sirve modelar un *diodo* o un *tiristor*? Recordemos que existen diferentes tipos de convertidores en la electrónica de potencia esto nos dará la seguridad y la posibilidad de detectar alguna falla y mejorar la respuesta al aplicar una carga al sistema. Observemos que estos componentes están impregnados en diversos circuitos con carga RL, RC, rectificadores monofásicos de media onda sin tener un adecuado control de ellos a diferencia de los *tiristores* donde se puede controlar a partir de un ángulo de disparo.

Se obtuvieron respuestas satisfactorias en cada uno de los circuitos electrónicos, sin embargo la tarea de obtener ecuaciones diferenciales que rigen al modelo ha demostrado ser un estudio difícil, costoso en términos de

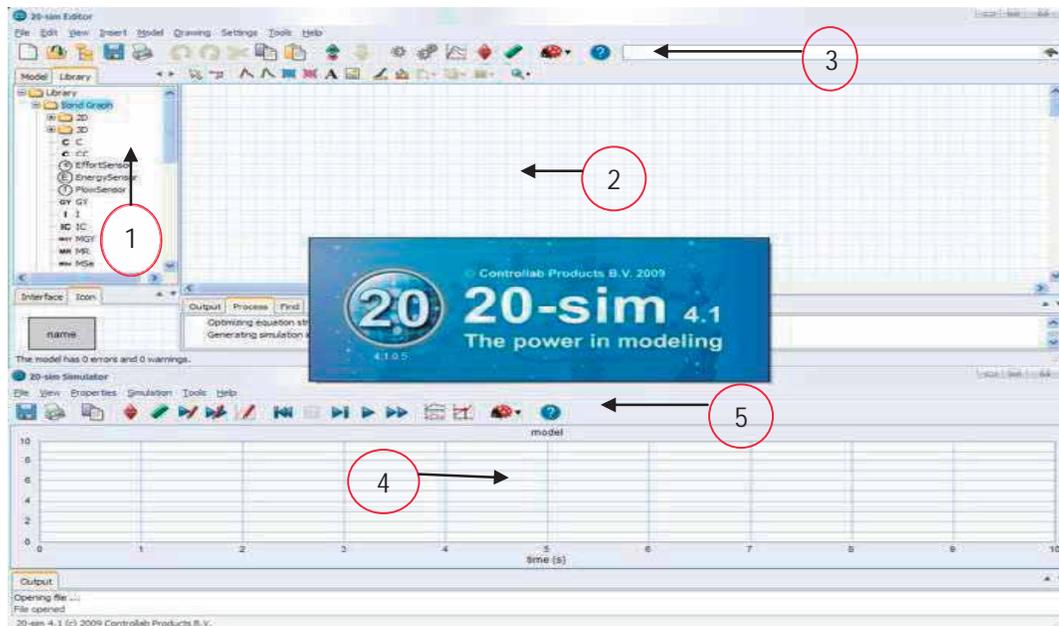
tiempo para evitar tales errores surgieron técnica para la representación en estado dinámico como lo es *Bond Graph*.

El proceso de simulación en el desarrollo de la tesis fue exitoso ya que efectivamente los sistemas físicos que se proponen se comportan de la misma manera que comúnmente se plantean en los libros de electrónica de potencia, con esto se realiza la comparación de ecuaciones diferenciales representadas por medio del software *Simnon*, a diferencia del *20-sim* muestra las ventajas a partir de una representación gráfica de un sistema dinámico donde una colección de componentes interactúan unos con otros a través de puertos de energía y reduce todo cálculo matemático.

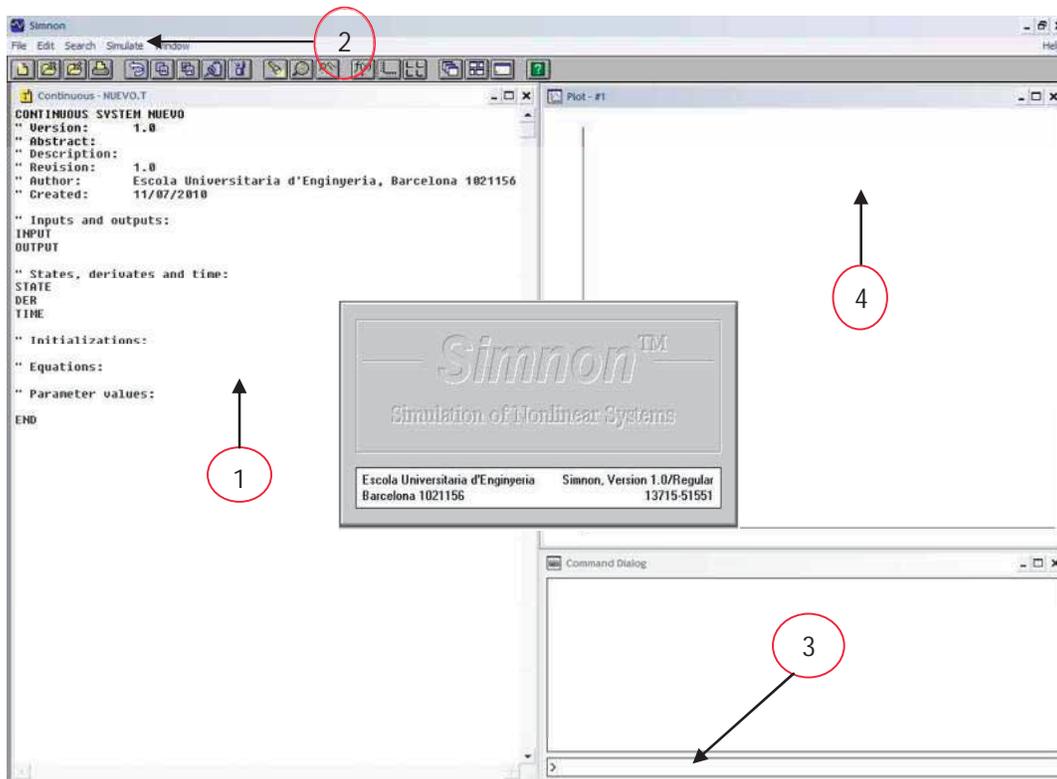
Una de las recomendaciones importantes es determinar una trayectoria causal, proporcione un buen funcionamiento del sistema es decir, considerar los vectores claves como lo son S_{13} , S_{23} y \mathbf{B} del capítulo 3. Haciendo un principal hincapié en la demanda del control de energía ya sea para los sistemas de motores eléctricos, por lo que sería adecuado controlar un motor a partir de este elemento como lo es el *diodo* ó el *tiristor*, hace que la electrónica de potencia sufra transformaciones en la conversión de energía, obteniendo como resultado la respuesta de los estados dinámicos del sistema.

Además sería de utilidad realizar un modelado hidráulico para obtener un control sobre el caudal para el llenado y vaciado de tanques por medio de la válvula en un sistema hidráulico, a través de un sistema electrónico lo cual un análisis adecuado para un trabajo futuro.

Apéndice A. Presentación de los paquetes de simulación Simnon y 20-sim



- 1- Librería de Bond Graph donde encontramos los elementos como Resistencia, Capacitores, Transformadores, Generador de señales senos, triangular, pulso etc. Así como de ejemplos y ayuda complementaria de diferentes sistemas físicos (Eléctrico, Mecánico e Hidráulico).
- 2- Panel de la representación del modelado en Bond Graph.
- 3- Barra de comprobación del modelado.
- 4- Panel de representación grafica.
- 5- Barra de simulación y variación de parámetros.



- 1- Se introducen las ecuaciones diferenciales de tal forma $\dot{x} = Ax + Bu$ y $y = Cx + Du$ que corresponden a la entrada y salida del sistema y parámetros de evaluación.
- 2- Barra de de compilación (F5) y simulación de las variables del sistema a observar (F6).
- 3- Con el comando *ashow* y la variable a simular por ejemplo: ashow e5, es decir, que mostrara el comportamiento del *esfuerzo e5* (Voltaje) para el análisis de algún elemento del sistema correspondiente a las entradas y salidas del modelado en Bond Graph.
- 4- Panel de representación Grafica de las variables del sistema.

Bibliografía

1. Ned Mohan, Tore M. Undeland y William P. Robbins, *Power Electronics Converters, Applications and Design*, USA: John Wiley & Sons, INC. 2003, págs. 79-160.
2. Walter J. Grantham y Thomas L. Vincent, *Sistemas de Control Moderna Análisis y Diseño* México 1998, Limusa Noriega Editores.
3. Robert L. Boylestad y Louis Nashelsky, *Electrónica: Teoría de Circuitos y Dispositivos Electrónico*, México 2003, Pearson Educación, octava edición.
4. Muhammad H. Rashid, *Electrónica de Potencia circuitos, dispositivos y aplicaciones*, México: 2004, Pearson Educación, tercera edición.
5. Notas del Modelado en Bond Graph, Dr. Gilberto González Avalos, División de Estudios de Posgrado de la Facultad de Ingeniería Eléctrica. México.
6. N. S. Nise, *Sistemas de Control para Ingeniería*, México: Compañía Editorial Continental
7. Documentación del 20-sim
<http://www.20sim.com/>
8. Documentación del Simnon
<http://dctrl.fi-b.unam.mx/tutoriales/digital/>