



UNIVERSIDAD DE VALLADOLID  
E.T.S. DE INGENIERÍA INFORMÁTICA

MÁSTER EN INGENIERÍA INFORMÁTICA  
TRABAJO FIN DE MÁSTER

---

# Diagnosis de sistemas híbridos usando Posibles Conflictos Híbridos

---

*Autor:*  
Alberto HERNÁNDEZ  
CEREZO

*Tutor:*  
Dr. José Belarmino PULIDO  
JUNQUERA  
Dr. Carlos ALONSO  
GONZÁLEZ

Junio de 2015



# CAPÍTULO 1

---

## Análisis de Resultados en Casos de Estudio

---

### 1.1. Introducción

En el presente capítulo se recoge toda la documentación sobre los resultados asociados al estudio de los algoritmos de HSCAP y cálculo de HBG-PCs aplicado en los casos de estudio considerados para nuestro proyecto.

El estudio del HSCAP consiste en aplicar el algoritmo sobre cada uno de los sistemas considerados como casos de estudio. Para cada HBG, consideramos todos sus modos de funcionamiento posibles, y por cada modo los tipos de causalidad integral, derivada y mixta.

El estudio de cálculo de HPCs aplicará el algoritmo de cálculo de HPCs sobre los modelos HBG de cada uno de los sistemas considerados. Lo que se espera con ello es obtener una serie de HBGs asociados a los sHBG-PCs de cada sistema, sobre los cuales efectuaremos un estudio de HSCAP.

El capítulo contempla una lista de sistemas de ejemplo sobre los que realizar pruebas con nuestros algoritmos. A continuación describiremos de manera concisa los sistemas considerados para poner en práctica los resultados de nuestro estudio acerca de los procedimientos HSCAP y de cálculo de HPCs.

El objetivo de esto es justificar la elección de cada uno de los casos de estudio considerados, explicar su modelo real, su representación a nivel de modelo de sistema como HBG y desarrollar brevemente las particularidades del mismo en lo referente a la aplicación de los algoritmos de HSCAP y HPCs. De este modo, además de dar una visión general de los sistemas seleccionados para el estudio, vamos a explicar los resultados de HPCs y de asignaciones causales que deberíamos obtener en la aplicación de los algoritmos diseñados por nosotros sobre dichos modelos <sup>1</sup>.

Adjunto a la descripción de los modelos y las observaciones añadiremos los resultados del estudio, contrastando los resultados obtenidos por los algoritmos con los esperados en la descripción del modelo. Además en algunos de los casos mostraremos las ecuaciones

---

<sup>1</sup>Dado que en este TFM solo trabajamos con PCs en sistemas híbridos modelados mediante HBGs, usamos los términos HPC y HBG-PC de forma indistinta.

del modelo asociado al HBG-PC.

## 1.2. Circuito Eléctrico

### 1.2.1. ¿Qué es?

El sistema de circuito eléctrico es un modelo propuesto en [Roychoudhry08] con el fin de ilustrar el concepto de causalidad, el funcionamiento de HSCAP y su viabilidad para generar modelos de simulación online, así como el comportamiento de las uniones switching, a nivel de causalidad, en sus diferentes configuraciones.

Este sistema consiste en un circuito sencillo, compuesto por una serie de componentes tales como fuentes de voltaje ( $v(t)$ ), condensadores ( $C_1$  y  $C_2$ ), inductancias ( $L_1$  y  $L_2$ ), resistencias ( $R_1$  y  $R_2$ ), un relé ( $Sw_1$ ) y un interruptor ( $Sw_2$ ).

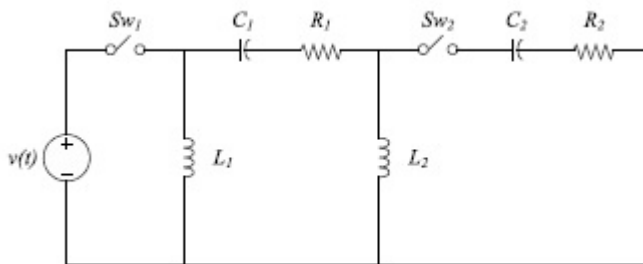


Figura 1.1: Sistema de Circuito Eléctrico c.f.a [Roychoudhry08]

La configuración del circuito eléctrico resulta muy interesante a nivel de asignación causal. Para empezar, se trata de un sistema híbrido, donde la inclusión del interruptor y el relé en el sistema se traducen a nivel del modelo de HBG como la inclusión de dos uniones switching de tipo 1.

Además de ello, se trata de un sistema donde existen todo tipo de causalidades: fijas, forzadas, forzadas por uniones switching, y arbitrarias. Como veremos en otros sistemas, es muy común dar con configuraciones de modelos que solo contemplan causalidades fijas y forzadas. La presencia de causalidades arbitrarias en este sistema permite hacer un estudio más detallado de los mecanismos de asignación causal arbitraria de HSCAP.

También resulta interesante para el estudio del procedimiento de reasignación de causalidad, dado que el sistema cuenta con diversos modos de funcionamiento, algunos de los cuales son inconsistentes debido a la ausencia de ACV en su configuración.

Dado que el modelo de circuito no contempla la inclusión de sensores, el cálculo de HPCs queda descartado para el presente sistema. Sería posible dotar a la configuración del mismo de componentes de este tipo, pero dado que se dispone de otros sistemas de mayor complejidad donde el cálculo de HPCs resulta más interesante, nos ceñiremos exclusivamente al estudio de HSCAP sobre este sistema.

### 1.2.2. Modelo de HBG

La conversión del circuito eléctrico a modelo de HBG da como resultado el siguiente grafo:

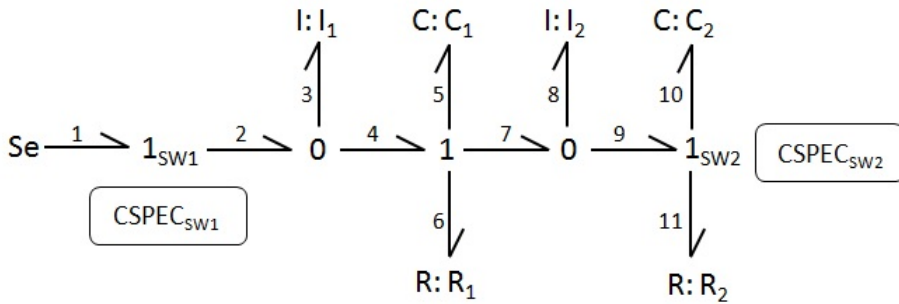


Figura 1.2: HBG de Sistema de Circuito Eléctrico c.f.a [Roychoudhry08]

### 1.2.3. Resultados de HSCAP esperados

Considerando los resultados del artículo [Roychoudhry08], el sistema dispone de ACV en tres de sus cuatros modos de funcionamiento: con todas las uniones switching a ON o cuando solo una de las uniones está a OFF.

El modo de funcionamiento en que las dos uniones están a OFF no tiene ACV. Esto se debe a inconsistencias que aparecen entre las uniones 0. Al forzar la causalidad de la unión  $1_a$  se impone como determining bond de  $0_b$  el bond  $B_4$ . Esto fuerza la causalidad de la unión  $1_c$  adyacente, al ser también su determining bond. Esta causalidad hace que la unión  $0_d$  tenga una causalidad forzada donde ninguno de sus bonds tiene una causalidad adyacente a la unión 0 (no tiene determining bond), lo que corresponde a una configuración causal errónea.

A continuación en las figuras 5.4 y 5.5 muestran los resultados de aplicar nuestra versión de HSCAP en distintos modos de asignación de causalidad. Hemos señalado los casos en los que no existe asignación causal marcando con un rectángulo rojo el bond del grafo donde tiene lugar la inconsistencia que hace imposible la existencia de ACV en el sistema.

### 1.2.4. Resumen de Resultados

Sistema de Circuito Eléctrico			
Modo	C.Integral	C.Derivada	C.Mixta
$1_{sw1} = 1_{sw2} = ON$	✓	✗	✓
$1_{sw1} = OFF, 1_{sw2} = ON$	✓	✓	✓
$1_{sw1} = ON, 1_{sw2} = OFF$	✓	✗	✓
$1_{sw1} = 1_{sw2} = OFF$	✗	✗	✓

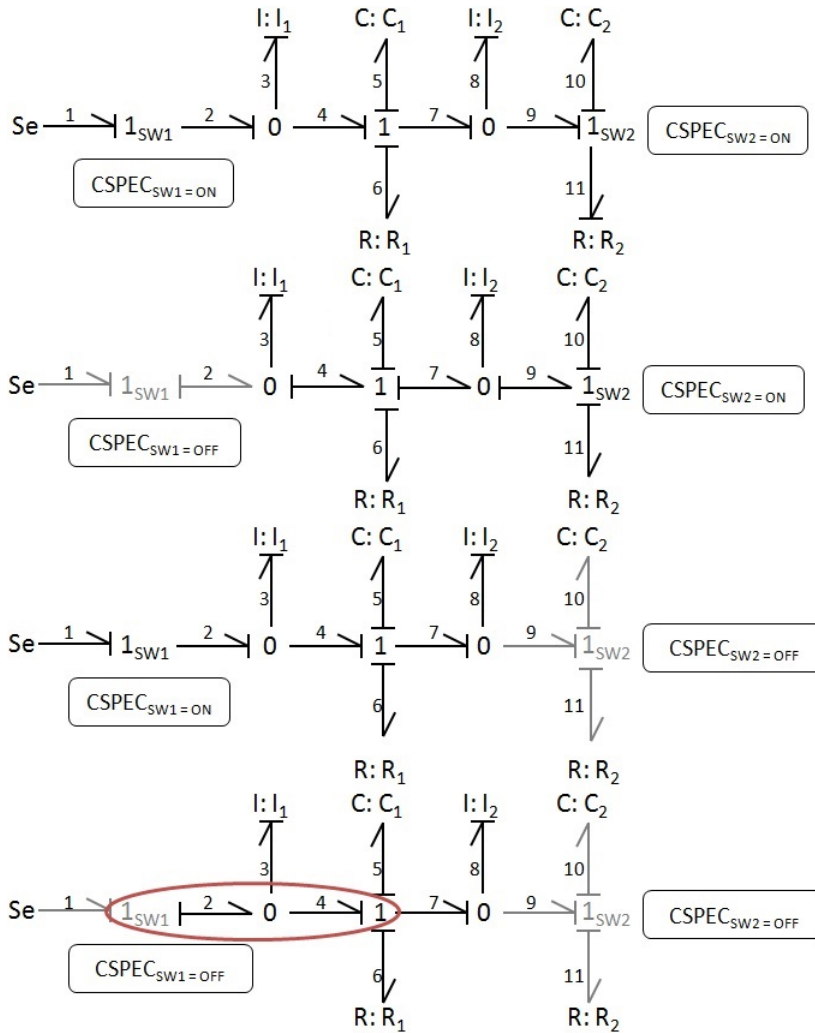


Figura 1.3: Resultados esperados en la aplicación de HSCAP sobre Sistema de Circuito Eléctrico



### 1.2.5. Resultados de HSCAP

#### Causalidad Integral

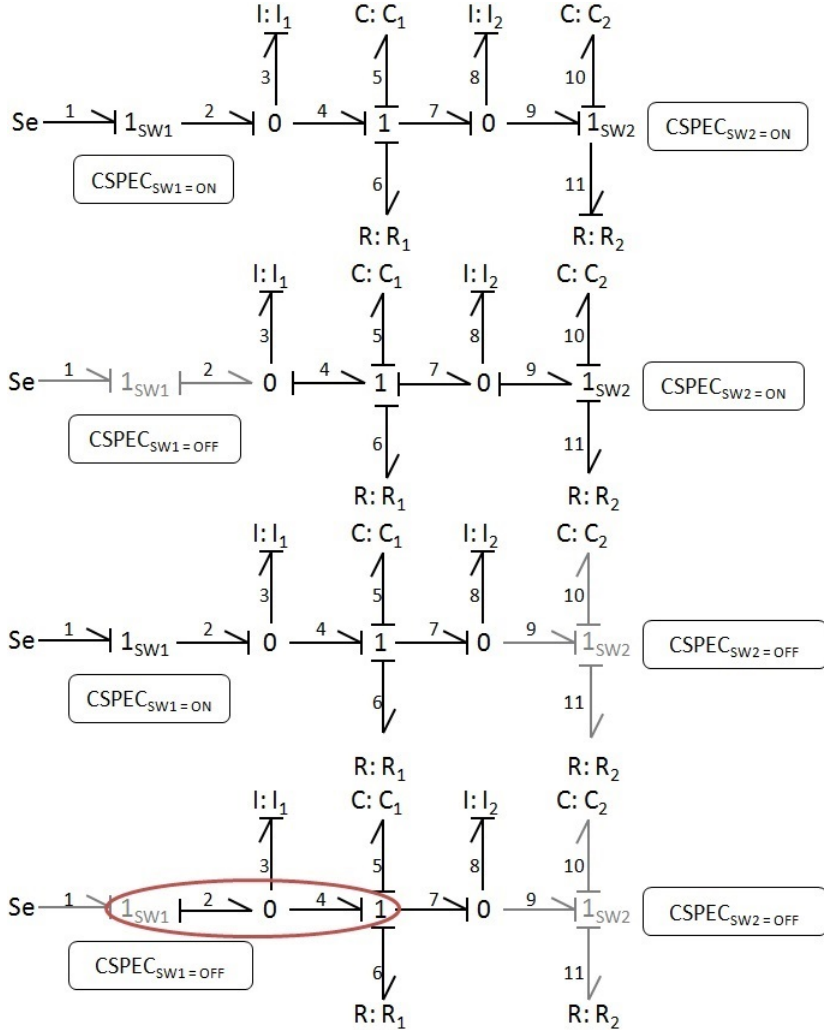


Figura 1.4: Resultados HSCAP en Circuito Eléctrico con Causalidad Integral



Causalidad Derivada

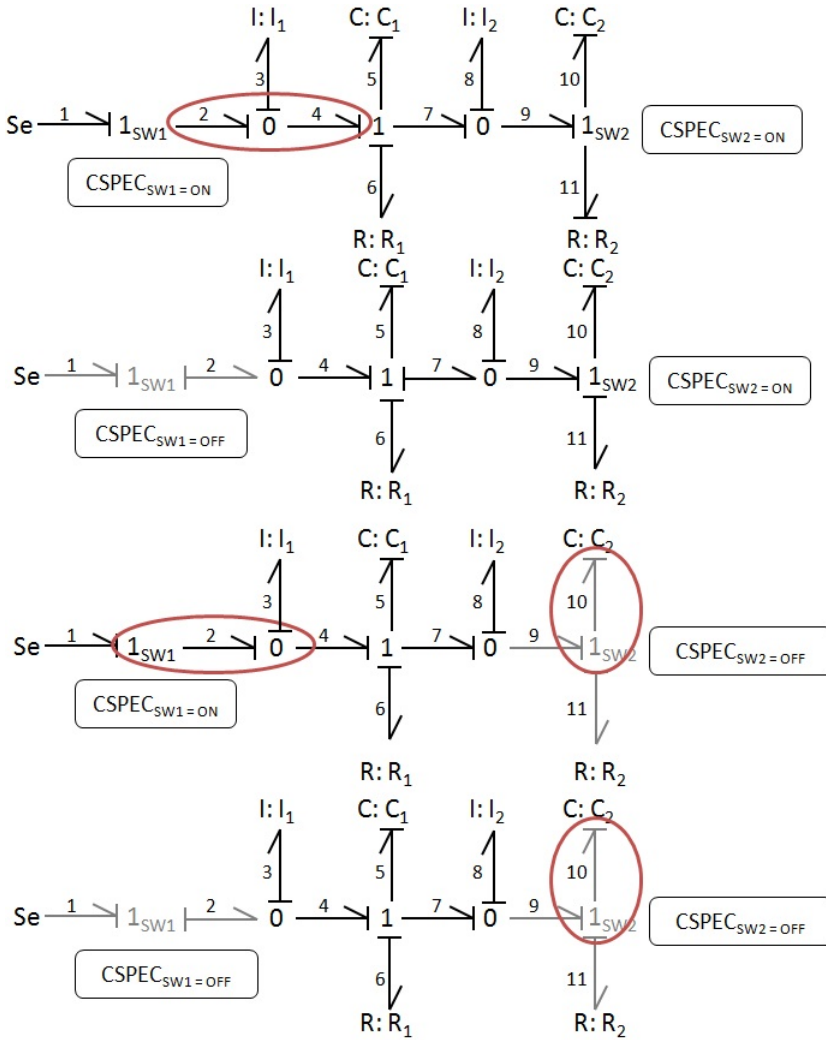


Figura 1.5: Resultados HSCAP en Circuito Eléctrico con Causalidad Derivada





Causalidad Mixta

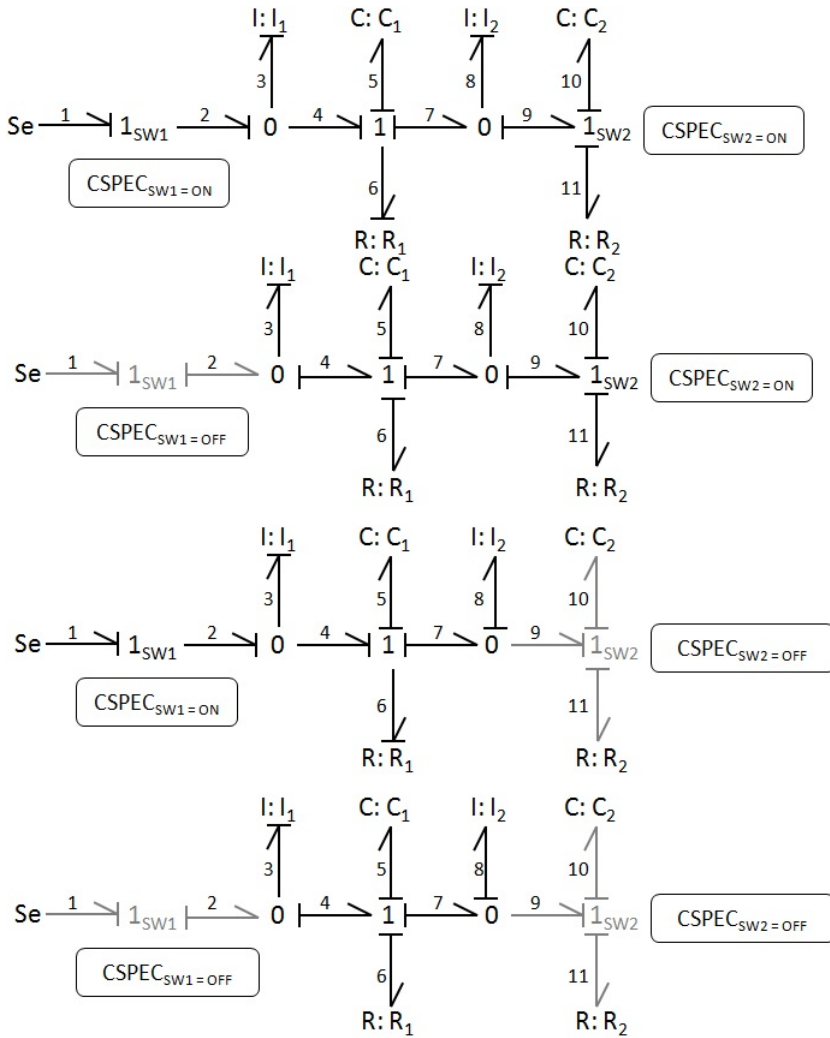


Figura 1.6: Resultados HSCAP en Circuito Eléctrico con Causalidad Mixta



### 1.2.6. Discusión de Resultados

Los resultados obtenidos al aplicar el algoritmo HSCAP sobre el sistema son los correctos. Hemos hecho un estudio de la causalidad del sistema en los tres modos posibles: integral, derivada y mixta. Los gráficos de los HBGs muestran, para cada modo de funcionamiento, la asignación causal impuesta por los algoritmos (a través del software diseñado).

Dado que este sistema se ha concebido para ilustrar el funcionamiento de HSCAP, vamos a analizar las causas de inconsistencia en los escenarios considerados:

$1_{sw1} = 1_{sw2} = ON$  (**Derivada**): Bond 2, la unión  $1_{sw1}$  le impone una causalidad opuesta a la que impone la unión 0 adyacente, con causalidad forzada por el bond determinante 3 adyacente a la intensidad  $I_1$ .

$1_{sw1} = ON, 1_{sw2} = OFF$  (**Derivada**): Bond 2, la unión  $1_{sw1}$  le impone una causalidad opuesta a la que impone la unión 0 adyacente, con causalidad forzada por el bond determinante 3 adyacente a la intensidad  $I_1$ . En este caso hay una segunda inconsistencia en el bond 10, por la causalidad forzada por el bond determinante 10 adyacente a la intensidad  $I_1$ , el cual no es compatible con la configuración de la unión  $1_{sw2}$  a OFF.

$1_{sw1} = 1_{sw2} = OFF$  (**Integral**): El sistema es incapaz de encontrar ACV.

$1_{sw1} = 1_{sw2} = OFF$  (**Derivada**): Inconsistencia en el bond 10, por la causalidad forzada por el bond determinante 10 adyacente a la intensidad  $I_1$ , el cual no es compatible con la configuración de la unión  $1_{sw2}$  a OFF.

En todos los escenarios en los que no se ha detectado ACV, salvo la configuración en causalidad integral  $1_{sw1} = 1_{sw2} = OFF$  el algoritmo detiene su funcionamiento en la etapa de asignación de causalidades fijas y forzadas. El algoritmo intenta asignar en estos casos una causalidad a un bond con causalidad ya asignada; de tipo diferente a ésta. En esta etapa, las causalidades asignadas son inalterables independientemente del modo de funcionamiento del sistema. Por ello, el intento de reescritura de causalidades de diferentes tipo es indicio de inconsistencias estructurales.

Este mecanismo ha sido propuesto en nuestro estudio, e incluido dentro de la formulación del algoritmo HSCAP, para realizar una búsqueda de ACV más eficiente. De este modo la búsqueda se detiene en la primera etapa del algoritmo. De no haber considerado esta propiedad, el algoritmo habría realizado un proceso de backtracking con las causalidades arbitrarias restantes hasta probar con todas las configuraciones posibles y determinar que no existe ninguna ACV.

El escenario de causalidad integral y modo  $1_{sw1} = 1_{sw2} = OFF$  corresponde a un modo de funcionamiento sin ACV. En este caso, la inconsistencia estructural es localizada por el algoritmo, que detecta una inconsistencia a la hora de asignar causalidad al bond 4, el cual tiene dos causalidades *forzadaSJ* diferentes, dependientes de las uniones  $1_{sw1}$  y  $1_{sw2}$ .

Como se puede observar, consultando las observaciones hechas respecto al sistema anteriormente, los resultados del algoritmo se corresponden con los expuestos en [Roychoudhry08]. En este caso, dado que en los tres primeros modos de funcionamiento contemplados, solo hay causalidades forzadasSJ en los bonds 2 y 4 etiquetadas por la unión

$1_{sw1}$ , que coinciden con las causalidades forzadas de la propuesta de [Roychoudhry08], no hay diferencia en cuanto a rendimiento. Detectaremos un mayor rendimiento en nuestra propuesta cuando trabajemos con configuraciones en las que haya causalidades forzadas SJ etiquetadas por más de una unión-switching. En nuestro caso de estudio, esta configuración solo aparece en el cuarto modo, donde el bond 4 tiene una causalidad forzada por las dos uniones-switching. Como dicho modo no tiene ACV, resulta imposible hacer la comparativa de rendimiento entre propuestas (dado que en una de ellas se exige que haya ACV).

En el caso de la causalidad derivada y mixta, considerada exclusivamente en nuestro estudio, los resultados son correctos a la vista de los grafos generados.

### 1.3. Circuito Eléctrico con dos Fuentes Enfrentadas

#### 1.3.1. ¿Qué es?

Este sistema muestra un diseño concebido para funcionar en dos modos excluyentes. Dicho diseño está asociado a un circuito eléctrico con dos fuentes enfrentadas entre sí. Un caso de estudio interesante desde el punto de vista que se trata de un sistema cuyo modo de funcionamiento **todo a ON** no tiene ACV, lo que se corresponde con la configuración en la que los dos interruptores asociados a las fuentes están activados.

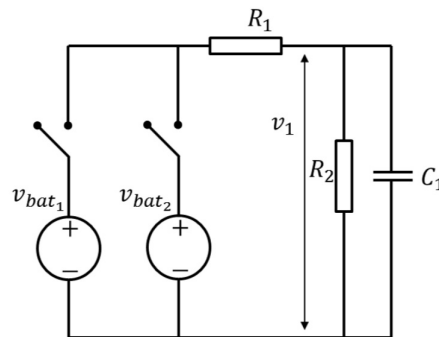


Figura 1.7: Circuito Eléctrico con dos Fuentes Enfrentadas c.f.a [Pulido&Alonso15]

#### 1.3.2. Modelo de HBG

En la figura 5.8 se muestra el modelo de HBG del sistema. Dicho sistema presenta una asignación causal válida para todos sus modos de funcionamiento, salvo aquel en el que las dos uniones switching de tipo 1 están a ON. Esto se debe a que dicha configuración impone a la unión  $0_1$  dos bonds determinantes, con causalidad fija, lo que da lugar a una asignación causal inconsistente.

Debido a que el sistema contempla un único SHBG-PC, cuya estructura es la del sistema completo, realizaremos el estudio de los algoritmos de HSCAP y HBG-PCs sobre el mismo.

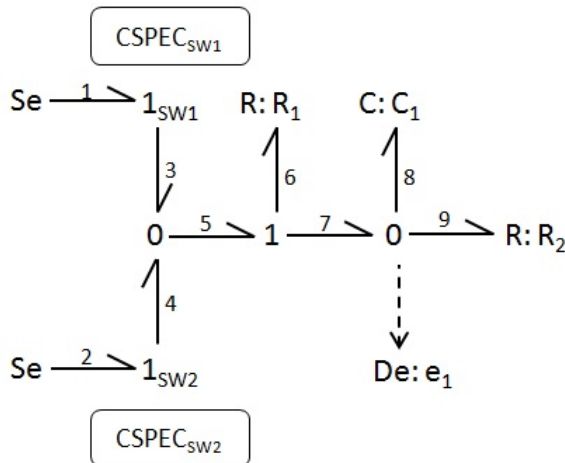


Figura 1.8: HBG de Sistema de Fuentes Enfrentadas

### 1.3.3. Conjunto de HPCs asociados al HBG

El sistema contempla un único HPC, cuya estructura es la del sistema completo, pero que tiene dos BG-PCs según los modos elegidos (figura 5.8).

Observando la configuración del HPC se ve que independientemente del tipo de causalidad considerada en el estudio de HSCAP el único modo de funcionamiento inconsistente es el de  $1_{sw1} = 1_{sw2} = ON$ , al imponer a  $0_1$  dos bonds determinantes. Para el resto de modos existe ACV. Considerando que solo hay un condensador en el sistema, conectado a la unión  $0_2$ , que a su vez tiene conectada una resistencia  $R_2$ ; la existencia de ACV de tipo derivada o mixta es similar a la de tipo integral. Esto se debe a que el cambio de causalidad en el condensador es absorbido por la resistencia  $R_2$ , adyacente a la unión  $0$  a la que está conectada el condensador.

### 1.3.4. Resumen de Resultados

SHBG-PCs de Sistema de Circuito Eléctrico		
HPC	Componentes	Nodo Discrepancia
<i>SHBG-PC-1</i>	$Se_1, Se_2, 1_{sw1}, 1_{sw2}, 0_1, 1_1, R_1, 0_2, C_1, R_2$	$De_1$

SHBG-PC-1 Sistema de Circuito Eléctrico			
Modo	C.Integral	C.Derivada	C.Mixta
$1_{sw1} = 1_{sw2} = ON$	✗	✗	✗
$1_{sw1} = OFF, 1_{sw2} = ON$	✓	✓	✓
$1_{sw1} = ON, 1_{sw2} = OFF$	✓	✓	✓
$1_{sw1} = 1_{sw2} = OFF$	✓	✓	✓



### 1.3.5. Resultados de Algoritmo HBG-PCs

El algoritmo obtiene el mismo HBG-PC que el de la figura 5.8.

### 1.3.6. Resultados de Algoritmo HSCAP sobre los HPCs calculados

Causalidad Integral

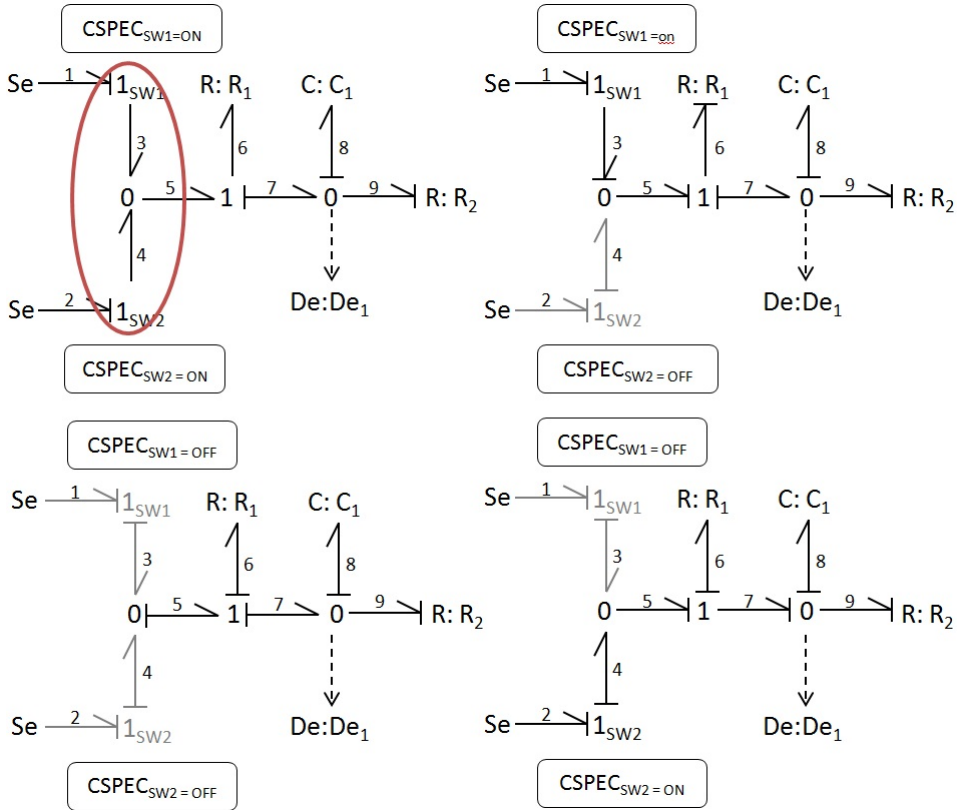


Figura 1.9: Resultados HSCAP en HPC-1 de Circuito Eléctrico con Causalidad Integral



Causalidad Derivada

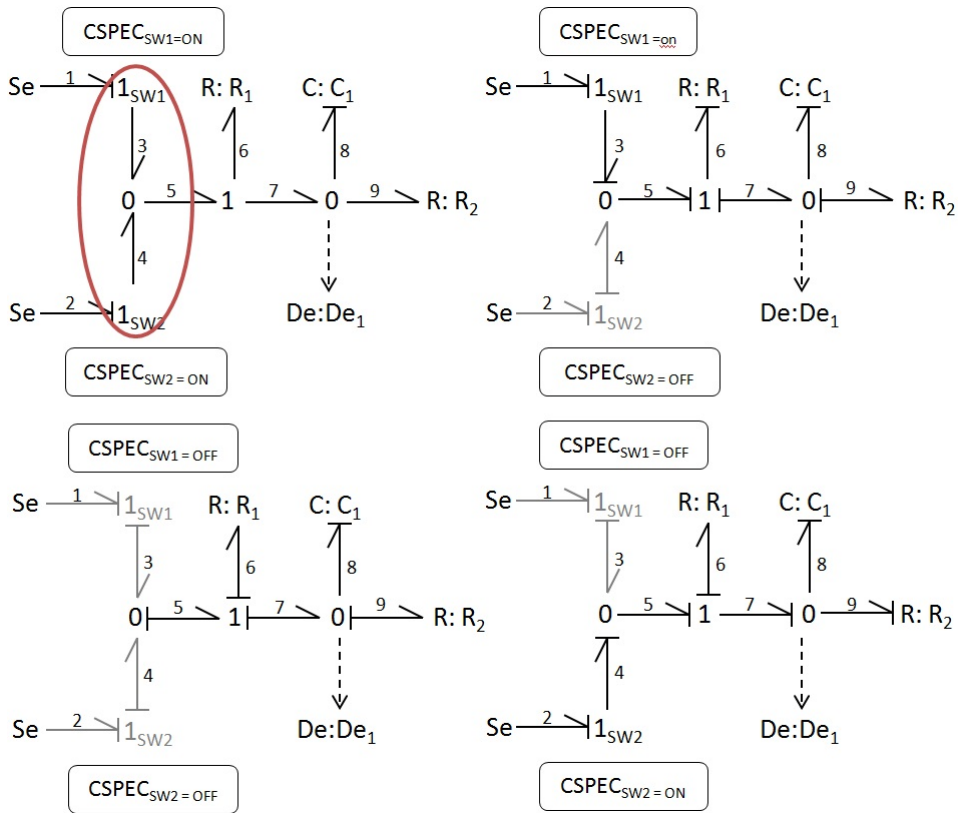


Figura 1.10: Resultados HSCAP en HPC-1 de Circuito Eléctrico con Causalidad Derivada



Causalidad Mixta

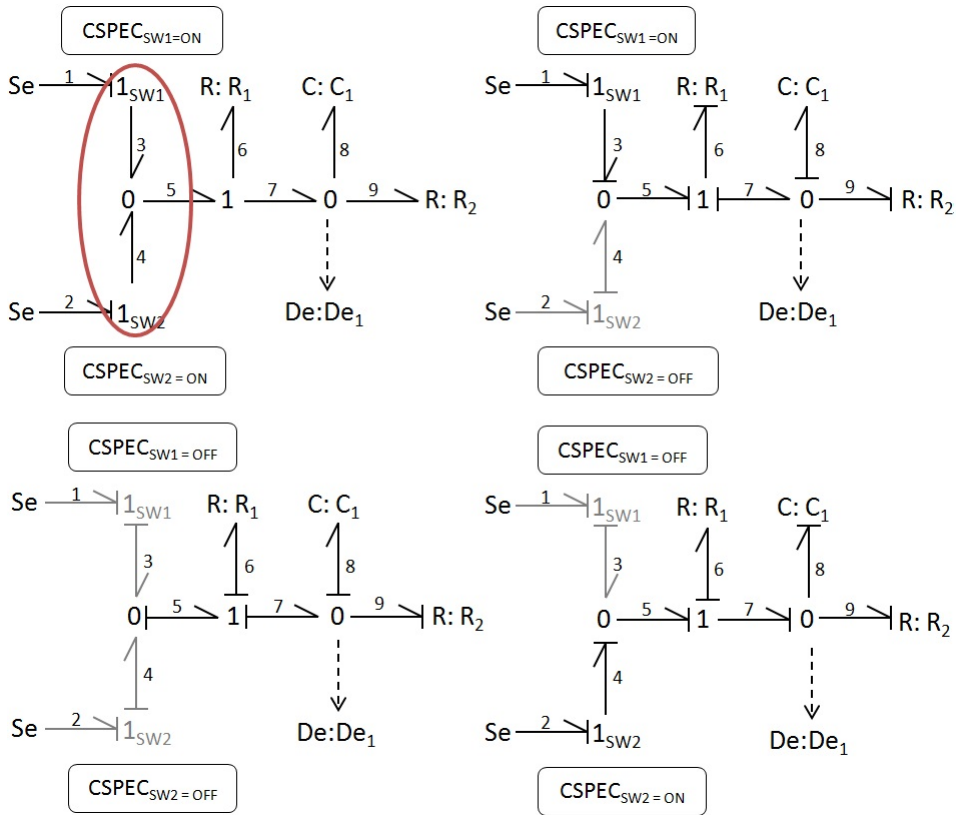


Figura 1.11: Resultados HSCAP en HPC-1 de Circuito Eléctrico con Causalidad Mixta

### 1.3.7. Conclusiones de Resultados

Los resultados obtenidos coinciden con las observaciones formuladas previamente. La configuración de las fuentes de esfuerzo conectadas a una unión 0 común a través de uniones switching 1 hacen imposible ante cualquier tipo de causalidad obtener una ACV con una configuración  $1_{sw1} = 1_{sw2} = ON$ . En el resto de modos existe ACV gracias a que los cambios de causalidad en el componente C generan una reconfiguración causal que es absorbida por las resistencias adyacentes a las uniones 1 y 0, dejando inalterada la causalidad del resto del sistema.

El algoritmo HSCAP detecta la inconsistencia en la etapa de asignación de causalidades fijas y forzadas, única etapa de asignación del sistema al no contemplar ninguna asignación causal arbitraria.

En términos de eficiencia, las propiedades de nuestra propuesta de HSCAP no son perceptibles en la reasignación causal del caso de estudio. Al haber dos uniones-switching con dos bonds, de los cuales, solo uno tiene causalidad forzada, los cambios de modo contemplados suponen una reasignación causal en la que no se aprovechan las cualidades de las causalidades *forzadas* *SJ*. Cabe destacar que en los modos en los que las uniones están a ON y OFF, la unión a ON impone el bond determinante de la unión 0 adyacente. Esto hace que el bond con causalidad *forzada* *SJ* de la unión a OFF quede etiquetado con la unión a ON. Este es uno de los escenarios en los que, partiendo de estos modos, se detecta automáticamente la inconsistencia estructural asociada al cambio a modo todo ON. El bond con causalidad *forzada* *SJ* de la unión a OFF intenta cambiar de asignación causal, porque es el único que puede hacerlo, pero al estar etiquetado por la unión a ON su causalidad está forzada y no puede cambiar, dando lugar a la inconsistencia.

## 1.4. Sistema de Cuatro Tanques

Este sistema es uno de los casos de estudio en [Moya13], por lo que resulta ideal para nuestro estudio sobre el cálculo de HPCs y búsqueda de ACV. Este sistema basa su funcionamiento en la dinámica de fluidos.

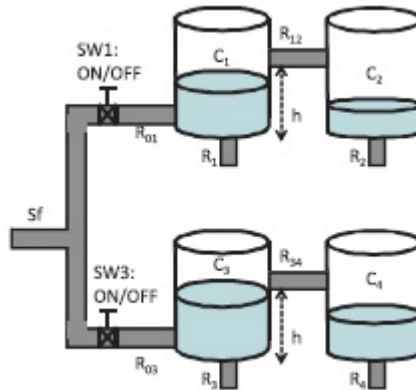


Figura 1.12: Sistema de Cuatro Tanques

La configuración del sistema corresponde a la de una fuente de flujo de masa entrante





$Sf$ , la cual bifurca su recorrido en dos caminos que conectan con los tanques  $T_1$  y  $T_3$ . A la entrada de cada tanque se dispone un interruptor de paso que, en función de su configuración, permite o no el paso del flujo de masa al tanque adyacente. Estos interruptores representan en el modelo de HBG las uniones switching tipo 1  $Sw_1$  y  $Sw_3$ . Cuando el líquido dentro de los tanques rebasa una cierta altura, se produce un trasvase de flujo entre los tanques. La altura  $h$  determina el punto en el que comienza a haber un intercambio de flujos entre los tanques conectados. Esta situación se entiende como una transición autónoma de cambio de modo de las uniones switching asociadas a estas resistencias ( $Sw_2$  y  $Sw_4$ ).

### 1.4.1. Modelo de HBG

El modelo de HBG del sistema es el mostrado en figura 5.13. Estamos ante un HBG con muchas particularidades a nivel de información causal. La primera de ellas es su configuración simétrica, observada desde la fuente de flujo como punto de referencia. La configuración del grafo esta formada por la unión de dos ramas de nodos idénticas, conectadas por un mismo extremo a la fuente de flujo. A nivel de causalidad se observa que la simetría no impone una asignación causal simétrica. El hecho de que las uniones tengan un determining bond impide que ciertas configuraciones simétricas dispongan de una causalidad simétrica. El caso de estudio es uno de esos ejemplos.

Otra característica del HBG es su asignación causal en modo integral. Debido a que se sitúan condensadores adyacentes a las uniones 0, todas estas uniones tienen impuestas una causalidad forzada por el determining bond de dichos condensadores. La propagación de esta causalidad impone una causalidad también forzada en las uniones switching  $SW_2$  y  $SW_4$ . Las únicas causalidades que quedan como arbitrarias son las asociadas a las uniones switching  $Sw_1$  y  $Sw_3$ .

Considerando los posibles cambios de modo en el HBG, observamos que en el caso de las uniones  $SW_2$  y  $SW_4$  los cambios entre modos ON y OFF no suponen apenas de labor de reasignación. Estas uniones tienen como único bond con causalidad el adyacente con el elemento resistencia. Esta configuración fuerza a que frente a cambios de modo, la causalidad del bond determinante se asigne al bond adyacente a la resistencia.

En el caso de las uniones  $SW_1$  y  $SW_3$  se observa que el cambio de modo en cualquiera de las dos uniones solo provoca cambios en causalidad si la unión que cambia de modo tiene su determining bond adyacente a  $0_1$ . En este escenario se produce una reasignación causal que fija a la unión switching opuesta el bond adyacente a  $0_1$  como determinante. En el caso contrario, la reconfiguración causal la absorbe la resistencia adyacente a la unión, evitando que se propague más allá del componente.

Debido a que las uniones switching  $Sw_1$  y  $Sw_3$  solo tienen bonds con causalidades arbitrarias y fijas, y  $Sw_2$  y  $Sw_4$  solo tienen un bond con causalidad *forzada*, las cuales solo están etiquetadas por los bonds adyacentes, estamos ante un HBG donde las mejoras de nuestra propuesta de HSCAP para los modos de funcionamiento con ACV no son efectivas.

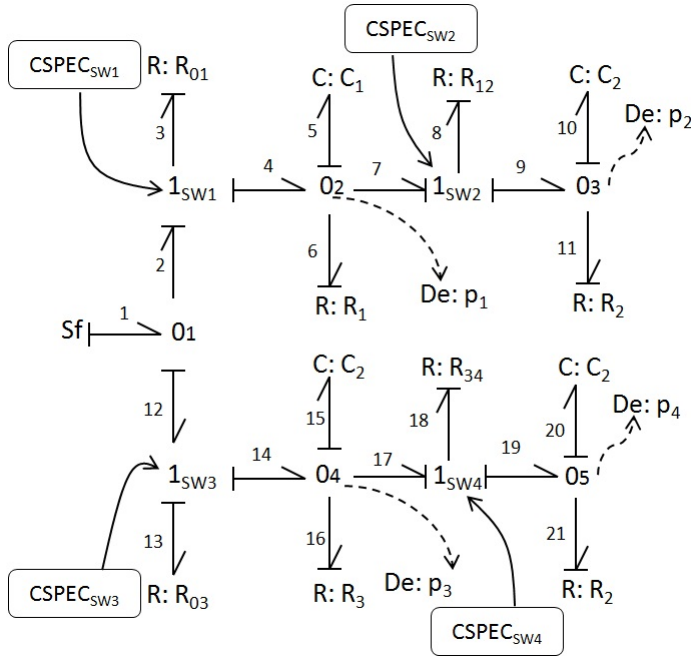


Figura 1.13: HBG de Sistema de Cuatro Tanques

En los modos en que las uniones  $Sw_1$  y  $Sw_3$  están a OFF corresponden a modos inconsistentes, debido a que esta configuración impide asignar a  $0_1$  un determining bond. En estos casos, el algoritmo es incapaz de detectar la inconsistencia en los pasos 1 y 2 del algoritmo, dado que la inconsistencia se encuentra asociada a un bond con causalidad arbitraria (de modo que la detección tiene lugar una vez se prueban sin éxito todas las asignaciones causales posibles).

### 1.4.2. Conjunto de HPCs asociados al HBG

Dado que procederemos al estudio del algoritmo de HPCs, así como el de HSCAP, resulta necesario enumerar los HPCs contemplados en [Moya13] asociados al sistema de cuatro tanques, que se pueden ver en la figura 5.16.

Como puede verse, existe una correspondencia dos a dos entre los HPCs y su estructura, debido a la simetría del sistema.

Si observamos los HPCs 1 y 3, vemos que la configuración del grafo cumple con las mismas propiedades que las del sistema original, siendo los bonds asociados a las uniones  $1_{sw1}, 1_{sw3}$  los únicos con causalidad arbitraria. Esto hace que las únicas configuraciones sin ACV son aquellas en las que  $1_{sw1} = 1_{sw3} = OFF$ . Dado que solo hay un capacidad  $C_1$  asociado a la unión  $0_2$ , con una resistencia  $R_1$  adyacente, el cambio de tipo de causalidad a derivada hace que la reconfiguración causal de  $0_2$  sea absorbido por la resistencia. Por ello, la existencia de ACV de tipo derivada o mixta es idéntica al caso de causalidad de tipo integral.

En el caso de los HPCs 2 y 4, la resistencia adyacente a la unión switching absorbe la reconfiguración causal en su único cambio de modo posible, por lo que dispone ACV

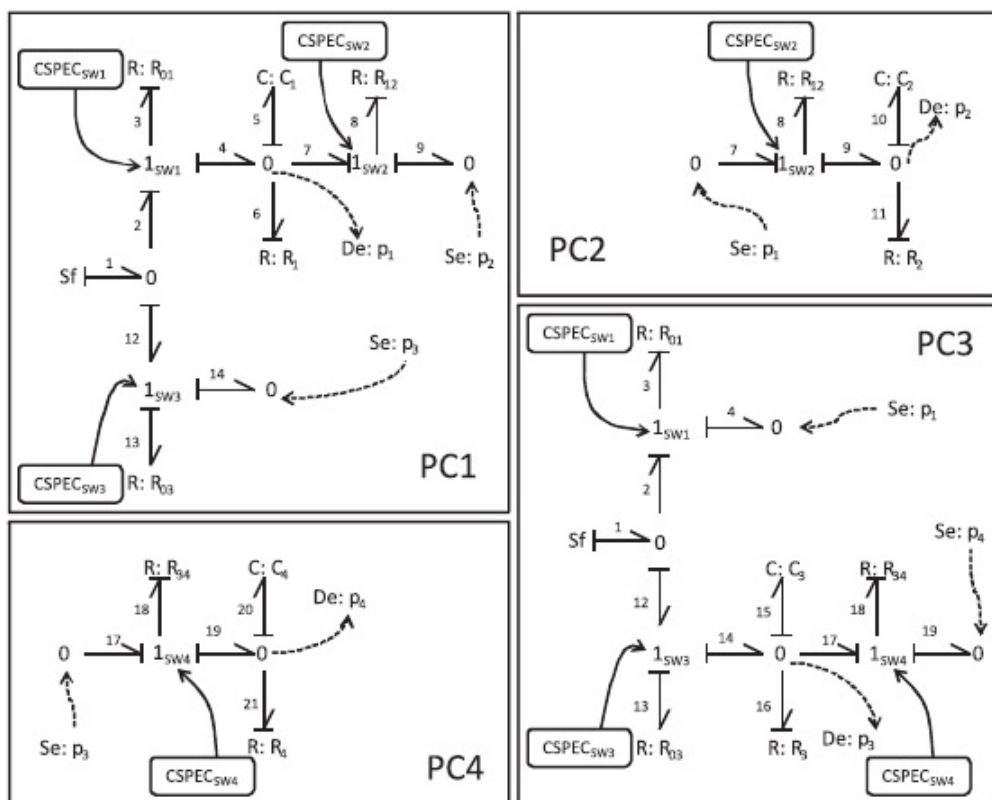


Figura 1.14: HBG-PCs del Sistema de Cuatro Tanques c.f.a [Moya13]

en todos sus modos de funcionamiento. La presencia de una única capacidad, asociado a una unión 0, con una resistencia adyacente, indica que independientemente del tipo de causalidad considerada, existe ACV.

### 1.4.3. Resultados de Algoritmo HBG-PCs

Las figuras 5.15 a 5.18 muestra la lista de HBG-PCs calculados, con su asignación causal en modo integral y con configuración todo a ON.

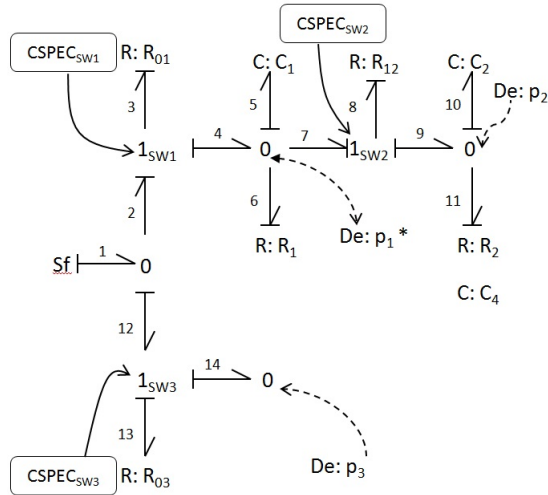


Figura 1.15: SHBG-PC 1 de Sistema de Cuatro Tanques

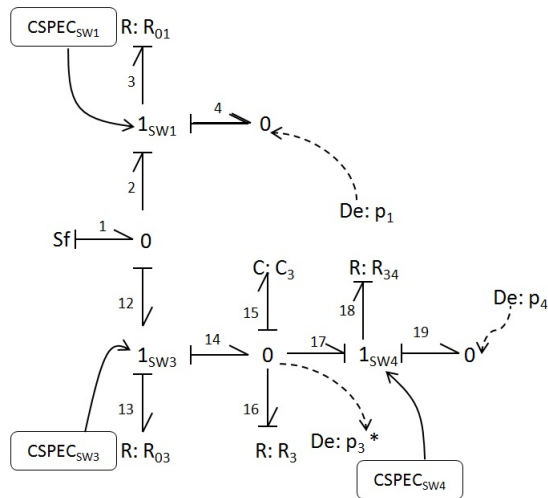


Figura 1.16: SHBG-PC 2 de Sistema de Cuatro Tanques





SHBG-PC-2 Sistema de Cuatro Tanques			
Modo	C.Integral	C.Derivada	C.Mixta
$1_{sw3} = 1_{sw4} = 1_{sw1} = ON$	✓	✓	✓
$1_{sw3} = OFF, 1_{sw4} = 1_{sw1} = ON$	✓	✓	✓
$1_{sw3} = 1_{sw1} = ON, 1_{sw4} = OFF$	✓	✓	✓
$1_{sw3} = 1_{sw4} = ON, 1_{sw1} = OFF$	✓	✓	✓
$1_{sw3} = 1_{sw4} = OFF, 1_{sw1} = ON$	✓	✓	✓
$1_{sw3} = 1_{sw1} = OFF, 1_{sw4} = ON$	✗	✗	✗
$1_{sw4} = 1_{sw1} = OFF, 1_{sw3} = ON$	✓	✓	✓
$1_{sw3} = 1_{sw4} = 1_{sw1} = OFF$	✗	✗	✗

SHBG-PC-3 Sistema de Cuatro Tanques			
Modo	C.Integral	C.Derivada	C.Mixta
$1_{sw2} = ON$	✓	✓	✓
$1_{sw2} = OFF$	✓	✓	✓

SHBG-PC-4 Sistema de Cuatro Tanques			
Modo	C.Integral	C.Derivada	C.Mixta
$1_{sw4} = ON$	✓	✓	✓
$1_{sw4} = OFF$	✓	✓	✓

### 1.4.5. Discusión de Resultados

Los resultados obtenidos coinciden con las propuestas en [Moya13]. El cálculo de HBG-PCs mediante SHBG-PCs ha extraído con éxito los cuatro HPCs existentes en el sistema, los cuales son estructuralmente idénticos dos a dos debido a la simetría del sistema.

Al aplicar el algoritmo HSCAP sobre cada uno de los HPCs, considerando diferentes tipos de causalidad, solo se ha encontrado ACV para los modos en los que alguna de las uniones-switching asociadas a los interruptores que controlan el paso del flujo de masa a los tanques están a ON. Observando los resultados del software se observa en todo momento que el origen de las inconsistencias, en los modos donde no hay ACV, se debe a las dos uniones switching adyacentes a la unión 0 que conecta la fuente de flujo con el sistema ( $1_{sw1}, 1_{sw3}$ ). Al desactivar las dos uniones se impide asignar a la unión 0 su bond determinante, lo que da lugar a la inconsistencia.

Cuando las dos uniones cambian al unísono se impone una causalidad inconsistente debido a que se requiere una simetría perfecta de las asignaciones en las dos ramas del HBG, algo imposible debido a que el punto de unión de las mismas siempre lo marca una unión tipo 0 cuya causalidad, en este caso debido a la fuente de flujo adyacente, no puede ser la misma para ambas ramas.

En la figura 5.21 hemos querido ilustrar esta observación por medio de una serie de SHBGs donde mostramos la configuración causal de las uniones  $1_{sw1}, 1_{sw3}$  para sus diferentes modos de funcionamiento. Como puede verse, salvo en el escenario todo a OFF, la configuración causal es la misma, ya que el bond determinante de la unión 0 va siempre asociado a la unión con modo a ON.

Las consideraciones acerca de los efectos de la simetría formuladas en este apartado se limitan solo al caso de estudio contemplado, debido a su particularidad de disponer de una serie de ramas idénticas con causalidad forzada, y una conexión de dichas ramas donde el extremo que se conecta es una unión-switching.

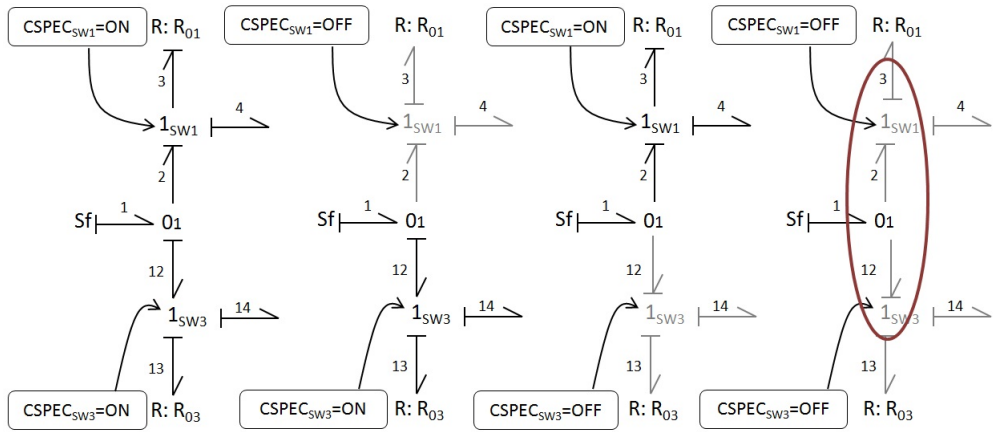


Figura 1.19: Asignación causal de las uniones  $1_{sw1}$ ,  $1_{sw3}$  en función a sus diferentes modos de funcionamiento

En otros HBGs, la simetría no tiene por qué ser condición para que la causalidad del sistema sea forzada, aún considerando que las ramas de elementos simétricos tengan causalidad forzada. Lo que si es posible afirmar es que estas estructuras generan pares de HPCs estructuralmente idénticos (dado que el cálculo depende exclusivamente de la estructura del HBG).

### 1.5. ROS

El Sistema de Osmosis Inversa (Reverse Osmosis System, **ROS**) es el último de los casos de estudio contemplados. El ROS es un subsistema del Sistema Avanzado de Recuperación de Agua (Advanced Water Recovery System, **AWRS**), parte del Sistema de Soporte Vital Avanzado (Advanced Life Support, **ALS**); empleado en las misiones tripuladas de larga duración de la NASA, capaz de proporcionar agua potable a partir de agua con impurezas, las cuales son eliminadas por medio de filtros. El ROS corresponde al subsistema encargado de eliminar las partículas inorgánicas del agua por medio de un sistema de filtrado por membrana a alta presión.

Como puede verse en la figura 5.22 su funcionamiento parte del flujo de masa entrante del subsistema de **Procesado de Desechos Biológicos** (Biological Waste, Processor, **BWP**). La bomba de alimentación está siempre a ON, por lo que dicho flujo es continuo durante todo el ciclo de procesamiento. Este flujo es mezclado con el flujo de recirculación, cuando la bomba de circulación está a ON, circulando por el depósito tubular. Al final de éste se sitúa una membrana responsable de filtrar el flujo para eliminar las impurezas. El agua filtrada se dirige al **Subsistema de Post Procesamiento** (Post Processing Subsystem, **PPS**), mientras que el flujo no del todo limpio se redirige a una válvula multiposición. Dependiendo del modo de funcionamiento, la válvula puede estar en posición 1, 2 o purga. La posición 1 redirige el flujo por el camino largo (previo al depósito tubular), la posición 2 redirige el flujo por el camino corto (después del depósito tubular) y la posición purga dirige los residuos líquidos contenidos en el filtro al **Subsistema de Evaporación de Aire** (Air Evaporation Subsystem, **AES**). Existe un cuarto modo de

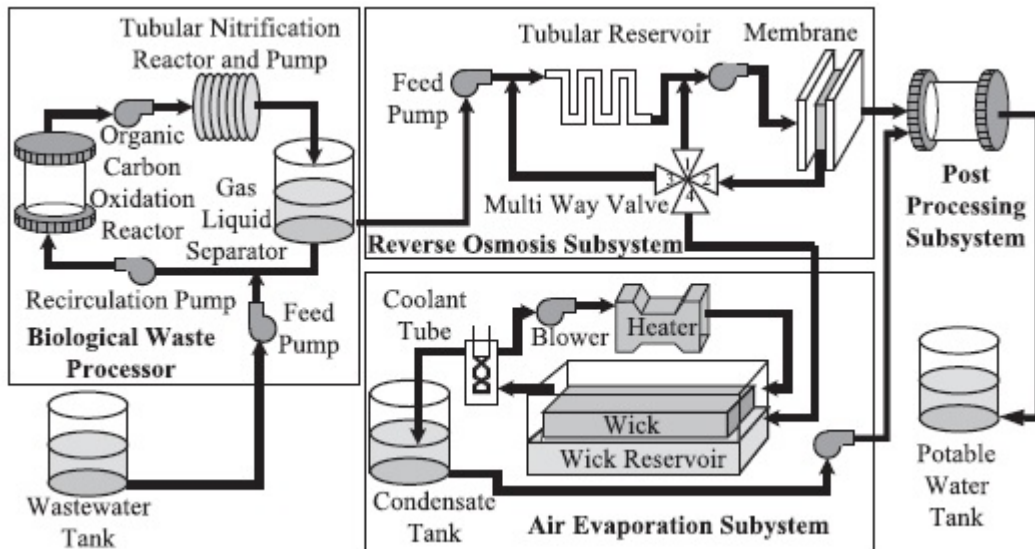


Figura 1.20: ROS c.f. [Moya13]

funcionamiento, llamado **slough** (cambio de membrana) , empleado para limpiar la membrana. En este modo, el agua es redirigida en sentido contrario a las agujas del reloj en el ciclo pequeño. El modo tiene lugar periódicamente, pero no es parte del funcionamiento normal del ROS. El funcionamiento del sistema empieza en modo 1, seguido de modo 2 y finalmente, el funcionamiento en modo purga; de modo que una vez terminado dicho modo se reinicia el funcionamiento desde el modo inicial.

### 1.5.1. Modelo de HBG

El modelo de HBG del sistema es el mostrado en la figura 5.21. En el caso del sistema ROS, su HBG (figura 5.23) está dividido en dos subsistemas. Para entender fácilmente las diferentes partes del mismo: bombas, sistema de tuberías, rotación hidráulica (**R2H**) y el modelo de conductividad. Las señales de control  $M1$ ,  $M2$  y  $P$  modelan los cambios en la válvula multiposición, y consecuentemente, determinan el modo de funcionamiento actual en el sistema. Esta válvula está modelada en el área sombreada del sistema de tuberías. Las tres señales de control son mutuamente exclusivas, de modo que solo una de ellas puede estar en modo ON a la vez.



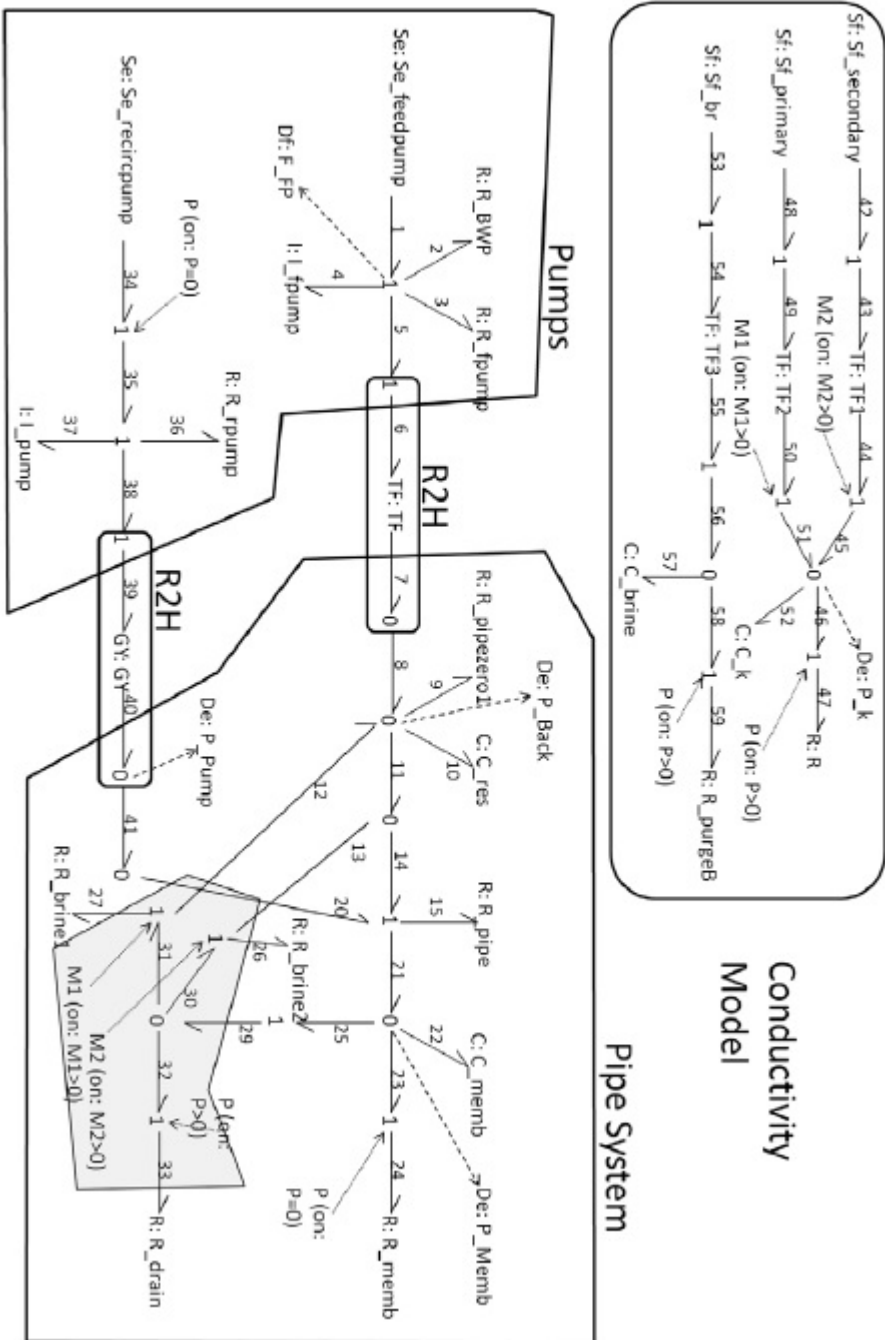


Figura 1.21: Modelo HBG de ROS [Moya13]



En el modo de funcionamiento 1 la señal de control  $M1$  es igual a 1 (y la de  $M2$  y  $P$  a 0). En este modo, la bomba de recirculación está a ON y el camino con el que se conecta es el que tiene la resistencia  $R_{brine1}$ . En el modelo de conductividad, el camino activo es el que parte de la fuente  $Sf_{primary}$ . Para el modo de funcionamiento 2  $M2 = 1(M1 = P = 0)$ , la bomba de recirculación está también a ON, pero en este caso el camino conectado es aquel con el componente  $R_{brine2}$ , para el modelo de conductividad, y  $Sf_{secondary}$  es la fuente a ON en el modelo de conductividad. El funcionamiento en modo purga, tiene señales  $P = 1(M1 = M2 = 0)$ . En este modo la bomba de recirculación está a OFF y este es modelado desconectando la fuente  $Se_{secondary}$  y la resistencia de la membrana  $R_{memb}$ , la resistencia  $R_{drain}$  aparece en el sistema de tuberías así como  $R$  y  $R_{purgeB}$  en el modelo de conductividad.

Existen cinco mediciones en el sistema: 1) el flujo de salida de la bomba de alimentación, que es el flujo de entrada al sistema, 2) la presión en el depósito tubular, 3) la presión en la membrana, 4) la presión de salida de la bomba de recirculación y 5) la concentración de líquido.

Otro detalle de la configuración de este sistema es que, con causalidad integral, tiene una causalidad fija en todos los bonds que definen el sistema. Esto puede verse en el conjunto de condensadores adyacentes a uniones 0 e inductancias adyacentes a uniones 1, que inducen una causalidad forzadas que se propagan hasta cubrir por completo todas las causalidades de los bonds asociados al sistema.

### 1.5.2. Conjunto de HPCs asociados al HBG

El modelo de HBG del sistema tiene asociados una serie de HPCs, enumerados en [Moya13], bajo la precondition de que todas las uniones switching estén configuradas a ON y considerando causalidad integrada. En total son cinco los HPCs, asociados a cada una de las mediciones del sistema.

Estos HPCs fueron calculados:

- Asumiendo que existía ACV con todas las uniones-switching a ON y causalidad integral.
- Computando el BG-PC a partir de un modelo TCG extraído del HBG causal.

En las figuras 5.23 a 5.27 se listan el conjunto de HPCs calculados.

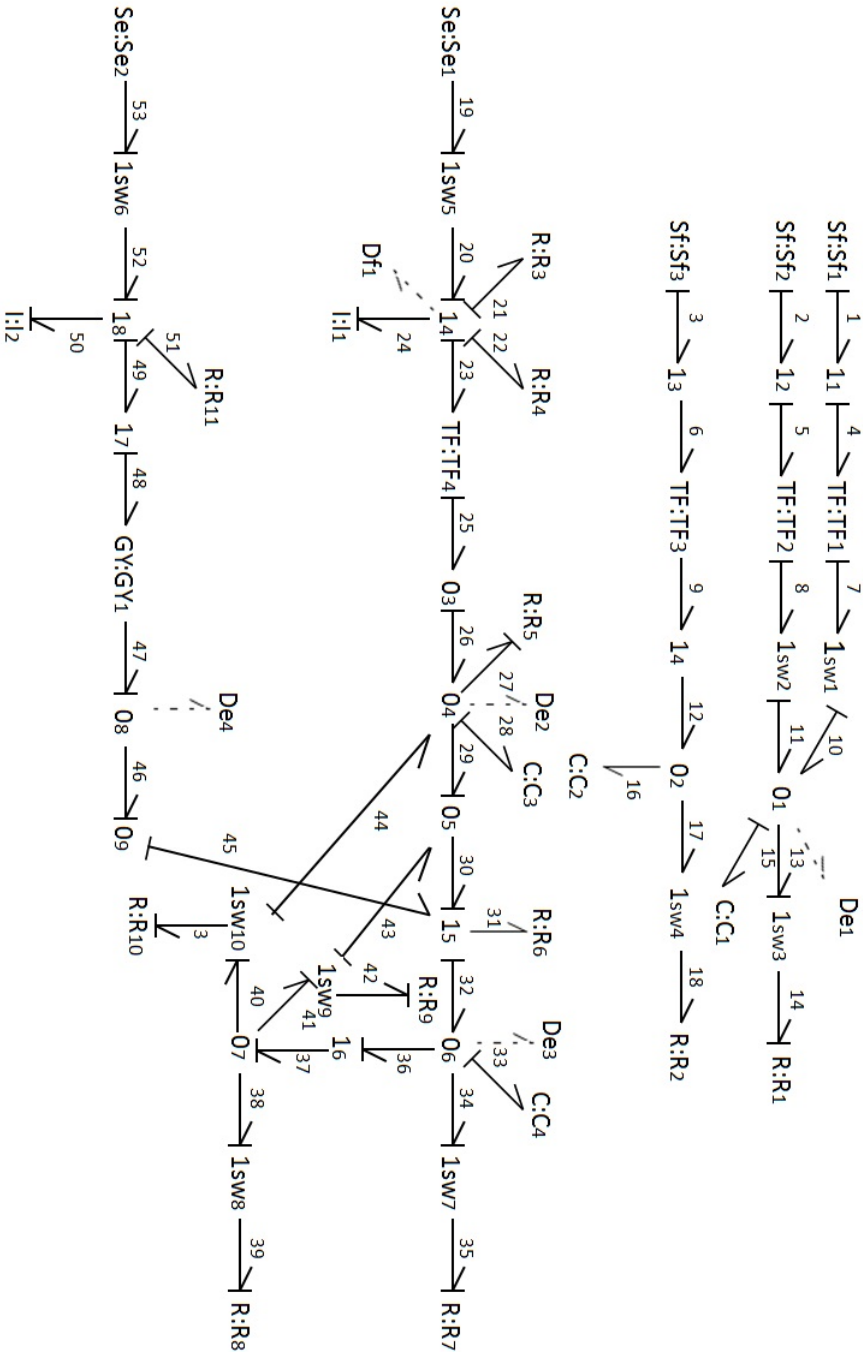


Figura 1.22: Modelo HBG de ROS con asignación causal integral

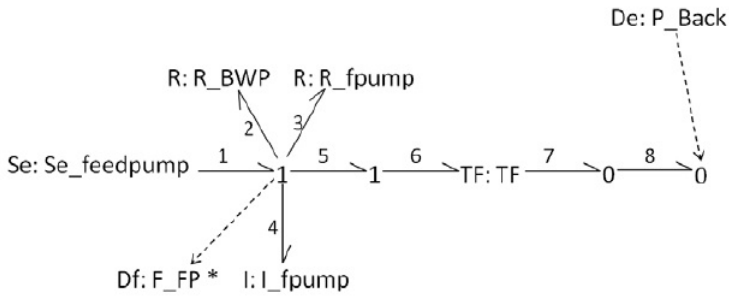


Figura 1.23: HPC-1 asociado a modelo HBG de ROS

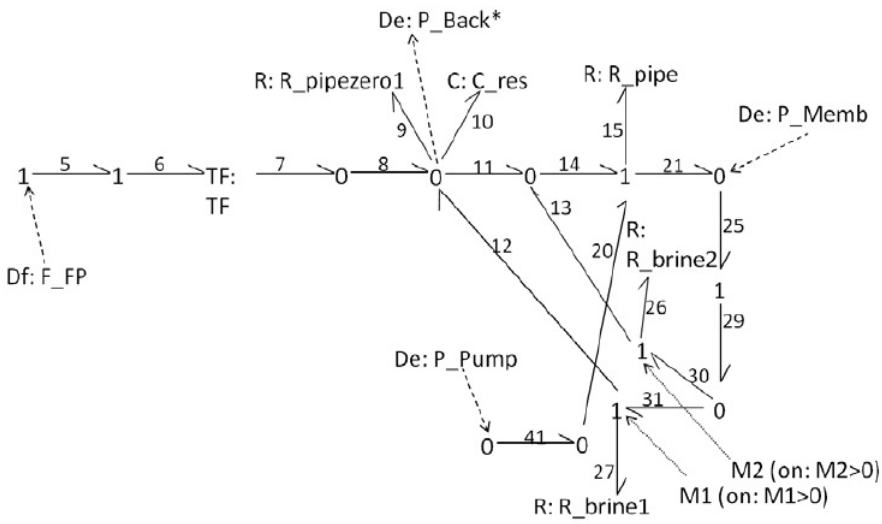


Figura 1.24: HPC-2 asociado a modelo HBG de ROS

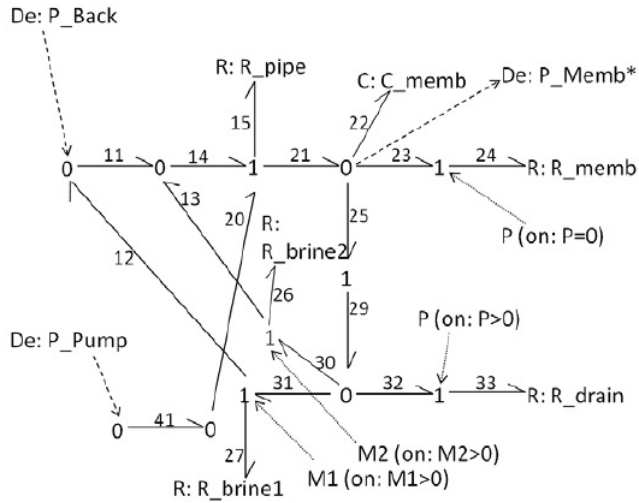


Figura 1.25: HPC-3 asociado a modelo HBG de ROS

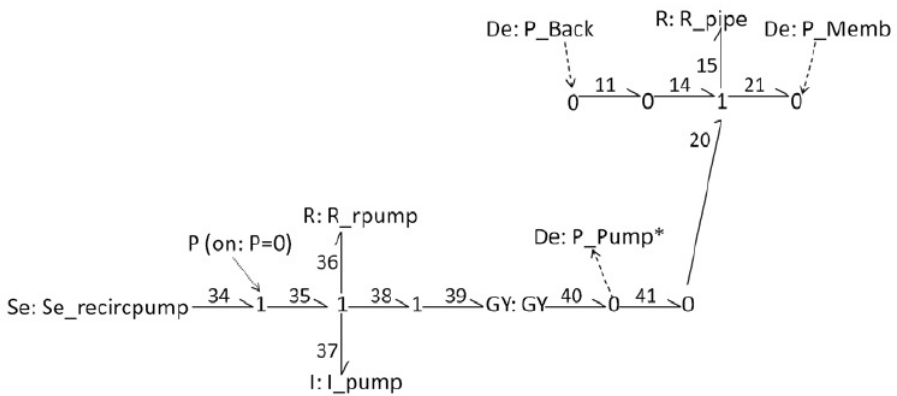


Figura 1.26: HPC-4 asociado a modelo HBG de ROS

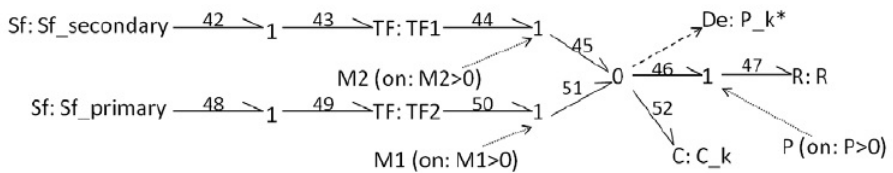


Figura 1.27: HPC-5 asociado a modelo HBG de ROS



### 1.5.3. Resultados de Algoritmo HBG-PCs

A continuación se muestran los SHBG-PCs obtenidos con el algoritmo propuesto en este TFM.

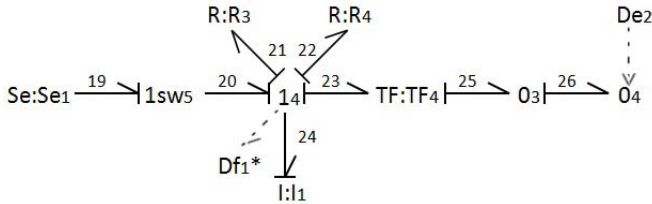


Figura 1.28: SHBG-PC-1 calculado asociado a modelo HBG de ROS

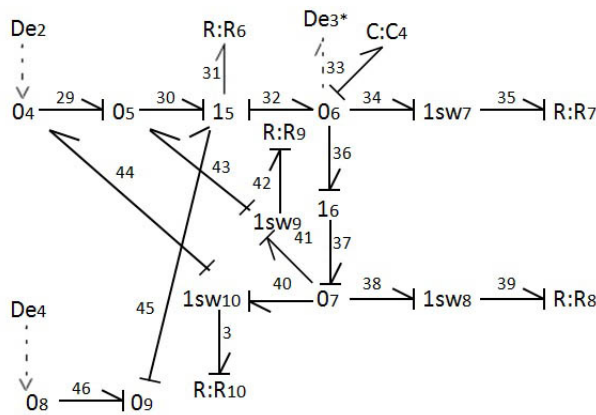


Figura 1.29: SHBG-PC-3 calculado asociado a modelo HBG de ROS

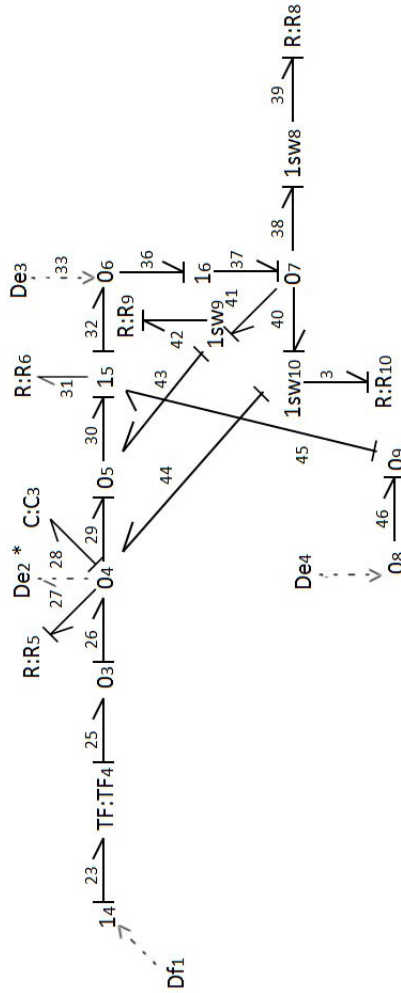


Figura 1.30: SHBG-PC-2 calculado asociado a modelo HBG de ROS

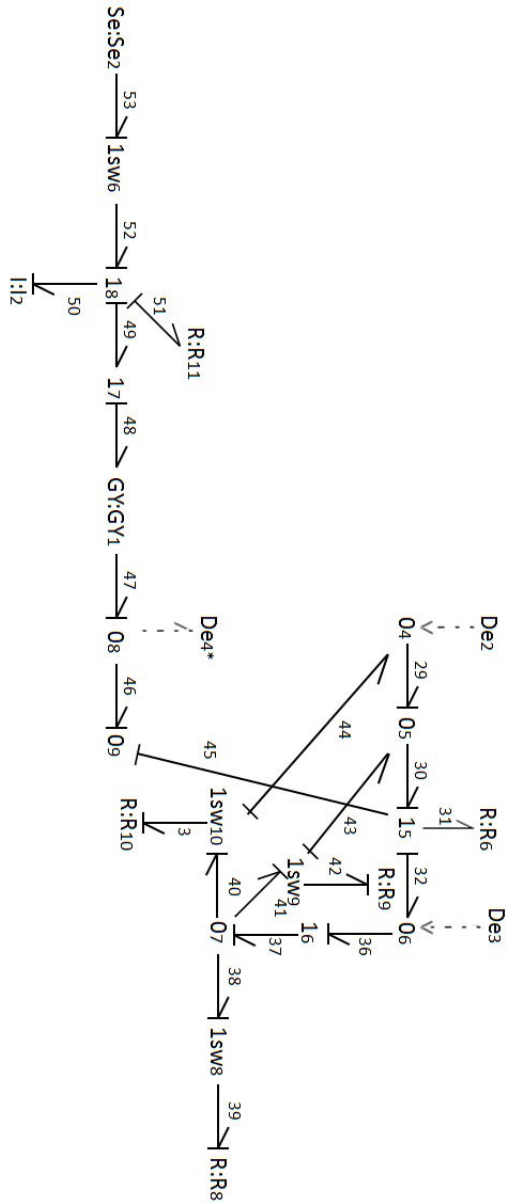


Figura 1.31: SHBG-PC-4 calculado asociado a modelo HBG de ROS



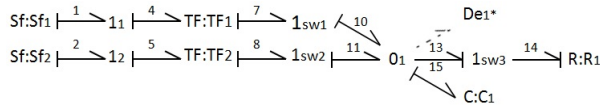


Figura 1.32: SHBG-PC-5 calculado asociado a modelo HBG de ROS

Como puede verse, en algunos de los HPCs calculados no existe una correspondencia directa entre el HBG calculado y el mostrado en [Moya13]. La razón se debe, como comentábamos en el capítulo anterior, a la configuración del HBG con uniones de mismo tipo adyacentes. Al emplear la solución no mejorada del algoritmo de cálculo de HPCs obtenemos HBG-PCs estructurales con más componentes de los debidos. Esto va a complicar considerablemente la labor de búsqueda de ACV, dado que no solo trabajamos con sistemas más complejos, sino que también estos contemplan un número de modos de funcionamiento mayor.

A continuación analizaremos los resultados de aplicar sobre los HPCs calculados, para luego dar paso a una repetición del estudio de cálculo de HPCs sobre el sistema ROS, pero esta vez recurriendo a la versión optimizada del algoritmo.

### 1.5.4. Resumen de Resultados

HBG-PCs de ROS		
HPC	Componentes	Nodo Discrepancia
<i>SHBG - PC-1</i>	$Se_1, 1_{sw5}, R_3, R_4, I_1, Df_1, TF_4, 0_3, 0_4, De_2$	$Df_1$
<i>SHBG - PC-2</i>	$Df_1, 1_4, TF_4, 0_3, 0_4, R_5, C_3, 0_5, 1_5, R_6, 0_6, De_3, R_9, 1_{sw9}, 1_6, 1_{sw10}, R_{10}, 0_7, 1_{sw8}, R_8, 0_9, 0_8, De_4$	$De_2$
<i>SHBG-PC-3</i>	$De_2, 0_4, 0_5, 1_5, R_6, 0_6, C_4, 1_{sw7}, R_7, R_9, 1_{sw9}, 1_6, 1_{sw10}, R_{10}, 0_7, 1_{sw8}, R_8, 0_9, 0_8, De_4$	$De_3$
<i>SHBG - PC-4</i>	$De_2, 0_4, 0_5, 1_5, R_6, 0_6, De_3, R_9, 1_{sw9}, 1_6, 1_{sw10}, R_{10}, 0_7, 1_{sw8}, R_8, 0_9, 0_8, GY_1, 1_7, R_{11}, I_2, 1_{sw6}, Se_2$	$De_4$
<i>SHBG - PC-5</i>	$Sf_1, Sf_2, 1_1, 1_2, TF_1, TF_2, 1_{sw1}, 1_{sw2}, 0_1, C_1, 1_{sw3}, R_1$	$De_1$

HBG-PC-1 ROS			
Modo	C.Integral	C.Derivada	C.Mixta
No SJ in Model	✓	✓	✓



HBG-PC-2 ROS			
Modo	C.Integral	C.Derivada	C.Mixta
$1_{sw8} = 1_{sw4} = 1_{sw10} = ON$	✓	✓	✓
$1_{sw8} = OFF, 1_{sw9} = 1_{sw10} = ON$	✓	✓	✓
$1_{sw8} = 1_{sw10} = ON, 1_{sw9} = OFF$	✓	✓	✓
$1_{sw8} = 1_{sw9} = ON, 1_{sw10} = OFF$	✓	✓	✓
$1_{sw8} = 1_{sw9} = OFF, 1_{sw10} = ON$	✓	✓	✓
$1_{sw8} = 1_{sw10} = OFF, 1_{sw9} = ON$	✓	✓	✓
$1_{sw9} = 1_{sw10} = OFF, 1_{sw8} = ON$	✓	✓	✓
$1_{sw8} = 1_{sw9} = 1_{sw10} = OFF$	✓	✓	✓

Observemos en el SHBG-PC 2 como indiferentemente del modo de funcionamiento seleccionado, existe ACV. Cada una de las uniones switching presentes en el HPC tienen una resistencia adyacente. Esto hace que ante cambios de modo, la resistencia absorba la reasignación causal. Remarcamos este detalle dado que en posteriores HBG-PCs estas uniones estarán presentes, y sus configuraciones no serán determinantes a la hora de comprobar si existe ACV o no.

SHBG-PC-3 ROS			
Modo	C.Integral	C.Derivada	C.Mixta
$1_{sw6} = 1_{sw8} = 1_{sw9} = 1_{sw10} = ON$	✓	✓	✓
$1_{sw6} = OFF, 1_{sw8} = 1_{sw9} = 1_{sw10} = ON$	✗	✓	✓
$1_{sw8} = OFF, 1_{sw6} = 1_{sw9} = 1_{sw10} = ON$	✓	✓	✓
$1_{sw9} = OFF, 1_{sw6} = 1_{sw8} = 1_{sw10} = ON$	✓	✓	✓
$1_{sw10} = OFF, 1_{sw6} = 1_{sw8} = 1_{sw9} = ON$	✓	✓	✓
$1_{sw7} = 1_{sw8} = OFF, 1_{sw9} = 1_{sw10} = ON$	✓	✓	✓
$1_{sw7} = 1_{sw9} = OFF, 1_{sw8} = 1_{sw10} = ON$	✓	✓	✓
$1_{sw7} = 1_{sw10} = OFF, 1_{sw8} = 1_{sw9} = ON$	✓	✓	✓
$1_{sw8} = 1_{sw9} = OFF, 1_{sw7} = 1_{sw10} = ON$	✓	✓	✓
$1_{sw8} = 1_{sw10} = OFF, 1_{sw8} = 1_{sw9} = ON$	✓	✓	✓
$1_{sw9} = 1_{sw10} = OFF, 1_{sw7} = 1_{sw8} = ON$	✓	✓	✓
$1_{sw7} = 1_{sw8} = 1_{sw9} = OFF, 1_{sw10} = ON$	✓	✓	✓
$1_{sw7} = 1_{sw8} = 1_{sw10} = OFF, 1_{sw9} = ON$	✓	✓	✓
$1_{sw7} = 1_{sw9} = 1_{sw10} = OFF, 1_{sw8} = ON$	✓	✓	✓
$1_{sw8} = 1_{sw9} = 1_{sw10} = OFF, 1_{sw7} = ON$	✓	✓	✓
$1_{sw7} = 1_{sw8} = 1_{sw9} = 1_{sw10} = OFF$	✓	✓	✓

En este caso la observación es similar a la del HBG-PC-2, debido a que la nueva unión switching presente,  $1_{sw7}$  también tiene una resistencia adyacente.



SHBG-PC-4 ROS			
Modo	C.Integral	C.Derivada	C.Mixta
$1_{sw6} = 1_{sw8} = 1_{sw9} = 1_{sw10} = ON$	✓	✓	✓
$1_{sw6} = OFF, 1_{sw8} = 1_{sw9} = 1_{sw10} = ON$	✗	✓	✓
$1_{sw8} = OFF, 1_{sw6} = 1_{sw9} = 1_{sw10} = ON$	✓	✓	✓
$1_{sw9} = OFF, 1_{sw6} = 1_{sw8} = 1_{sw10} = ON$	✓	✓	✓
$1_{sw10} = OFF, 1_{sw6} = 1_{sw8} = 1_{sw9} = ON$	✓	✓	✓
$1_{sw6} = 1_{sw8} = OFF, 1_{sw9} = 1_{sw10} = ON$	✗	✓	✓
$1_{sw6} = 1_{sw9} = OFF, 1_{sw8} = 1_{sw10} = ON$	✗	✓	✓
$1_{sw6} = 1_{sw10} = OFF, 1_{sw8} = 1_{sw9} = ON$	✗	✓	✓
$1_{sw8} = 1_{sw9} = OFF, 1_{sw6} = 1_{sw10} = ON$	✓	✓	✓
$1_{sw8} = 1_{sw10} = OFF, 1_{sw6} = 1_{sw9} = ON$	✓	✓	✓
$1_{sw9} = 1_{sw10} = OFF, 1_{sw6} = 1_{sw8} = ON$	✓	✓	✓
$1_{sw6} = 1_{sw8} = 1_{sw9} = OFF, 1_{sw10} = ON$	✗	✓	✓
$1_{sw6} = 1_{sw8} = 1_{sw10} = OFF, 1_{sw9} = ON$	✗	✓	✓
$1_{sw6} = 1_{sw9} = 1_{sw10} = OFF, 1_{sw8} = ON$	✗	✓	✓
$1_{sw8} = 1_{sw9} = 1_{sw10} = OFF, 1_{sw6} = ON$	✓	✓	✓
$1_{sw6} = 1_{sw8} = 1_{sw9} = 1_{sw10} = OFF$	✗	✓	✓

En el SHBG-PC-4, los modos de funcionamiento sin ACV se deben a la configuración a OFF de  $1_{sw6}$ . Esta unión tiene en causalidad integral una asignación causal forzada por  $Se_2$  y  $1_7$ . Por ello, el cambio de modo a OFF da lugar a inconsistencias que impiden la existencia de ACV. EN los modos de causalidad derivada y mixta, la unión  $1_7$  deja de tener causalidad forzada, por lo que se da la posibilidad de reconfigurar  $1_{sw6}$  a OFF.

SHBG-PC-5 ROS			
Modo	C.Integral	C.Derivada	C.Mixta
$1_{sw1} = 1_{sw2} = 1_{sw3} = ON$	✓	✓	✓
$1_{sw1} = OFF, 1_{sw2} = 1_{sw3} = ON$	✗	✗	✗
$1_{sw1} = 1_{sw3} = ON, 1_{sw2} = OFF$	✗	✗	✗
$1_{sw1} = 1_{sw2} = ON, 1_{sw3} = OFF$	✓	✗	✓
$1_{sw1} = 1_{sw2} = OFF, 1_{sw3} = ON$	✗	✗	✗
$1_{sw1} = 1_{sw3} = OFF, 1_{sw2} = ON$	✗	✗	✗
$1_{sw1} = 1_{sw3} = OFF, 1_{sw1} = ON$	✗	✗	✗
$1_{sw2} = 1_{sw2} = 1_{sw3} = OFF$	✗	✗	✗

En el SHBG-PC-5 las uniones  $1_{sw1}$  y  $1_{sw2}$  tienen causalidades forzadas que impiden su configuración a OFF (como ocurría en el caso anterior). En cuanto a  $1_{sw3}$ , carece de ACV cuando el bond que conecta la unión a  $0_1$  es el bond determinante de la unión  $0$ , y se configura a modo OFF (en otros casos, la resistencia adyacente absorbe la reconfiguración causal de cambio de modo).

### 1.5.5. Resultados de Algoritmo HBG-PCs Mejorado

Las figuras 5.33 a 5.37 muestran los resultados de aplicar el algoritmo de HBG-PCs mejorado sobre el HBG del sistema ROS.

En este caso, la mejora del HPC nos ha permitido reducir la complejidad de HBG-PC3. No obstante, nuestros resultados siguen siendo más complejos que los obtenidos en



[Moya13]. Si observamos el HPC-2, podemos comprobar como la solución de [Moya13] ignora la unión  $1_{sw8}$  y su resistencia adyacente, mientras que nuestro algoritmo incluye dichos componentes en la solución. Esta diferencia de resultados se debe a que nuestro algoritmo no dispone de la información causal necesaria para determinar que la búsqueda por la rama de  $1_{sw8}$  es innecesaria.

En comparación a los resultados con el algoritmo sin mejora, podemos ver que hemos conseguido reducir considerablemente la complejidad del HPC-4. No obstante, en el resto de HPCs la mejora es inexistente porque no se da la situación de que haya uniones del mismo tipo adyacentes con sensores/fuentes conectados.

### 1.5.6. Resumen de Resultados

HBG-PCs de ROS		
HPC	Componentes	Nodo Discrepancia
<i>SHBG - PC-1</i>	$Se_1, 1_{sw5}, R_3, R_4, I_1, Df_1, TF_4, 0_3$ $0_4, De_2$	$Df_1$
<i>SHBG - PC-2</i>	$Df_1, 1_4, TF_4, 0_3, 0_4, R_5, C_3, 0_5$ $1_5, R_6, 0_6, De_3, R_9, 1_{sw9}, 1_6, 1_{sw10}$ $R_{10}, 0_7, 1_{sw8}, R_8, 0_9, 0_8, De_4$	$De_2$
<i>SHBG-PC-3</i>	$De_2, 0_4, 0_5, 1_5, R_6, 0_6, R_9, 0_7$ $1_{sw8}, R_8, 0_9, 0_8, De_4$	$De_3$
<i>SHBG - PC-4</i>	$De_2, 0_4, 0_5, 1_5, R_6, 0_6, De_3, R_9$ $1_{sw9}, 1_6, 1_{sw10}, R_{10}, 0_7, 1_{sw8}, R_8, 0_9$ $0_8, GY_1, 1_7, R_{11}, I_2, 1_{sw6}, Se_2$	$De_4$
<i>SHBG - PC-5</i>	$Sf_1, Sf_2, 1_1, 1_2, TF_1, TF_2, 1_{sw1}, 1_{sw2}$ $0_1, C_1, 1_{sw3}, R_1$	$De_1$

En este HPC la simplificación del mismo nos ha dado como resultado un HBG con menos uniones switching, lo que permite analizar un menor número de modos de funcionamiento.

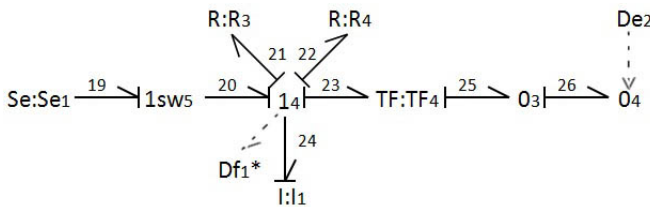


Figura 1.33: SHBG-PC-1 calculado asociado a modelo HBG de ROS

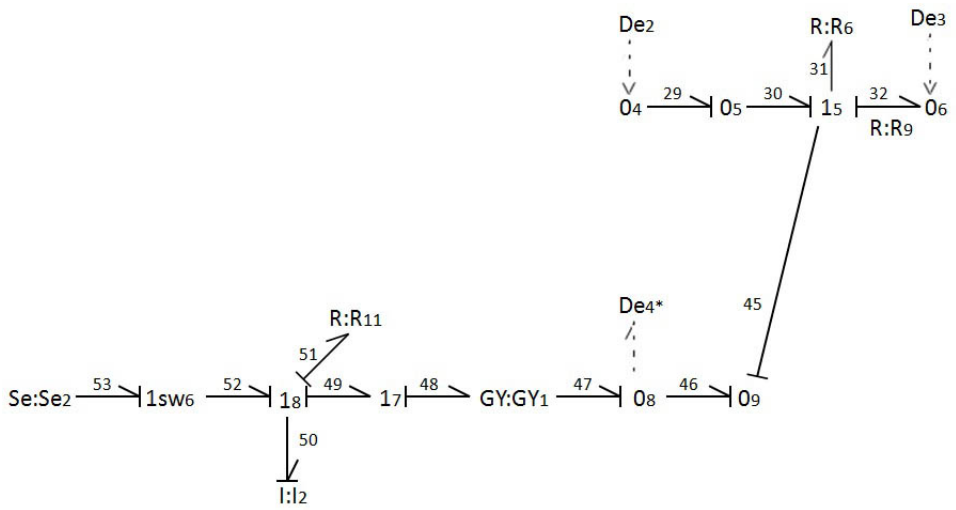


Figura 1.34: SHBG-PC-3 calculado asociado a modelo HBG de ROS

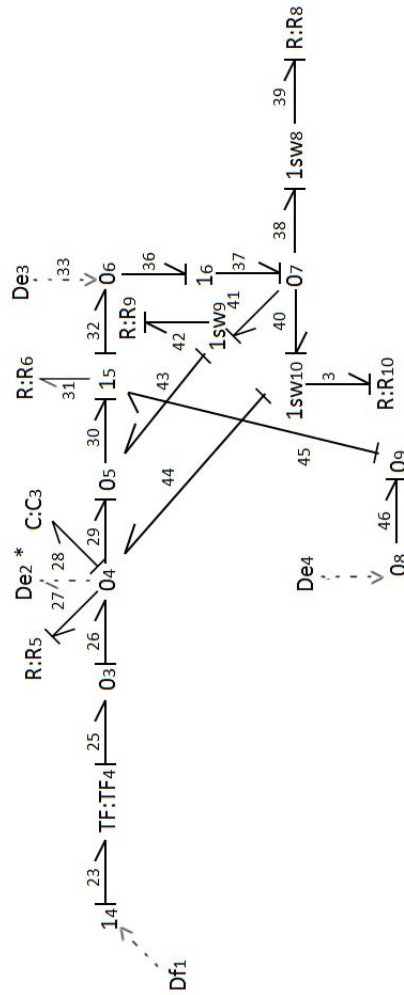


Figura 1.35: SHBG-PC-2 calculado asociado a modelo HBG de ROS

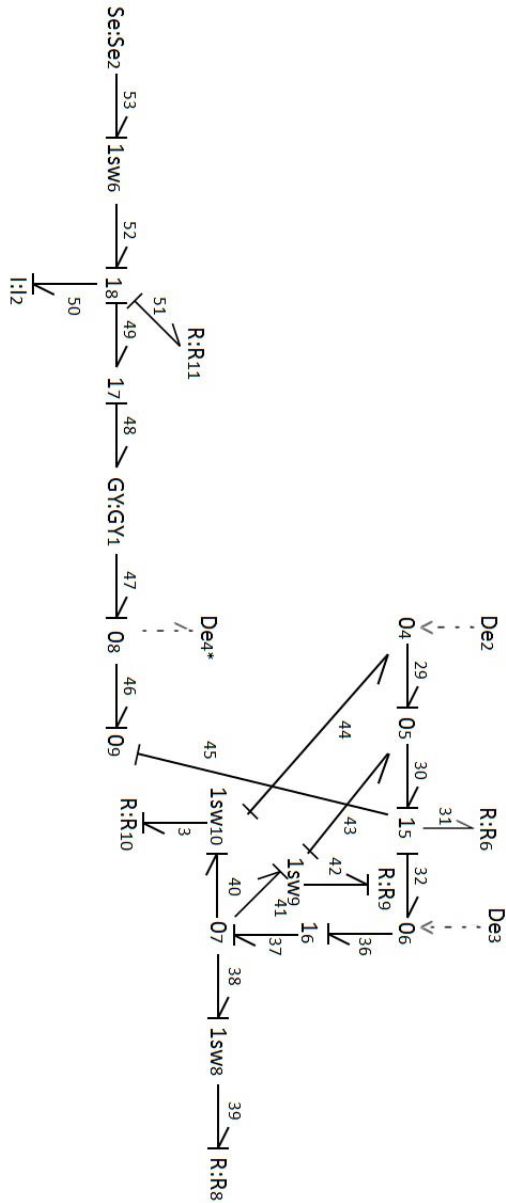


Figura 1.36: SHBG-PC-4 calculado asociado a modelo HBG de ROS

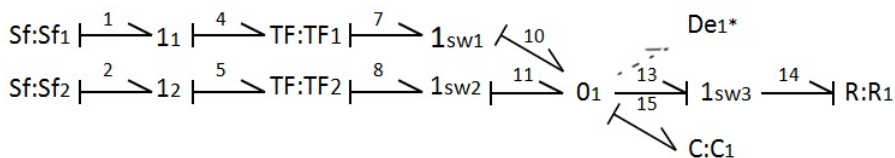


Figura 1.37: SHBG-PC-5 calculado asociado a modelo HBG de ROS

SHBG-PC-1 ROS			
Modo	C.Integral	C.Derivada	C.Mixta
No SJ in Model	✓	✓	✓

SHBG-PC-2 ROS			
Modo	C.Integral	C.Derivada	C.Mixta
$1_{sw8} = 1_{sw4} = 1_{sw10} = ON$	✓	✓	✓
$1_{sw8} = OFF, 1_{sw9} = 1_{sw10} = ON$	✓	✓	✓
$1_{sw8} = 1_{sw10} = ON, 1_{sw9} = OFF$	✓	✓	✓
$1_{sw8} = 1_{sw9} = ON, 1_{sw10} = OFF$	✓	✓	✓
$1_{sw8} = 1_{sw9} = OFF, 1_{sw10} = ON$	✓	✓	✓
$1_{sw8} = 1_{sw10} = OFF, 1_{sw9} = ON$	✓	✓	✓
$1_{sw9} = 1_{sw10} = OFF, 1_{sw8} = ON$	✓	✓	✓
$1_{sw8} = 1_{sw9} = 1_{sw10} = OFF$	✓	✓	✓

SHPC-3 ROS			
Modo	C.Integral	C.Derivada	C.Mixta
$1_{sw6} = ON$	✓	✓	✓
$1_{sw6} = OFF$	✗	✓	✓

SHBG-PC-4 ROS			
Modo	C.Integral	C.Derivada	C.Mixta
$1_{sw6} = 1_{sw8} = 1_{sw9} = 1_{sw10} = ON$	✓	✓	✓
$1_{sw6} = OFF, 1_{sw8} = 1_{sw9} = 1_{sw10} = ON$	✗	✓	✓
$1_{sw8} = OFF, 1_{sw6} = 1_{sw9} = 1_{sw10} = ON$	✓	✓	✓
$1_{sw9} = OFF, 1_{sw6} = 1_{sw8} = 1_{sw10} = ON$	✓	✓	✓
$1_{sw10} = OFF, 1_{sw6} = 1_{sw8} = 1_{sw9} = ON$	✓	✓	✓
$1_{sw7} = 1_{sw8} = OFF, 1_{sw9} = 1_{sw10} = ON$	✓	✓	✓
$1_{sw7} = 1_{sw9} = OFF, 1_{sw8} = 1_{sw10} = ON$	✓	✓	✓
$1_{sw7} = 1_{sw10} = OFF, 1_{sw8} = 1_{sw9} = ON$	✓	✓	✓
$1_{sw8} = 1_{sw9} = OFF, 1_{sw7} = 1_{sw10} = ON$	✓	✓	✓
$1_{sw8} = 1_{sw10} = OFF, 1_{sw8} = 1_{sw9} = ON$	✓	✓	✓
$1_{sw9} = 1_{sw10} = OFF, 1_{sw7} = 1_{sw8} = ON$	✓	✓	✓
$1_{sw7} = 1_{sw8} = 1_{sw9} = OFF, 1_{sw10} = ON$	✓	✓	✓
$1_{sw7} = 1_{sw8} = 1_{sw10} = OFF, 1_{sw9} = ON$	✓	✓	✓
$1_{sw7} = 1_{sw9} = 1_{sw10} = OFF, 1_{sw8} = ON$	✓	✓	✓
$1_{sw8} = 1_{sw9} = 1_{sw10} = OFF, 1_{sw7} = ON$	✓	✓	✓
$1_{sw7} = 1_{sw8} = 1_{sw9} = 1_{sw10} = OFF$	✓	✓	✓





SHBG-PC-5 ROS			
Modo	C.Integral	C.Derivada	C.Mixta
$1_{sw1} = 1_{sw2} = 1_{sw3} = ON$	✓	✓	✓
$1_{sw1} = OFF, 1_{sw2} = 1_{sw3} = ON$	✗	✗	✗
$1_{sw1} = 1_{sw3} = ON, 1_{sw2} = OFF$	✗	✗	✗
$1_{sw1} = 1_{sw2} = ON, 1_{sw3} = OFF$	✓	✗	✓
$1_{sw1} = 1_{sw2} = OFF, 1_{sw3} = ON$	✗	✗	✗
$1_{sw1} = 1_{sw3} = OFF, 1_{sw2} = ON$	✗	✗	✗
$1_{sw1} = 1_{sw3} = OFF, 1_{sw1} = ON$	✗	✗	✗
$1_{sw2} = 1_{sw2} = 1_{sw3} = OFF$	✗	✗	✗

## 1.6. Discusión de Resultados

A lo largo de los diferentes casos de estudio contemplados hemos aplicado los algoritmos HSCAP y de cálculo de HBG-PCs con resultados favorables en todos los escenarios. Todos los resultados generados se corresponden con las observaciones formuladas acerca de los HBGs de partida, así como con los análisis realizados en los diferentes documentos bibliográficos de los que hemos extraído los ejemplos.

El caso de estudio más interesante en lo referente a este algoritmo ha sido el ROS. En nuestro estudio hemos podido detectar que los HBG-PCs calculados por nuestro algoritmo no se corresponden con los calculados en [Moya13], cuyos modelos son más sencillos (contienen menos componentes). Ante esta diferencia de resultados hemos formulado un nuevo algoritmo de cálculo más eficiente, el cual nos ha permitido obtener unos resultados más próximos a los de [Moya13].

En el caso del algoritmo de [Moya13], el emplear TCG para el cálculo de los HPCs supone que el algoritmo opera con un HBG con información causal. Esta información permite hacer una búsqueda más eficiente, ya que la causalidad indica el camino a seguir para el cálculo de las variables flujo/esfuerzo desde un determinado bond. En nuestra propuesta prescindimos de la información causal, así como otras restricciones de la propuesta de [Moya13] como la existencia de ACV en modo todo a ON.

Nuestra mejora del algoritmo opta por realizar un procedimiento, previa búsqueda de variable flujo/esfuerzo, donde se hace un etiquetado de elementos, partiendo de componentes fuente/sensor, los cuales tienen un flujo/esfuerzo forzado por dicho elemento de partida. Gracias a esta mejora se acorta la búsqueda de variable, terminando la búsqueda una vez se alcanza un nodo etiquetado por dicha variable. Observando los resultados, conseguimos obtener HBG-PCs mucho más sencillos gracias a que las búsquedas son más cortas que sin la mejora. A pesar de ello, el no considerar la información causal del modelo nos sigue impidiendo alcanzar unos resultados tan óptimos como los de la propuesta de [Moya13].

En cuanto a los resultados de HSCAP, no podemos hacer ninguna comparación de rendimiento entre propuestas considerando los casos de estudio seleccionados. En todos los casos hemos trabajado con causalidades fijas y arbitrarias, o bien causalidades *forzadas* *SJ*, pero que solo estaban asociadas a un bond de la unión-switching, lo que impide poder sacar provecho de las ventajas de nuestra mejora. Debido a que la complejidad de asignar causalidades fijas y forzadas es de orden lineal (cota inferior de rendimiento del algoritmo), es imposible mejorar los resultados de rendimiento en cuanto asignación



causal de estos HBG considerados. Por lo tanto, la comparativa de propuestas de HSCAP en estos ejemplos es que ofrecen un rendimiento idéntico, aunque en el caso de nuestra propuesta el algoritmo es capaz de responder sin las restricciones de [Roychoudhury10] (existencia de ACV en los modelos y causalidad integral).

En el siguiente capítulo contrastaremos los resultados obtenidos con los conceptos teóricos abordados en secciones anteriores, para poder así formular de los resultados finales de nuestro estudio.