

## SISTEMA DE DIAGNÓSTICO UTILIZANDO TÉCNICAS DE BOND GRAPH EN SISTEMAS TERMO-HIDRÁULICOS

Isaias J. Mc Hardy<sup>a</sup>, Celso A. Flury<sup>a,b</sup> y Verónica Venturini<sup>b</sup>

<sup>a</sup>*Instituto Balseiro, Universidad Nacional de Cuyo, Av. E Bustillo Km 9.5, San Carlos de Bariloche, Argentina. isaias.j.m@gmail.com, fluryc@cab.cnea.gov.ar, <http://www.ib.edu.ar/>*

<sup>b</sup>*Grupo Control de Procesos Centro Atómico Bariloche, Comisión Nacional de energía atómica Av. E Bustillo Km 9.5, San carlos de Bariloche, Argentina. veronica.venturini@cab.cnea.gov.ar, <http://www.cab.cnea.gov.ar/>*

### Palabras Clave:

Bond Graph, diagnóstico de fallas, Modelica, Jmodelica, termo-hidráulico.

### Resumen.

Los sistemas termo-hidráulicos son de gran importancia en numerosas aplicaciones técnicas e industriales cuya fallas tienen graves consecuencias y riesgos tanto en humanos como materiales. Una capacidad valiosa es la de poder utilizar la información disponible en dichos equipos, provistas por los sistemas digitales usados en la medición de variables de procesos y control, para poder inferir prematuramente la existencia de una falla. Como un primer paso en el desarrollo de dispositivos que permitan detectar fallas en sistemas de esta naturaleza, se desarrolla un prototipo de un sistema de diagnóstico a partir del modelado mediante Bond Graph de una planta termo-hidráulica simple (circuito primario, secundario e intercambiador de calor). Para la evaluación y estudio de las capacidades del sistema de diagnóstico se realizan simulaciones numéricas de su funcionamiento en presencia de fallas. Para tales fines se realiza una implementación computacional mediante el uso del lenguaje Modelica, y las bibliotecas provistas por Jmodelica para Python. Como resultado se identifican las propiedades de detección y aislamiento del sistema de diagnóstico, en donde se muestra la capacidad de detectar todas las fallas propuestas y la posibilidad de aislarlas parcialmente.

## 1. INTRODUCCIÓN

En diversas industrias, como en particular en la industria nuclear, son utilizados ampliamente los sistemas termo-hidráulicos. Tanto los fluidos empleados, como la energía transportada por dichos sistemas son de gran valor económico y técnico, además de tener gran implicancia en otros procesos relacionados directa e indirectamente. Las fallas en el funcionamiento de estos sistemas llevan a pérdidas económicas y pueden conllevar además altos riesgos a la salud y a la vida de los seres humanos. Estos problemas pueden ser evitados mediante el uso de dispositivos que permitan, en forma temprana, detectar e identificar las fallas que ocurran en los equipos. El objetivo del presente trabajo es el de desarrollar un prototipo de dispositivo de diagnóstico para un sistema termo-hidráulico simple y genérico, que permita posteriores ampliaciones y futuras aplicaciones a equipos reales. Se busca también evaluar el desempeño y las propiedades de dicho dispositivo de diagnóstico.

Para el desarrollo del trabajo se utiliza el tipo de técnica de diagnóstico basados en modelos (Ding, 2013). Dicha técnica permite obtener un dispositivo de diagnóstico de fallas utilizando modelos dinámicos y mediciones de la planta<sup>1</sup> en cuestión. En particular, para éste trabajo se desarrolla el modelo dinámico del sistema a través de Bond Graphs (BG) (Borutzky, 2011), de cuyo modelado se deriva el sistema de diagnóstico haciendo provecho de la inversión de la propiedad de causalidad de dicha técnica de modelado. El sistema de diagnóstico buscado se integra con la planta en una configuración como la que se muestra en la figura 1. Como se expondrá más adelante la señal  $r$  (residuo) será la información que el sistema provea para identificar las posibles fallas. Si bien el trabajo pretende orientar la aplicación del sistema a un sistema práctico real, los resultados del sistema de diagnóstico se obtuvieron de experimentar con un sistema termo-hidráulico simulado. Ejemplos de la aplicación de la inversión de la causalidad de los Bond Graph para el diagnóstico, aplicado a un sistema mecánico (un sistema de amortiguación de un vehículo) se describen en las publicaciones: Silva L. y Delarmelina D. (2007) y Nacusse M. A. y Pierucci G. J. (2007). Ejemplos de aplicaciones a sistemas termo-hidráulicos se encuentran por ejemplo en Ould Bouamama et al. (2006) y Medjaher et al. (2006). El presente trabajo se distingue de los anteriores en el enfoque utilizado para el modelado de este tipo de sistemas. La solución propuesta provee un marco que puede ser aplicada en principio, para numerosas configuraciones, tanto por el modelado como por su implementación computacional utilizada.

En la siguiente sección se exponen las particularidades de la representación mediante BG que permiten su uso en el contexto de la detección de fallas y la metodología empleada en el trabajo. En la sección 3 se expone el modelado de la planta y una breve discusión sobre el uso de esta metodología en el dominio térmico e hidráulico. En la sección 4 se muestra el modelo de diagnóstico obtenido y se explica sus entradas y salidas. En la sección 5 se exponen los análisis realizados y la implementación computacional. Por último se exponen las conclusiones obtenidas.

## 2. BOND GRAPHS EN EL CONTEXTO DEL DIAGNÓSTICO DE FALLAS

Los BG (Bond Graph, Grafos de Enlaces en español) es una técnica de modelado gráfico de los sistemas dinámicos. En los BG se describe a los sistemas dinámicos a partir de la asunción de que es posible dividir a un sistema en partes cuyas propiedades son agrupadas y de que es posible entonces representar al sistema completo mediante la descripción de las partes y su interacción (Breedveld (1985)). La representación mediante BG describe a los sistemas dinámicos a partir de los flujos de potencia representados por elementos gráficos básicos: los Bond (o

<sup>1</sup>Como “planta” se hace referencia al equipo, lugar o sistema físico en el cual se quieren detectar fallas.

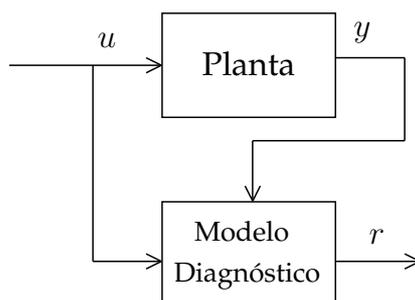


Figura 1: Configuración de la planta con su sistema de diagnóstico. Las señales necesarias son: entradas ( $u$ ), salidas ( $y$ ) y residuos ( $r$ ) estos últimos contienen la información de las fallas.

arpones en español), mientras que, las partes del sistema total son caracterizadas por “puertos” en donde se realizan distintas operaciones sobre dicha potencia.

Este enfoque general del modelado permite representar distintos dominios físicos bajo el mismo formalismo. Para este fin se describe al flujo de potencia como el producto algebraico de dos variables, denominadas variable de esfuerzo generalizado ( $e$ ) y variable de flujo generalizado ( $f$ ). Estas variables serán entradas o salidas de cada puerto, según corresponda. Las operaciones realizadas en estos últimos (los puertos), será representada en su ecuación constitutiva. La relación entre las variables generalizadas y las ecuaciones constitutivas se pueden resumir en el tetraedro de Paynter o tetraedro de los estados (ver por ejemplo [Tiller \(2012\)](#)).

Los BG permiten además representar el orden en el cual estas operaciones son realizadas, en su representación de la causalidad. Esta característica es fundamental para la utilización de los BG en la detección de fallas. Mediante la inversión de la causalidad una medición (o salida) por ejemplo, puede convertirse en una fuente (o entrada). Esta inversión se utiliza para, en última instancia, obtener señales en el sistema de diagnóstico que sirvan para la identificación de comportamientos defectuosos de la planta (señales que son llamadas residuos  $r$ ).

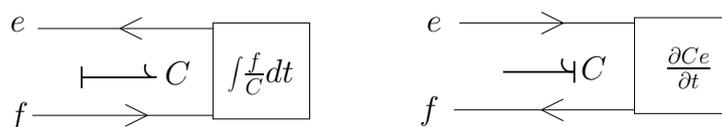


Figura 2: Causalidad integral (izquierda) y derivativa (derecha) para un elemento capacitivo una representación en diagrama de bloques.

Otra característica importante de la representación mediante BG, es que si bien existe una representación matemática subyacente al modelo, este último es representado gráficamente. Para tales fines se asigna tanto al flujo de potencia como los puertos con una representación gráfica o símbolo. En la figura 2 se muestra como el flujo de potencia hacia un elemento capacitivo (puerto de tipo 1) es representado simbólicamente por un arpón o enlace (bond). La causalidad es representada por un segmento de línea en uno de los dos extremos y perpendicular al eje del arpón. En la figura se agrega una representación por diagramas de bloque mostrando la diferencias en el cálculo que implican los dos tipos de causalidad. Los puertos son representados utilizando letras y números. En la tabla 2 se pueden observar los puertos organizados partir del número de enlaces que pueden tener, su símbolo y su ecuación constitutiva.

Un tipo de puerto importante para el diagnóstico de fallas es el de los elementos multi-puertos tipo 1 y 0. Estos puertos representan condiciones de interconexión entre las partes; por ejemplo en el dominio eléctrico representa las leyes de Kirchhoff de corriente y voltaje. Mientras

1-puerto		2-puerto		n-puerto	
símbolo	ecuación	símbolo	ecuación	símbolo	ecuación
$R$	$e = Rf$	$TF$	$f_1 = kf_2$ $e_1 = \frac{e_2}{k}$	1	$f_1 = f_2 = \dots = f_n$ $e_1 + e_2 + \dots + e_n = 0$
$I$	$e = I \frac{\partial f}{\partial t}$				
$C$	$f = C \frac{\partial e}{\partial t}$	$GY$	$f_1 = ke_2$ $e_1 = \frac{f_2}{k}$	0	$e_1 = e_2 = \dots = e_n$ $f_1 + f_2 + \dots + f_n = 0$

Tabla 1: Símbolos utilizado en la representación de puertos y sus ecuaciones.

que la inversión de causalidad se utiliza para identificar entradas en el sistema de diagnóstico, los multi-puertos son utilizados como “condición de buen funcionamiento”. Por ejemplo, en una unión tipo 1 la ecuación  $f_1=f_2\dots=f$  es igualada a una medición, mientras que la segunda ecuación asociada a esta unión ( $\sum_{i=1}^n e_i = 0$ ) es usada como una comparación, o como relación analítica redundante (ARR) (Samantaray y Bouamama, 2008). El resultado de esta sumatoria es utilizada en el sistema de diagnóstico como señal a la que hemos llamado previamente residuo. Si el valor numérico del residuo es igual a cero, tanto modelo de la planta como sistema de diagnóstico coinciden, es decir el sistema se encuentra funcionando normalmente. Si existe una desviación de cero, se dice que el sistema ha fallado.

Mediante la inversión de la causalidad y las relaciones matemáticas que proveen los multi-puertos se puede generar sistemas de diagnósticos de forma metódica (Borutzky, 2011). El procedimiento utilizado se ilustra en la figura 3. Los pasos necesarios para la obtención del sistema de diagnóstico se describen a continuación, mientras que su implementación en el presente trabajo se expone en los siguientes capítulos:

1. Modelado de la planta.
2. Inversión de causalidad.
  - a) Identificación de mediciones y variable asociada.
  - b) Inversión de causalidad en los puertos asociados a la medición en la correspondiente unión.
  - c) Obtención de una nueva medición (virtual) en la variable asociada con el balance realizado en la unión.

Notar que, aunque distinto en su causalidad (y en algunas entradas), el sistema de diagnóstico de la planta es también un modelo, estrechamente relacionado al modelo de la planta. Es por esto que las frases “sistema de diagnóstico” y “modelo de diagnóstico” serán utilizados indistintamente para hacer referencia al dispositivo cuyo objetivo es identificar fallas a partir de mediciones de una planta en particular. El procedimiento descrito anteriormente es ilustrado en la figura 3.

Es importante mencionar que, para la realización del presente trabajo se utiliza desarrollos teóricos complementarios a los BG. Estos son: los Pseudo Bond Graphs (P-BG) y los Multi Bond Graphs (MBG). Los primeros se distinguen de los BG en que los productos de las variables de flujo y esfuerzo generalizados no tienen necesariamente unidades de potencia (aplicaciones en sistemas termo-hidráulicos se puede ver por ejemplo en Jean y Ould (2000)). Los MBG por otro lado, pueden interpretarse como una representación vectorial de los BG. En los

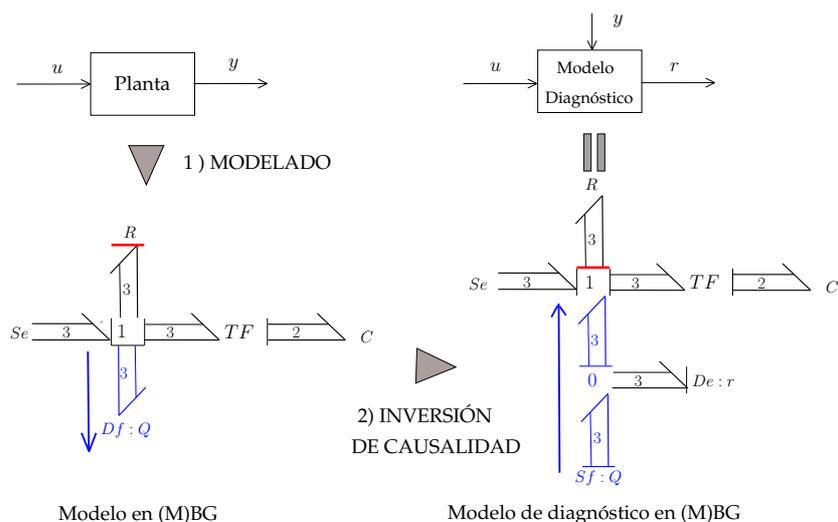


Figura 3: Ilustración del procedimiento para la obtención del sistema de diagnóstico. En la representación se utilizan los Multi Bond Graphs (MBG).

MBG un enlace representa numerosos enlaces de BG, mientras que un puerto en MBG (o multi puerto), representa numerosos puertos simples de BG. En este sentido se puede decir que los MBG son un formalismo mas general que contiene a los BG (ver por ejemplo [Breedveld \(1985\)](#)).

### 3. MODELO DE LA PLANTA

Para poder obtener una solución general al problema planteado en el trabajo y mantener acotada la complejidad de este último, se optó por considerar a la planta como un sistema de intercambio de calor entre dos circuitos simples, como se muestra en la figura 4. La planta a modelar consiste en dos circuitos termo-hidráulicos cerrados, vinculados a través de un intercambiador de calor, en donde circula agua. Cada uno de estos circuitos se considera formado por cuatro componentes: un tanque, dos tubos y un lado dentro del intercambiador de calor. El lado del intercambiador en el que el circuito se encuentra se utiliza para distinguir a cada circuito como circuito lado tubo y circuito lado carcasa. Los tanques se consideran aislados térmicamente y se considera además que en el lado tubo hay una generación de potencia. Cada circuito cuenta con un tubo que conduce el agua desde el tanque hasta el intercambiador, y un segundo tubo que conduce el líquido desde el intercambiador hasta el tanque nuevamente. Se considera que dichos tubos tienen pérdidas térmicas al exterior. En cuanto al intercambiador de calor, este consta de dos tubos concéntricos donde circula el flujo a contracorriente. El fluido en ambos circuitos se considera impulsado por una bomba que suministra una determinada diferencia de presión. (ver figura 4)

#### 3.1. Dificultades en el modelado y solución propuesta

Para realizar un modelado mediante BG se debe asociar a cada uno de los componentes o partes del sistema con un puerto, mediante la interpretación de como intercambian energía entre ellos (y con el exterior del sistema). Un tanque donde se almacena masa puede asociarse por ejemplo, con un elemento capacitivo. En situaciones donde existe transferencia de energía asociado al transporte de masa, esta identificación no puede realizarse de forma directa utilizando los puertos básicos que provee la metodología (tabla 2). Esto se debe en parte a que en las

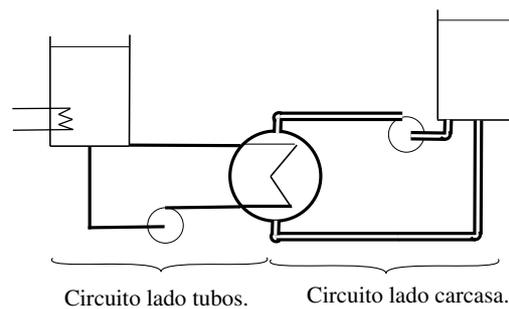


Figura 4: Esquema de la planta considerada.

aplicaciones tradicionales del modelado en BG, el sistema de referencia es solidario al objeto en el cual ocurre el flujo de potencia, mientras que la existencia de un flujo de masa hace que este enfoque sea difícil de implementar [Borutzky \(2010\)](#). Para realizar una representación de la planta propuesta, existen además, complicaciones por el uso de las variables conjugadas del dominio térmico. Dichas variables (temperatura y flujo de entropía), requieren el uso de elementos resistivos y capacitivos no-lineales ([Cellier y Greifeneder \(2013\)](#)), que incrementan la complejidad del modelo. Estas variables además son inconvenientes para representar fuentes de energía y mediciones.

Estos problemas son comunes en la representación de sistemas termo-hidráulicos y han sido estudiados por distintos autores. Las soluciones reportados pueden organizarse tentativamente en dos grupos. Por un lado están aquellas soluciones que incorporan elementos ad-hoc al modelado, por ejemplo en [Djeziri et al. \(2009\)](#); [Ould Bouamama et al. \(2006\)](#); [Medjaher et al. \(2006\)](#). Por otro lado se han propuesto la utilización de puertos capacitivos generalizados como en [Greifeneder y Cellier \(2001a\)](#) y [Cellier y Greifeneder \(2003\)](#).

En el trabajo se propone solucionar las dificultades del modelado a partir de las ecuaciones diferenciales de los fenómenos físicos involucrados, de forma análoga a los trabajos de [Gandolfo E.F. \(2006\)](#). Para esto, se realiza la representación en BG a partir de un balance de energía en un volumen de control, que se obtiene luego de integrar las ecuaciones de conservación de energía y momento unidimensional en un segmento de tubería. Cada término del balance, obtenido luego de la integración, estará asociado a puertos distintos. Por ejemplo, la ecuación de balance de momento, asociado a un único caudal para cada volumen de control, será representado por una unión tipo 1 en donde se representa que la suma de todas las contribuciones (representada por distintos enlaces) es igual a cero. En el dominio térmico además, se utilizan P-BG ([Thoma \(1976\)](#)) en donde se emplean como variables conjugadas la temperatura y el flujo de entalpía (como variables de esfuerzo y flujo respectivamente). Los P-BG si bien tienen variables conjugadas cuyo producto no tiene unidades de potencia, ofrecen una descripción más usual y elementos capacitivos lineales. Con este enfoque se espera una solución de compromiso entre la utilización de una descripción del modelo simple y una descripción general (utilizando los elementos propios del formalismo), que permita por ejemplo la integración con otros modelos en BG (o MBG). Esta solución cuenta con la ventaja adicional, de poder encontrar relaciones entre las descripción en BG con métodos numéricos, cuya aplicación a la detección de fallas no ha sido reportada en la literatura revisada por el autor.

### 3.2. Modelado

Para el modelado se asumen las siguientes hipótesis:

1. Fluido incompresible.

2. No hay cambio de estado de agregación (ni a sólido, ni a gaseoso).
3. Difusión en dirección de circulación del fluido despreciable, tanto en el líquido como en la pared.
4. No hay variación de la densidad con la temperatura, por lo tanto la dinámica del fluido es independiente de la temperatura.
5. Coeficientes de conducción constantes.
6. Calor específico constante.

Luego de la integración en un segmento de longitud  $L$ , se obtienen las siguientes ecuaciones: de balance de momento, ecuación (1) (dominio hidráulico) y de balance de energía térmica, ecuación (3) (dominio térmico).

$$I \frac{dQ}{dt} = \Delta P + RQ^2 \quad (1)$$

$$C_t \frac{dT}{dt} = c_p \dot{m} T_e - c_p \dot{m} T - G_2(T - T_p) \quad (2)$$

En la ecuación (2) debemos incluir además la dinámica de la temperatura en la pared del tubo como:

$$C_p \frac{dT_p}{dt} = T_p(G_1 - G_2) - G_1 T_a + G_2 T \quad (3)$$

En el dominio hidráulico, la variable dinámica de flujo es el caudal  $Q$  mientras que la variable de esfuerzo es la presión  $P$ .  $\Delta P$  representa el gradiente de presión entre los extremos del volumen de control (por ejemplo la presión impuesta por la bomba) y  $RQ^2$  las pérdidas viscosas de presión. En el dominio térmico, la variable de esfuerzo es la temperatura  $T$  mientras que la variable de flujo es el flujo de entalpía  $\dot{h}$ .

Los parámetros de las ecuaciones (1) y (2) pueden asociarse a las propiedades del fluido y a la geometría del tubo de la siguiente forma:  $C_t = c_t m$  e  $I = L/A$ ; donde  $c_t$  es el calor específico del líquido,  $m$  es la masa del volumen de control,  $\dot{m}$  es el caudal másico por unidad de tiempo,  $T_e$  es la temperatura a la entrada del volumen,  $T_p$  es la temperatura de la pared,  $L$  es la longitud del nodo o celda y  $A$  es el área de la sección transversal de la celda. En la ecuación (3),  $G_1$  y  $G_2$  son las conductancias térmicas de la pared con el ambiente y el fluido respectivamente, mientras que  $T_a$  es la temperatura ambiente. El elemento almacenador se puede escribir como,  $C_p = c_{pp} m_p$ , donde  $m_p$  es la masa de un segmento de pared y  $c_{pp}$  es el calor específico del material de la pared.

En la figura 5 se muestra la representación de las ecuaciones (1), (2) y (3) mediante BG. De esta forma se representa un nodo (o celda) en donde existe movimiento de fluido e intercambio de energía producto de la advección del fluido y de la conducción en la pared. Ya que cada circuito contará con varios nodos, cada uno de estos es identificado por un superíndice. Por ejemplo la conductancia térmica de la pared del nodo 4 será  $G_1^4$ . Para representar a la planta se debe realizar una interconexión de  $N_m$  nodos. Mediante dicha interconexión quedan representado además cada equipo (tanques, tubos e intercambiador).

Para representar los tubos, se unen nodos consecutivos mediante un balance másico. Debido a la hipótesis de incompresibilidad, no es posible realizar una conexión utilizando la descripción

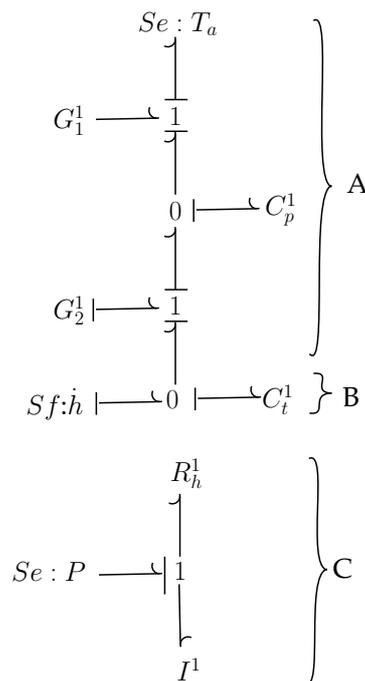


Figura 5: Representación en BG de una celda o nodo. Las letras A, B y C relacionan cada parte de la representación gráfica con las ecuaciones (3), (2) y (1) respectivamente.

de la ecuación (2). Por esto se introduce la ecuación (4):

$$\frac{dP'}{dt} = C(Q_e - Q) + R \frac{d(Q_e - Q)}{dt} \quad (4)$$

Esta última expresión tiene dos nuevos parámetros  $C$  y  $R$  que pueden ser interpretados como las propiedades mecánicas del material del tubo (rigidez y disipación), mientras que  $Q_e$  representa el caudal entrante al nodo y  $P'$  la presión entre nodos. Dicha ecuación puede considerarse como la integración de la ecuación de conservación de masa en un volumen de control. En la figura 6 se muestra la representación en BG y su equivalente en MBG, de dos nodos interconectados utilizando estos nuevos elementos. En la representación mediante MBG las uniones tipo 1 del dominio térmico y las tipo 0 del dominio hidráulico son remplazadas por sus ecuaciones en las matrices  $TF_t$  y  $TF_h$  respectivamente.

Para representar el intercambiador de calor, se unen dos tubos de forma “concéntrica” (un tubo para el interior del intercambiador y otro para la carcasa). Para esto se unen los elementos  $C_t$  de cada nodo del lado carcasa con la conductancia  $G_1$  (exterior de pared) de los nodos del lado tubo. Estas interconexión se condensa en la matriz  $TF_{hx}$ . Por espacio se decidió omitir la representación particular del intercambiador en BG.

En cuanto a la representación de los tanques, se consideran a éstos como 2 volúmenes en donde se almacena fluido a cierta temperatura. Ya que la capacidad de almacenamiento de energía dependerá de la masa almacenada, no puede utilizarse una capacidad térmica lineal como la utilizada en los nodos (en donde se supone que el volumen de éste está siempre ocupado por fluido). Para incorporar este comportamiento, se utilizó un elemento multi-puerto (figura 7) en donde ingresa un enlace perteneciente al dominio hidráulico (caudal  $Q$  y presión  $P$ ) y un enlace perteneciente al dominio térmico (temperatura  $T$  y flujo de entalpía  $h$ ). Las ecuaciones

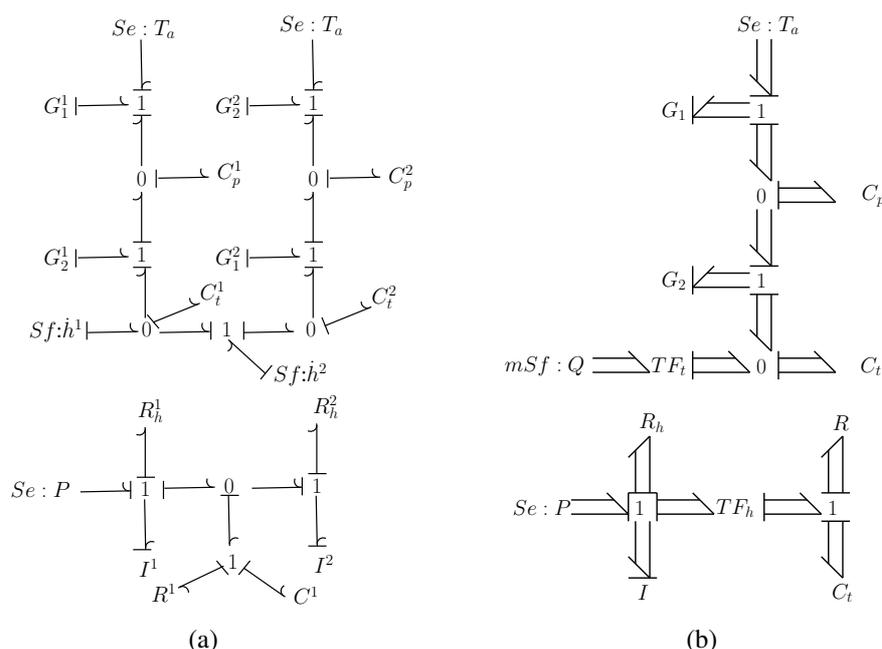


Figura 6: Representaciones de interconexión de dos nodos pertenecientes a un tubo mediante BG y MBG.

que gobiernan la relación de estas variables son la ecuaciones (5) y (6).

$$c_p \frac{\rho dVT}{dt} = c_p \dot{m} T_e - c_p \dot{m} T \tag{5}$$

$$\frac{dV}{dt} = Q_e - Q \tag{6}$$

Donde  $\rho$  es la densidad del fluido y  $dV$  la variación de su volumen. Esta solución incorpora 2 elementos no-lineales en donde los dominios térmicos e hidráulicos son interrelacionados. En este sentido cada tanque puede considerarse como un elemento  $C_t$  unido a un elemento  $C$  como se ilustra en la figura 7.

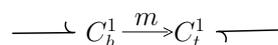


Figura 7: Elemento utilizado para representar un tanque. En la representación final son agrupados en un multi-elemento capacitivo  $C_{tk}$ .

Luego de interconectar todos los nodos se obtiene finalmente un modelo de la planta, como se ilustra en la figura 8. La cantidad total de nodos utilizados se representa como  $N_m$ .

#### 4. MODELO DE DIAGNÓSTICO

La obtención del modelo de diagnóstico consiste en invertir la causalidad en aquellos elementos que definen la variable “conservada<sup>2</sup>” en la unión en la que se encuentran. Luego de la inversión, son incorporadas fuentes que introduzcan estas cantidades (ver sección 2). Ya que cada una de estas fuentes tendrán que ser posteriormente alimentadas por una medición, el modelo de diagnóstico dependerá de las mediciones disponibles en la planta. En el trabajo se optó

<sup>2</sup>variable que es común a todos los enlaces conectados a un puerto, si el puerto es tipo 0 esta variable será de esfuerzo, si el puerto es tipo 1 será una variable de flujo.

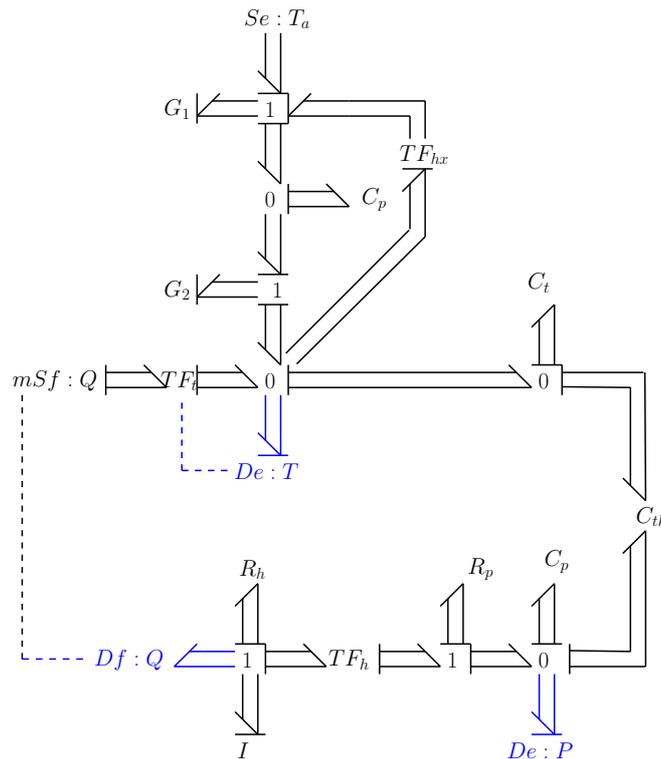


Figura 8: Representación en Bond Graph de la planta. En líneas punteadas se representan las señales utilizadas para modular los elementos  $TF_t$  y  $mSf$ .

por utilizar solo las mediciones de presión, temperatura del fluido y caudal, por considerarse mediciones típicas de dichos circuitos.

Una vez identificadas las mediciones a utilizar, se necesita invertir la causalidad de los elementos almacenadores asociados:  $I_h$  para el caudal,  $C_t$  para la temperatura y  $C$  para la presión. Luego, se debe incorporar las fuentes para imponer las mediciones en cada unión. La señal de salida del modelo de diagnóstico son los residuos, los cuales se obtienen midiendo la co-variable de cada medición introducida. Notar que para introducirlos en la representación se incorpora una unión y un elemento sensor según corresponda. En la figura 9 se muestra el modelo de diagnóstico obtenido.

En aquellos nodos donde no exista mediciones, los elementos almacenadores de energía se encontrarán con causalidad “normal” (integral). Esta característica tiene la desventaja de necesitar un valor adicional en cada uno de estos nodos, es decir se necesita el valor inicial del parámetro asociado a dichos elementos. Si bien las condiciones iniciales pueden ser difíciles de estimar, esta característica tiene la ventaja de poder disponer de un mismo sistema de diagnóstico que soporte distintos conjuntos de mediciones (ver experimentos). Esto se puede aprovechar para estudiar el sistema de forma metódica en los estudios en el capítulo siguiente y también para obtener sistemas de diagnóstico que en la práctica toleren fallas en las propias mediciones. De forma análoga al modelo de la planta, el sistema de diagnóstico contará con una cantidad total de nodos denominada  $N_d$ .

## 5. EXPERIMENTOS NUMÉRICOS

Una vez obtenido el modelo de diagnóstico, se analizan sus características. En el marco de la metodología empleada, éste análisis se realiza a partir de la respuesta que el dispositivo tiene ante la presencia de fallas. Una falla es entendida como la variación en el valor de un parámetro.

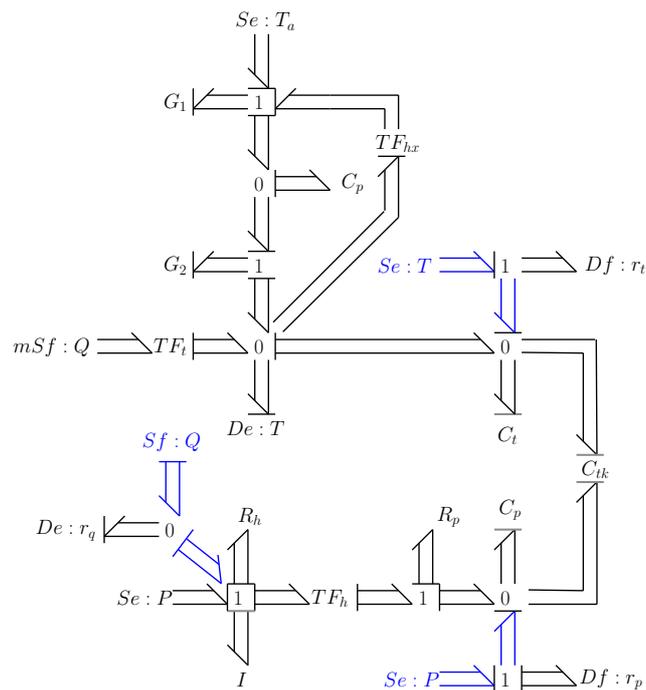


Figura 9: Representación mediante Multi-BG del sistema de diagnóstico. En azul las fuentes donde ingresan las mediciones.  $r_p$   $r_q$   $r_t$  son los residuos que serán utilizados para el diagnóstico. Las señales utilizadas para modular los elementos  $TF_t$  y  $mSf$  no se representaron para simplificar la representación.

En el problema planteado, se hace una distinción entre dos tipos de fallas: fallas producto de la variación en un parámetro físico, (por ejemplo un cambio en la resistencia hidráulica en un nodo) y fallas producto de variaciones en la estructura (parámetros en las matrices tipo  $TF$ ). Dentro de este último tipo, se encuentran por ejemplo, fallas producto de la ruptura de la tubería con la consecuente pérdida de fluido.

La herramienta fundamental para estudiar las características del modelo de diagnóstico, es la denominada “matriz de aislación”. En esta matriz, se organiza la información entre parámetros y residuos (salidas del sistema de diagnóstico) en forma de tabla. En dicha tabla los elementos  $a_{ij}$  serán igual a 1 si el residuo  $i$ -ésimo es activado por el parámetro  $j$ -ésimo (Samantaray A. K. y Medjaher K. (2006)), caso contrario el elemento será cero. En este arreglo, cada columna de la matriz (índice  $j$ ) mostrará todos los residuos activados por el parámetro asociado.

Con la matriz de aislación se busca identificar que fallas son *detectables*, y dentro de éstas, cuales son *aislables*. Estas propiedades se pueden definir como:

- Una falla (o parámetro) será detectable si su variación en la planta activa al menos un residuo.
- Una falla será aislable si los residuos activados por ésta tienen una combinación única que la distinga de las otras fallas detectables.

En palabras más sencillas, una falla es “detectable” si se puede determinar su presencia, y será “aislable”, si además se puede determinar cuál (de todas) es en concreto la falla que se detectó.

En el trabajo se realiza un experimento numérico para la obtención de la matriz de aislación. Por no contarse con datos experimentales de fallas, se emplea el modelo obtenido en la sección

4 en una configuración como se muestra en la figura 1, reemplazando la planta por el modelo obtenido en la sección 3.

Las simulaciones consisten en 3 etapas: una primera etapa en donde ambos modelos (de la planta y de diagnóstico) partiendo de las mismas condiciones iniciales alcanzan un estado estacionario durante  $\Delta t_0$  segundos. Una segunda etapa en donde se simula, a ambos sistemas a partir del estado estacionario previamente alcanzado como condición inicial por un intervalo de tiempo  $\Delta t_1$  hasta que se detiene la simulación y se varía uno de los parámetros. La tercera etapa en donde a partir de las condiciones finales de la etapa dos, se simula un intervalo de tiempo  $\Delta t_2$  y se observan los residuos. Ambos sistemas cuentan con la misma cantidad de nodos ( $N_m = N_d$ ), condiciones de bordes y siempre que sea necesario, condiciones iniciales. Esto implica que la única diferencia entre los modelos sea el valor de los parámetros. Se espera que los residuos tengan un valor nulo en situación normal. En el presente trabajo se indagó en cómo la cantidad de mediciones influyen en las propiedades de detección y aislación. Por dicho motivo, se realizaron tres experimentos: dos de ellos considerando distinto número de mediciones empleadas y variaciones en parámetros de la planta y un experimento utilizando mediciones reducidas y variaciones estructurales.

### 5.1. Variación en los parámetros y mediciones

Para los primeros dos experimentos se consideraron a las fallas solo como variaciones en los parámetros del equipo. De esta forma una falla se modela como una variación instantánea en el valor de un parámetro en el modelo de la planta. Para tales fines se utilizó la nodalización mostrada en la figura 10.

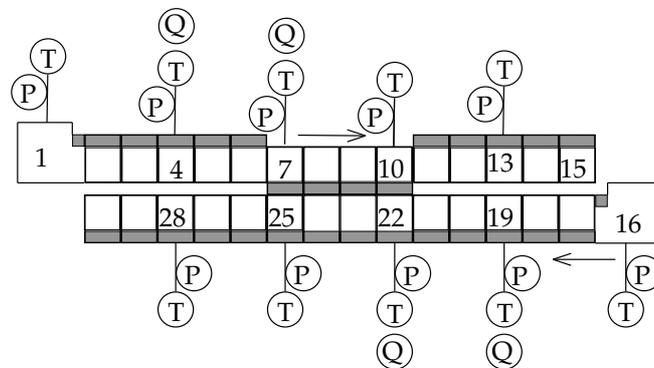


Figura 10: Nodalización y mediciones supuestas, cada letra dentro del círculo indica el tipo de medición como Q: caudal, P: presión y T: temperatura. Cada nodo es representado por un cuadrado blanco (fluido) y un rectángulo gris (pared).

#### 5.1.1. Matriz de Aislación 1: mediciones en todos los nodos

El primer experimento realizado utiliza mediciones en cada uno de los nodos del modelo de diagnóstico. Esta situación, si bien puede estar alejada de una situación real, es útil como referencia, ya que es la situación donde se esperan mejores capacidades de diagnóstico. Esto se debe a que cada variable utilizada en el cálculo de los residuos es suministrada por la medición tomada del modelo por lo que no se utiliza ninguna condición inicial, ni integración en ningún elemento. Notar que existirá un residuo por cada medición, por lo que además es la situación en la que más información se puede obtener de la falla. Dado el gran tamaño que se necesitaría para

presentar la matriz de aislación completa para todos los residuos y todos los parámetros (notar que  $N_d = N_m = 30$  existirán 90 residuos, y  $5N_d + 2 = 152$  parámetros) se optó por presentar la información obtenida por componente y por residuo para nodos genéricos pertenecientes al mismo circuito (lado tubo, o lado carcasa). Esta presentación tiene la ventaja además de generalizar el resultado para cualquier nodalización en la que se utilicen todas las mediciones.

	*		tubo					intercambiador					
	$C_{tk}^i$	$R_h^i$	$I^i$	$G_1^i$	$G_2^i$	$C_p^i$	$C_t^i$	$R_h^j$	$I^j$	$G_1^j$	$G_2^j$	$C_p^j$	$C_t^j$
$r_p^i$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
$r_p^j$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
$r_p^k$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
$r_q^i$	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
$r_q^j$	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0
$r_q^k$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
$r_t^i$	0	0	0	1	1	1	1	0	0	1	1	1	0
$r_t^j$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
$r_t^k$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1

Tabla 2: Matriz de aislación variando el parámetro i-ésimo, solo se muestran residuos activados.(\*: tanque)

Para la presentación de los resultados se organizó en columnas los parámetros pertenecientes a los componentes tanque, tubo e intercambiador de uno de los circuitos (nodos  $i$  e  $j$ ). En las filas, se organizaron los residuos activados pertenecientes a ambos circuitos (nodos  $i$ ,  $j$  y  $k$ ). Los subíndices  $p$ ,  $q$  y  $t$  hacen referencia a la variable de donde proviene el residuo y por consiguiente a su dominio. Por ejemplo, de la columna  $G_1^j$  se puede ver que si varía la conductancia térmica de un nodo del intercambiador, se activan los residuos térmicos correspondientes a ese nodo ( $r_t^j$ ) y al nodo en contacto en el otro lado del intercambiador ( $r_t^k$ ), por lo tanto dicha falla es detectable.

De la matriz de aislación de la tabla 2, se puede concluir que la variación de cualquier parámetro, produce una variación en al menos un residuo, por lo tanto, se puede decir que todas las fallas son detectables. Por otro lado, existen activaciones idénticas por parte de dos parámetros distintos. En estos casos, no se puede realizar una aislación: por ejemplo entre parámetros de un mismo dominio  $R_h$  e  $I$ . En cambio, si existe una aislación entre grupos de fallas del mismo dominio, por ejemplo entre  $R_h$  y  $C_t$ , como así también una aislación entre nodos, es decir que se puede identificar en qué nodo la falla ocurrió. Notar que los residuos relacionados a las mediciones de presión nunca se activan, esto se debe a la consideración de que los parámetros en el modelo asociados a este residuo ( $R$  y  $C$ ) no se modifican.

### 5.1.2. Matriz de Aislación 2: escenario de mediciones supuesto

Como se mencionó en la sección 4, se considera que en una implementación real del modelo de diagnóstico se contarán con mediciones típicas en la instrumentación y el control de sistemas termo-hidráulicos. Estas mediciones se suponen son las siguientes: presión y temperatura en los tanques, presión, temperatura y caudal en un punto de cada cañería, presión temperatura y caudal a la entrada del intercambiador (tanto lado tubos como lado carcasa), presión y temperatura a la salida del intercambiador. Este nuevo conjunto de mediciones va a diferir de los

anteriores no solo en cantidad de nodos medidos, sino en que además, no se contarán con todas las mediciones en cada uno de estos nodos ya que se medirá el caudal solo en dos nodos por circuito. Esta falta de mediciones implica que, variables antes impuesta por una señal, tenga que ser ahora calculadas por el modelo del sistema de diagnóstico. Se realiza nuevamente la matriz de aislación para algunos parámetros pertenecientes a cada equipo. Las mediciones elegidas se ubican de la siguiente forma en la nodalización: mediciones de caudal en los nodos 1, 3, 19 y 22, mediciones de presión y temperatura en los nodos 1, 3, 7, 10, 16, 18, 22, 25. Tanto la nodalización como las mediciones se muestran en la figura 10.

	*	tubo						intercambiador						*	tubo						intercambiador					
	$C_{tk}^1$	$R_h^4$	$I^4$	$G_1^4$	$G_2^4$	$C_p^4$	$C_t^4$	$R_h^8$	$I^8$	$G_1^8$	$G_2^8$	$C_p^8$	$C_t^8$	$C_{tk}^{16}$	$R_h^{23}$	$I^{23}$	$G_1^{23}$	$G_2^{23}$	$C_p^{23}$	$C_t^{23}$	$R_h^{29}$	$I^{29}$	$G_1^{29}$	$G_2^{29}$	$C_p^{29}$	$C_t^{29}$
$r_p^1$	1	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
$r_p^4$	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
$r_p^7$	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
$r_p^{10}$	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
$r_p^{13}$	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
$r_q^4$	0	1	1	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
$r_q^7$	0	1	1	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
$r_t^1$	1	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
$r_t^4$	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
$r_t^7$	0	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0
$r_t^{10}$	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	0	1	1	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0
$r_t^{13}$	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
$r_p^{16}$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0
$r_p^{19}$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0
$r_p^{22}$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
$r_p^{25}$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0
$r_p^{28}$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0
$r_q^{19}$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0
$r_q^{22}$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0
$r_q^{16}$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1
$r_t^{19}$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0
$r_t^{22}$	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
$r_t^{25}$	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0
$r_t^{28}$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0

Tabla 3: Matriz de aislación para algunas fallas representativas y uso de mediciones supuesto.(\*: tanque)

De la matriz de aislación 3 se puede observar que todas las fallas son detectables. En cuanto a la aislación, existe nuevamente una aislación por dominio (hidráulico y térmico) y una aislación geométrica en dos zonas por cada circuito, de acuerdo a los dos intervalos que existen entre los sensores de caudal dispuestos. Notar que si la falla ocurre aguas arriba del sensor, su efecto se propaga por todos los residuos hasta llegar nuevamente a un sensor de caudal que “rectifica” la variable asociada.

### 5.2. Matriz de Aislación 3: fallas estructurales

Hasta el momento se consideró como falla a toda aquella desviación de un parámetro de su valor normal. Esto no incluye explícitamente una de las fallas más importantes en los sistemas termo-hidráulicos que es aquella asociada a las pérdidas de fluido. Este tipo de falla no puede ser modelado directamente como una variación en alguno de los parámetros, sino que necesita incorporar algún elemento al modelo (esta falla está relacionada con un cambio en la estructura del sistema, en vez de estarlo con un parámetro) que represente una fuga de caudal o la posibilidad de esta como por ejemplo con un orificio.

Para la planta utilizada se resolvió utilizar la descripción estructural del modelo para simu-

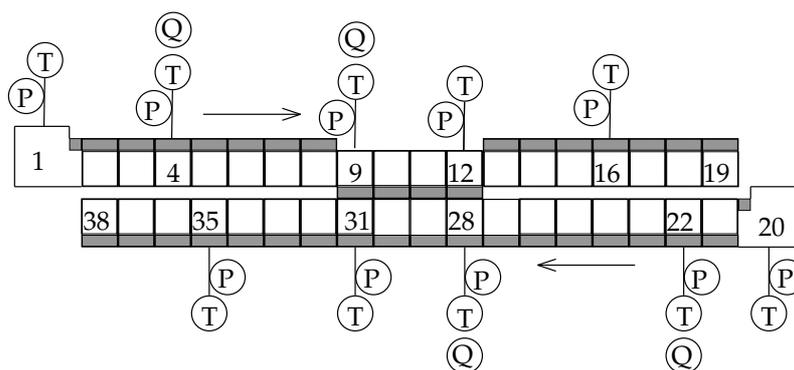


Figura 11: Nodalización utilizada para el modelo de diagnóstico estructural.

lar esta falla. Para esto se incorporan celdas extras mediante la utilización de las matrices  $TF_h$  y  $TF_t$  en el momento de la falla (ver figura 8). Esta celda modela una unión tipo “T” entre tres nodos, en donde uno de ellos simula la salida de líquido hacia el exterior. Notar que para la detección de la falla no es estrictamente necesario que el modelo de diagnóstico sea capaz de modelar dicha falla. En cambio, si es necesario contar con algún modelo de la falla como alimentación al modelo de diagnóstico en las simulaciones. La simulación de la falla en este sentido, puede considerarse como una simulación de un sistema dinámico con estructura variable.

Para estudiar las capacidades de diagnóstico ante pérdidas de fluidos, se construye de manera análoga a los estudios de aislación y detección realizados anteriormente, una matriz de aislación para pérdidas. Para dicha construcción se utilizan las mismas mediciones que en el último experimento, con la salvedad de que utilizan 38 nodos en vez de 30 ( $N_m = N_d = 38$ ) por lo que la nodalización de mediciones y residuos es la que se ilustra en la figura 11. En el experimento se simulan pérdidas en cuatro puntos distintos de la cañería. Las fallas son identificadas por el nodo anterior en el cual se genera una pérdida. Por ejemplo, si una pérdida es generada entre el nodo 7 y 8 la falla se denomina *pérdida*<sup>7</sup>. Los nodos en los que se genera dicha pérdida son los nodos: 3, 7, 24 y 35. mientras que en la tabla 4 se muestran las activaciones para la pérdida anterior y las restantes propuestas. Esta tabla a diferencia de las anteriores es ordenada colocando los residuos como columnas y las fallas como filas.

	$r_p^1$	$r_p^4$	$r_p^9$	$r_p^{12}$	$r_p^{16}$	$r_q^4$	$r_q^9$	$r_t^1$	$r_t^4$	$r_t^9$	$r_t^{12}$	$r_t^{16}$	$r_p^{20}$	$r_p^{22}$	$r_p^{28}$	$r_p^{31}$	$r_p^{35}$	$r_q^{22}$	$r_q^{28}$	$r_t^{20}$	$r_t^{22}$	$r_t^{28}$	$r_t^{31}$	$r_t^{35}$	
<i>pérdida</i> <sup>2</sup>	1	1	0	1	1	1	1	1	1	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
<i>pérdida</i> <sup>7</sup>	0	0	1	0	0	1	1	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
<i>pérdida</i> <sup>14</sup>	1	1	0	1	1	1	1	1	1	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
<i>pérdida</i> <sup>12</sup>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	1	1	0	1	1	1	1	1	1	0	1	1	
<i>pérdida</i> <sup>25</sup>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	1	

Tabla 4: Matriz de aislación para residuos para pérdidas propuestas.

De la matriz de aislación de la tabla 4, se puede observar que, todas las pérdidas propuestas son detectadas. En cuanto a la aislación, se puede distinguir si las pérdidas ocurrieron, antes o después del intercambiador. Esta aislación se corresponde nuevamente, con los intervalos en los que se encuentran las mediciones de caudal.

### 5.3. Implementación

Para poder realizar los experimentos numéricos se realizó una implementación computacional en donde se buscó mantener las ventajas de la representación mediante BG. Para esto, se

realizó una descripción del modelo en el lenguaje **Modelica**.<sup>3</sup> Este es un lenguaje declarativo orientado a objetos y orientado a la simulación de sistemas dinámicos, particularmente a la formulación mediante Ecuaciones Diferenciales Ordinarias (EDOs). Los modelos dentro de este lenguaje se definen básicamente a través de la descripción matemática de *elementos* (sus variables, condiciones iniciales y ecuación diferencial) y de la descripción de *conexiones* entre elementos. Modelica cuenta además con una formulación a-causal, es decir, las ecuaciones son especificadas pero no el orden en que se calculan las variables. Por ejemplo, el signo de igualdad no tiene un significado de asignación como en otros lenguajes sino que tiene un significado de equivalencia (Tiller (2012)). Estas características hacen que la formulación de los modelos en Bond Graphs se pueda hacer de una forma más natural.

Modelica cuenta con herramientas auxiliares para facilitar el desarrollo de modelos y su simulación. Las bibliotecas por ejemplo, proveen implementaciones en el lenguaje de elementos típicos de diferentes áreas temáticas. Para el trabajo se utilizaron tanto bibliotecas de BG (BondLib, Cellier y Nebot (2005)) como de MBG (MultiBondLib, Zimmer y Cellier (2006)). Estas bibliotecas presentan además una representación esquemática de los elementos y sus posibles conexiones, que pueden facilitar el modelado mediante el uso una interfaz gráfica. Para esto se utilizó el software **Openmodelica**<sup>4</sup> que provee, entre otras herramientas, una interfaz gráfica. Si bien el software Openmodelica cuenta con herramientas para la simulación numérica, se prefirió exportar el modelo y utilizar otro software para esto.

Para la exportación de los modelos se eligió utilizar el denominado “Functional Mock-up interface” **FMU**<sup>5</sup>. Esta herramienta procura disponer de una interfaz estandarizada de modelos para la simulación computacional. Este estándar provee una descripción del modelo independiente de la herramienta utilizada para su simulación (Blochwitz, Otter et al. (2012)) por lo que puede aprovechar herramientas provenientes de diversos softwares.

Para la resolución numérica del modelo se utilizó el software **JModelica**. Esta herramienta se considera como una “plataforma para la optimización, simulación y análisis de sistemas dinámicos complejos”<sup>6</sup>. JModelica provee funciones y bibliotecas que pueden utilizarse en el lenguaje **Python**, entre ellas las necesarias para la simulación. Para esto último se utiliza **Assimulo**. Assimulo por su parte es un paquete que combina una variedad de “solvers” para la solución de ecuaciones diferenciales ordinarias. En este paquete se encuentran “solvers” con estándares tanto industriales como de investigación.

Todas las instrucciones necesarias para la simulación y carga del modelo se realizan mediante “scripts” en el lenguaje **Python**. Esto tiene la ventaja de poder utilizar numerosas bibliotecas accesorias que permiten por ejemplo, realizar cálculos, exportar e importar en diversos formatos, etc.

## 6. CONCLUSIONES

Un prototipo de modelo de diagnóstico fue realizado con el objetivo de detectar y aislar de forma prematura fallas en un sistema termo-hidráulico. Motivado por la importancia de estos sistemas y los riesgos de sus fallas, se estudiaron las capacidades de diagnóstico del prototipo propuesto, buscando establecer las posibilidades y limitaciones en una implementación real. Por no contarse con datos de una planta en concreto, se procuró mantener la mayor generalización posible en el planteo, para poder aprovechar tanto la implementación numérica como los resul-

---

<sup>3</sup> [www.modelica.org](http://www.modelica.org)

<sup>4</sup> [www.openmodelica.org](http://www.openmodelica.org)

<sup>5</sup> [www.fmi-standard.org](http://www.fmi-standard.org)

<sup>6</sup> [www.jmodelica.org](http://www.jmodelica.org)

tados en sistemas similares. Si bien se enmarcó el trabajo en la metodología del diagnóstico de fallas basado en BG, se debieron realizar consideraciones particulares. Por las características físicas de la planta se modeló partiendo de sus ecuaciones diferenciales en derivadas parciales de los fenómenos involucrados. Luego de obtener un modelo de un segmento de tubería (nodo), se construyó la planta mediante la interconexión de estos y el uso de elementos transformadores generalizados ( $TF$ ). Esta particularidad permitió además poder modelar pérdidas de fluido y realizar los experimentos deseados.

De los experimentos numéricos se obtuvieron tres matrices de aislación:

- Dos matrices de aislación para evaluar como la aislación y detección de fallas producto de variaciones en parámetros de la planta se modificaba con la utilización de distinto número mediciones.
- Una matriz de aislación para evaluar la detección y aislación en situaciones donde existe una pérdida de fluido.

En las primeras dos matrices se observó que existía una detección de fallas en todas las situaciones. Es decir, se activó un residuo ante la variación de cualquier parámetro, por lo que el sistema de diagnóstico puede en principio, identificar si la planta está fallando en todos los escenarios de mediciones propuestos. Con respecto a la aislación se observó que, de acuerdo a los residuos obtenidos podía clasificarse a la falla según el dominio en que ocurría (hidráulico o térmico) y por la zona o región dentro de la planta. La zona es determinada por la activación de dos residuos adyacentes, por lo que esta última clasificación se deteriora a medida que las mediciones disminuyen, como se puede observar de la comparación entre la matrices de aislación 1 y 2 (tablas 2 y 3).

En cuanto a la detección de pérdidas de fluido, se obtuvieron resultados similares tanto en detección y aislación. Todas las pérdidas planteadas son detectables, mientras que la ubicación de esta pérdida está limitada por la cantidad de mediciones utilizadas.

Es importante destacar que la decisión de si un residuo esta activado o no, se dificulta a medida de que existen perturbaciones en dicha señal. Las perturbaciones pueden provenir de ruidos en la señales, diferencias entre el modelo de diagnóstico y la planta y errores numéricos. Para mejorar estas características se pueden utilizar distintas técnicas de análisis de señales.

En general se puede concluir que el límite superior en las características que el modelo de diagnóstico pueda tener serán heredadas del modelo de la planta. Mientras mas fiel sea el modelo, mejores características de detección y aislación se podrán obtener.

## 6.1. Trabajos futuros

En próximos trabajos se espera mejorar el modelo para poder utilizar menos hipótesis, por ejemplo permitiendo modelar cambios de estado y variaciones en la densidad. Implementaciones en BG en este sentido se puede encontrar en [Greifeneder y Cellier \(2001b\)](#).

Una mejora necesaria para una aplicación industrial del sistema, es la del tratamiento de las señales. Los residuos en una implementación real necesitarán de filtros y de mecanismos que permitan identificar automáticamente la activación de los residuos. En este sentido es posible implementar técnicas de reconocimiento de sistemas en el contexto de BG como por ejemplo en [Samantaray y Ghoshal \(2007\)](#). Estas técnicas pueden ser aplicadas también a la identificación de la estructura. Trabajos en esta dirección se pueden encontrar en [Borutzky \(2014\)](#).

Aumentos en la complejidad del modelo de diagnóstico tendrá asociado un aumento en el costo computacional. Teniendo esto en cuenta, cobra importancia las relaciones que se puedan

establecer entre métodos numéricos y BG. Ésto podría disponer de herramientas y resultados tanto para el modelado, como para el diagnóstico. Trabajos sobre esta relación se encuentran en [Gandolfo E.F. \(2006\)](#) en donde explícitamente se utilizan los MBG para representar la solución por elementos finitos de las ecuaciones de fluido dinámica. Se espera en el futuro poder aprovechar estas teorías para la disciplina del diagnóstico de fallas aplicados a sistemas termohidráulicos.

## REFERENCIAS

- Blochwitz T., Otter M., et al. Functional mockup interface 2.0: The standard for tool independent exchange of simulation models. En *Proceedings of the 9th International MODELICA Conference*, (76):173–184, 2012.
- Borutzky W. *Bond Graph Methodology*. Springer Alemania, 2010.
- Borutzky W. Bond graph modelling of engineering systems theory, applications and software support. En *Advances in Atomic, Molecular and Optical Physics*. Academic Press, Inc., (56):3, 2011.
- Borutzky W. Bond graph model-based system mode identification and mode-dependent fault thresholds for hybrid systems. *Mathematical and Computer Modelling of Dynamical Systems*, 20(6):584–615, 2014.
- Breedveld P.C. Multibond graph elements in physical systems theory. *Journal of the Franklin Institute*, 319(1):1–36, 1985.
- Cellier F.E. y Greifeneder J. Object-oriented modeling of convective flows using the dymola thermo-bond-graph library. *SIMULATION SERIES*, 35(2):198–206, 2003.
- Cellier F.E. y Greifeneder J. *Continuous system modeling*. Springer Science & Business Media, 2013.
- Cellier F.E. y Nebot À. The modelica bond graph library. En *Proc. 4th International Modelica Conference, Hamburg Germany*. 2005.
- Ding S.X. *Model-Based Fault Diagnosis Technique*. Springer Berlin Heidelberg, 2013.
- Djeziri M., Ould Bouamama B., y Merzouki R. Modelling and robust fdi of steam generator using uncertain bond graph model. *Journal of Process Control*, 19:149–162, 2009.
- Gandolfo E.F. Desarrollo de una metodología basada en los bond graphs para problemas de fluidodinámica computacional. 2006.
- Greifeneder J. y Cellier F.E. Modeling convective flows using bond graphs. *SIMULATION SERIES*, 33(1):276–284, 2001a.
- Greifeneder J. y Cellier F.E. Modeling multi-phase systems using bond graphs. *SIMULATION SERIES*, 33(1):285–294, 2001b.
- Jean T. y Ould B. *Modelling and Simulation in Thermal and Chemical Engineering*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2000.
- Medjaher K., Samantaray A., Ould Bouamama B., y Staroswiecki M. Supervision of an industrial steam generator. Part II: Online implementation. *Control Engineering Practice*, 14:85–96, 2006.
- Nacusse M. A. y Pierucci G. J. Bond graph based fault diagnosis of 4w-vehicles suspension systems ii: Active suspensions. En *SIMULATION SERIES*, by The Society for Modeling and Simulation International, San Diego, 39:233–240, 2007.
- Ould Bouamama B., Medjaher K., Samantaray A., y Staroswiecki M. Supervision of an industrial steam generator. Part I: Bond graph modelling. *Control Engineering Practice*, 14:71–83, 2006.
- Samantaray A.K. y Bouamama B.O. *Model-based Process Supervision*. Springer-Verlag Lon-

- don, 2008.
- Samantaray A.K. y Ghoshal S.K. Sensitivity bond graph approach to multiple fault isolation through parameter estimation. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part I: Journal of Systems and Control Engineering*, 221(4):577–587, 2007.
- Samantaray A. K. y Medjaher K. Diagnostic bond graphs for online fault detection and isolation. *Simulation Modelling Practice and Theory* 14 (2006), 27(14):237–262, 2006.
- Silva L. y Delarmelina D. Bond graph based fault diagnosis of 4w-vehicles suspension systems i: Passive suspensions. 15–17, 2007.
- Thoma J. *Simulation with Entropy in Engineering*. Pergamon Press, 1976.
- Tiller M. *Introduction to physical modeling with Modelica*. Springer Science & Business Media, 615, 2012.
- Zimmer D. y Cellier F.E. The modelica multi-bond graph library. En *Proceedings of the 5th International Modelica Conference*, 559–568, 2006.