



**UNIVERSIDAD MICHOACANA DE
SAN NICOLÁS DE HIDALGO**

FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA

**“DETECCIÓN DE FALLAS EN UN SISTEMA HIDRÁULICO EN EL
DOMINIO FÍSICO”**

TESIS

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:
INGENIERO ELECTRICISTA**

PRESENTA:

DAVID LEYVA RUIZ

ASESOR DE TESIS:

DR. GILBERTO GONZÁLEZ AVALOS

MORELIA, MICHOACÁN, MARZO 2010

RESUMEN

La presente investigación se encuentra dirigida a la detección de fallas en un sistema hidráulico de dos tanques en serie así como también en un sistema con conexión serie-paralelo el cual está conformado por seis tanques, esta misma conexión se presenta como un modelo a seguir para la detección de fallas a gran escala. Las fallas a las cuales se encuentra sometido ambos sistemas hidráulicos son de dos tipos, la primera es una falla que dura solamente algunos segundos representada por una señal tipo pulso, la segunda es una falla que se mantiene a lo largo del periodo dinámico del sistema y que es simbolizada por una señal tipo escalón. Para el logro de la detección de fallas se emplea el método de detección de fallas por residuos así como el uso de observadores de estado; en cuanto al modelado de ambos sistemas hidráulicos se aplica la metodología de bond graph, la cual proporciona de manera gráfica la representación de cada uno de los parámetros físicos que intervienen dentro del sistema hidráulico. La elaboración de los sistemas a través de bond graph se llevan a cabo dentro del programa 20-sim, con la finalidad de obtener de manera gráfica las respuestas de cada uno de los sistemas hidráulicos al momento de someterse a los dos tipos de falla.

ÍNDICE

Capítulo 1. Introducción	1
1.1 Antecedentes	1
1.2 Objetivo general	2
1.3 Objetivos particulares	2
1.4 Preguntas de investigación	3
1.5 Justificación	3
1.6 Metodología	4
1.7 Contenido de la tesis	4
 Capítulo 2. Antecedentes de sistemas hidráulicos	 6
2.1 Introducción	6
2.2 Modelado de sistemas en bond graph	7
2.2.1 Puertos-1	9
2.2.2 Puertos-2	10
2.2.3 Puertos-3 uniones	12
2.2.4 Causalidades	12
2.3 Modelado de un sistema hidráulico	13
2.4 Observadores de estado	16
2.5 Diagnóstico de fallas mediante residuos	18
 Capítulo 3. Modelado de un sistema hidráulico en bond graph	 21
3.1 Introducción	21
3.2 Sistema hidráulico de dos tanques	21
3.3 Bond graph del sistema hidráulico	23
3.4 Modelo matemático a partir de su bond graph	23

Capítulo 4. Detección de fallas basado en modelo-observador en bond graph.	30
4.1 Introducción	30
4.2 Detección de fallas con sensores de caudal	31
4.3 Detección de fallas con sensores de presión	46
4.4 Detección de fallas con sensores de caudal y presión	58
 Capítulo 5. Detección de fallas a gran escala	 64
5.1 Introducción	64
5.2 Detección de fallas a gran escala con sensores de caudal	65
 Capítulo 6. Conclusiones	 76
 Bibliografía	 78

Capítulo 1

Introducción

1.1 Antecedentes

En los recientes años se han establecido diferentes métodos para el análisis, modelado y control de sistemas hidráulicos, de igual forma, se han propuesto técnicas para la detección de fallas dentro de los mismos bajo la metodología de Bond Graph; éstas propuestas tienen como objetivo principal el poder observar el comportamiento dinámico del modelo cuando éste se encuentra sujeto a fallas. Dentro de los métodos que han sido propuestos por diferentes autores para la identificación de fallas se encuentra el diseño de observadores de estado.

Otra de las técnicas utilizadas para la detección de fallas es el análisis cualitativo usando gráficas de árbol, éstas gráficas de árbol son una representación cualitativa de un sistema de ecuaciones derivadas de un modelo. Este método sigue ambas fallas tanto cualitativas como cuantitativas en el efecto de análisis para la operación de sistemas en estado estable. El análisis cualitativo de las gráficas de árbol predice el efecto final, es decir, el nuevo estado estable asumiendo las condiciones de falla. Por otro lado, el análisis cuantitativo evalúa el efecto transitorio seguido por el efecto final por el uso detallado de las características e información de los componentes del sistema. Esta técnica tiene la ventaja de ser muy clara para encontrar las relaciones entre el sistema y los elementos que conforman las gráficas de árbol. Además ésta manera de modelar los sistemas muestra un orden para localizar con éxito las fallas.

Un método más empleado para la detección de fallas y aislamiento es el cualitativo usando gráficas de causalidad temporal; las gráficas causales son un tipo de gráficas lineales, las cuales representan la estructura del modelo para conectar varios nodos, representando variables en el modelo. Las líneas directas en la gráfica son usadas para representar restricciones correspondientes a varios elementos pasivos en un modelo de Bond Graph (I, C, R, TF y GY); mientras que las restricciones aditivas son representadas en

los nodos. Las gráficas causales temporales (en inglés TCG) son una especie de clase de gráficas, en las cuáles la evolución temporal de las variables son representadas cualitativamente acorde a la descripción de los elementos almacenados que se encuentran en el camino causal. Las gráficas de causalidad temporal tienen una gran semejanza con las gráficas de señales de flujo y así ellas son fácilmente construidas para los modelos de Bond Graph usando el procedimiento para la creación de gráficas de señales de flujo.

1.2 Objetivo General

El objetivo de esta tesis es obtener el modelo gráfico de un sistema de agua potable el cual sea lo suficientemente flexible para detectar una o varias fallas en un punto específico del sistema, algunas de estas fallas pueden ser fugas de agua. Para lograr éste objetivo se utiliza el método de Bond Graph, a través de éste método se establece la representación física en forma gráfica de cada uno de los dispositivos que componen al sistema hidráulico.

1.3 Objetivos particulares

- Lograr que el sistema de agua potable pueda crecer en una, dos o n viviendas y que el modelo gráfico pueda seguir siendo consistente en cuanto a la detección de las fallas se refiere.
- Obtener la caracterización de las variables presión y caudal, para poder observar las fluctuaciones que éstas tienen cuando ocurren las fallas en uno o en diversos puntos del sistema.
- Determinar cuales son las zonas o puntos críticos del sistema hidráulico, que tienen un alto nivel de riesgo de falla y que afecten de forma drástica el funcionamiento estable del sistema hidráulico.

1.4 Preguntas de Investigación

- ¿Cuáles son las ventajas de obtener un modelo confiable capaz de modelar una red de agua potable tan grande como se requiera?
- ¿Cuál de las variables presión y caudal están sujetas a una mayor variación en su comportamiento, para las diferentes fallas posibles?
- ¿Cómo se comporta el sistema hidráulico en el momento en que ocurren las fallas en los puntos más críticos de la red?

1.5 Justificación

Los sistemas hidráulicos de agua potable son redes enormes de distribución que se extienden a lo largo de cientos de kilómetros, con la única finalidad de poder suministrar éste líquido de vital importancia a cada una de las viviendas que conforman ésta red. Por lo general, éste tipo de sistemas de distribución de agua se pueden encontrar en cualquier parte del mundo, lo cual implica que sea un tema de interés global.

Si bien la construcción de cada una de las redes de agua potable cambia de acuerdo a las condiciones físicas del terreno que se tengan en las diferentes zonas, los equipos que se utilizan para la transmisión del agua son los mismos. Estos dispositivos son bombas utilizadas para el envío a presión del agua, las válvulas para el control del traslado de la misma, así como las tuberías que actúan como el conducto para la transmisión del agua; además de éstos dispositivos se debe de contar con una fuente, es decir, una represa, así como también tanques o aljibes, para el almacenamiento del líquido.

Este tipo de sistemas al igual que otros no se comportan de forma ideal, es decir, se tienen deficiencias en cuanto a su funcionamiento, lo cual indica que existen fallas, estas fallas provocan que el sistema tenga un comportamiento inestable. En ocasiones es difícil monitorear de manera sencilla las condiciones bajo las cuales está operando el sistema; en este punto es donde se encuentra el área de oportunidad de la presente investigación, debido al hecho de que el contar con un método gráfico que identifique las fallas dentro de un sistema hidráulico, brinda la característica de poder predecir el comportamiento dinámico del mismo. El hecho de obtener un modelo de esta naturaleza y con éstas características podrá contribuir en un momento dado, para poder identificar cuales son las zonas en las que existe una inestabilidad dinámica y establecer cuáles son las causas de ese comportamiento.

Muchas de las recientes propuestas para el diagnóstico de fallas son basadas en reglas, tales propuestas usan métodos de predicciones simples para proveer posibles causas y posibles fallas en entradas o parámetros de un sistema. Estos métodos sufren de inflexibilidad e incompetencia. Métodos recientes de diagnóstico de fallas están basados en estructuras subyacentes y comportamiento de un sistema.

Los modelos sirven tanto para la representación del conocimiento de una gran cantidad de estructuras, funciones e información del comportamiento y su relación. Ésta representación del conocimiento es usada para crear complejos razonamientos de causa-efecto, siguiendo la construcción de un poderoso y robusto sistema de diagnóstico de control.

El razonamiento cualitativo usando el método de Bond Graph puede ser dirigido para construir supervisión inteligente en sistemas de control. Este uso general estratégico de razonamiento a través de los modelos de Bond Graph son empleados para la representación del conocimiento.

1.6 Metodología

El método descriptivo-correlativo es la forma bajo la cual está presentado ésta investigación utilizando la metodología de Bond Graph para modelar y analizar un sistema hidráulico en el dominio físico. Una vez determinado este punto se establecerá el modelo matemático del sistema físico de manera sencilla y directa.

De igual forma se obtendrá el estado estacionario de las variables del sistema utilizando una asignación de causalidad derivativa de los elementos de almacenamiento del sistema modelado en Bond Graph, evitando así la determinación de la matriz inversa de estados. Además se establecerán diversas fallas a lo largo del sistema propuesto, lo cual mostrará la ventaja de emplear ésta técnica de modelado, debido a que la reconfiguración del sistema es en forma directa.

1.7 Contenido de la tesis

Esta investigación ha sido organizada en seis capítulos. En el capítulo 1 se presenta una breve descripción acerca de algunos métodos utilizados en Bond Graph para determinar fallas en distintos tipos de sistemas físicos, además, se establece la importancia que tiene

ésta metodología en el área de modelado. Enseguida se presenta el objetivo general, así como los objetivos particulares que se tienen en el presente trabajo y con ellas poder dar respuesta a las preguntas de investigación que se han establecido.

En el capítulo 2 se describe la forma de trabajo que utiliza Bond Graph para el diseño de sistemas en el dominio físico, igualmente, se describen los elementos básicos que son necesarios para establecer el modelo. Por último se define los tipos de observadores de estado, así como la descripción del método de detección de fallas mediante residuos.

En el capítulo 3 se establece el modelado de un sistema hidráulico de dos tanques con la técnica de Bond Graph, en el cual se representa cada uno de los elementos que conforman a este sistema, además de obtener sus ecuaciones, así como las variables de estado que definen éste tipo de sistemas en particular.

En el capítulo 4 se modela el sistema hidráulico de dos tanques en serie mediante la aplicación de la metodología de bond graph; a éste sistema se le aplican dos tipos de falla con el objetivo de observar el comportamiento del sistema ante fugas de agua de corto tiempo así como fugas que persisten durante el tiempo dinámico del sistema, para el logro del diagnóstico de fallas se hace uso de sensores de caudal así como de presión.

En el capítulo 5 se presenta un sistema hidráulico conformado por seis tanques, al cual nuevamente se aplican los dos tipos de falla presentadas en el capítulo 4, la diferencia en ésta ocasión es que son únicamente detectadas a través del uso de sensores de caudal. Además en este capítulo se determina la conexión utilizada para los seis tanques como un modelo a seguir para la detección de fallas a gran escala.

Por último, se exponen los resultados que se obtuvieron al establecer diversas fallas a lo largo del sistema, las aportaciones que ésta investigación proporcionó así como algunas recomendaciones.

Capítulo 2

Antecedentes de sistemas hidráulicos

2.1 Introducción

Los sistemas hidráulicos tienen una amplia gama de aplicaciones en procesos industriales, automotrices, militares, agrícolas, etc., a pesar de la gran cantidad de usos que tienen éste tipo de sistemas, existen sólo algunas investigaciones en cuanto a los métodos que se utilizan en cada uno de estos procesos para la detección de fallas; de manera particular en los sistemas hidráulicos aplicados al suministro de agua potable, existe escasa información que revele las técnicas utilizadas para identificar las irregularidades en el funcionamiento del sistema.

Una técnica que ha venido tomando gran fuerza y renombre debido a algunas características como son la flexibilidad y la robustez, es el método de Bond Graph, el cual fue desarrollado por Henry Paynter en 1961 para modelar la interacción entre los subsistemas hidráulico, mecánico y eléctrico en el proceso de generación hidroeléctrica.

Esta metodología de modelado de sistemas en el dominio físico, en inglés Bond Graph; se establece como un enfoque unificado para representar de manera conjunta sistemas hidráulicos, mecánicos, eléctricos, neumáticos y térmicos a través del flujo de potencia entre los componentes del sistema a través de puertos de energía, consistente en señales, líneas y símbolos propios que permiten representar gráficamente el modelo físico, de igual forma, proporciona una visualización de las interacciones de causa y efecto entre sus distintos componentes y suministra implícita y sistemáticamente el modelo matemático en forma de variables de estado, facilitando el uso de recursos computacionales para la simulación que se realiza directamente de ésta representación gráfica.

Cabe mencionar que esta técnica utiliza analogías de los sistemas eléctricos, lo que permite la construcción de modelos complejos con elementos básicos. Este modelado permite conocer sus propiedades de observabilidad, controlabilidad y dependencia línea de

sus elementos, basado en una representación gráfica y la generalización de los conceptos de variable de flujo y esfuerzo.

2.2 Modelado de sistemas en bond graph

En el modelado en Bond Graph la interacción de las conexiones toma lugar a través de una entidad abstracta llamada *puerto de energía* o *bond de energía*, cada puerto de energía es representado por un bond que tiene asociación con dos factores de conjugación de potencia o variables de potencia, éstas *variables de potencia* que describen la unión de dos multipuertos, son llamadas así a causa de que el producto de las variables consideradas como funciones del tiempo es la potencia instantánea fluyendo entre los dos multipuertos.

El *bond de energía* muestra la dirección en que fluye la energía entre los componentes y es representado por una semiflecha (Figura 2.1). Un ejemplo es la potencia que puede entrar o dejar un elemento inactivo a través de la fuerza que actúa en éste y la velocidad en la cual éste se mueve, así una simple masa colocada en un movimiento lineal dimensional es asociado con un par de variables de energía y consecuentemente con un puerto de energía.

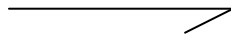


Fig. 2.1 Bond de energía.

En ocasiones existen sistemas que requieren de numerosos componentes para poder llevar a cabo el modelado, lo cual provoca complicaciones al momento de estar elaborando el diseño, por esta razón, es necesario dividir este tipo de sistemas en componentes más pequeños para poder ser modeladas y estudiadas experimentalmente, y a continuación ensamblarlas al modelo general del sistema. Las partes principales del sistema se denominan *subsistemas*, éstos forman parte de un sistema que son modelados como sistemas en sí mismos y las partes irreducibles son llamadas *componentes*, los cuales son modelados como una entidad.

Los *subsistemas* así como los *componentes* pueden ser interconectados a través de los *puertos*. Los sistemas con un puerto sencillo está denotado como *puerto-1*, un sistema

con dos puertos es denominado *puerto-2* y de igual forma para sistemas con multipuerto son llamados *puertos-n*, donde n es el número de puertos.

Debido a la existencia de interacciones de potencia cuando dos puertos son conectados, es importante clasificar la variedad de variables de potencia en un esquema universal, de igual forma es necesario describir todos los tipos de multipuerto en un lenguaje sencillo. Las variables de potencia denominadas *esfuerzo* $e(t)$ y *flujo* $f(t)$ se conocen en Bond Graph como *variables de bond generalizadas*, esto al hecho, de que son utilizadas en todos los dominios de energía, es decir, no importa si los sistemas son eléctricos, mecánicos, hidráulicos, etc. En la figura 2.2 se muestra la representación de un bond de energía con las variables de potencia asociadas.

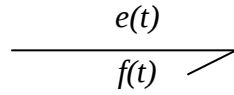


Fig. 2.2 Bond de energía designado con sus variables de potencia.

La relación de estas variables está determinada por la siguiente ecuación.

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

Otro tipo de elementos que usualmente se pueden encontrar en los sistemas no importando la aplicación que éstos tengan, son los componentes que almacenan energía, para ellos es importante establecer las variables que representen el estado del sistema, éstas variables se denominan *variables de energía*, las cuales son *momento* $p(t)$ o *esfuerzo acumulado* $e_a(t)$ y *desplazamiento* $q(t)$ o *flujo acumulado* $f_a(t)$, la cuales están definidas por:

$$p(t) = e_a(t) = \int_0^t e(\tau) d\tau \quad (2.2)$$

$$q(t) = f_a(t) = \int_0^t f(\tau) d\tau \quad (2.3)$$

Los elementos estándares en Bond Graph son clasificados de acuerdo al número de bonds como a la cantidad de puertos. Por ejemplo, los elementos de puerto-1 contienen

elementos que disipan potencia, almacenan energía o suministran potencia. Estos componentes son resistivos, capacitivos e inductivos y también son conocidos como elementos pasivos. Otros dos elementos que también se encuentran en esta clasificación son las fuentes de esfuerzo y flujo, las cuales se consideran como elementos activos.

2.2.1 Puertos-1

Los elementos resistivos, involucran la no integración y directamente relacionan el esfuerzo con el flujo o viceversa, su forma de modelado es igual a una resistencia en sistemas eléctricos o una válvula en sistemas hidráulicos. La constitución de la ley generalizada para un elemento resistivo en Bond Graph es la siguiente.

$$e = \phi(f) \quad (2.4)$$

$$f = \psi(e) \quad (2.5)$$

o en su forma lineal este se define como:

$$e = Rf \quad (2.6)$$

Donde ϕ y ψ son solamente funciones evaluadas tanto de flujo como de esfuerzo respectivamente. La forma en la cual pueden ser usadas en el modelo matemático consecuente depende de la orientación causal del elemento R .

El elemento capacitivo, al igual que un capacitor eléctrico, este almacena energía dependiendo de su configuración. Este elemento se caracteriza por tener relacionadas las variables de flujo y esfuerzo a través de la siguiente ecuación.

$$e = e(q) \quad (2.7)$$

$$q = f \int dt \quad (2.8)$$

Otro elemento utilizado es el de inercia (I), el cual relaciona el esfuerzo o su integración (el impulso) con el tipo de cambio ya sea en el momento o en la velocidad. La relación para un simple elemento inercial lineal puede ser escrita de la siguiente forma.

$$e(t) = \frac{d(m(t)f)}{dt} \quad (2.9)$$

En esta expresión la inercia generalizada $m(t)$ se está tomando como una función del tiempo. En la mecánica newtoniana una partícula de masa no cambia con el tiempo, sin embargo, en máquinas rotatorias o bien en circuitos eléctricos la inercia generalizada varía con el tiempo.

Como se describió anteriormente, existen dos tipos de fuentes las cuales introducen energía al sistema, las fuentes son elementos activos sencillos llamados Puerto-1. Estas fuentes son de esfuerzo y de flujo y se denotan como MSe y MSf respectivamente, la representación de cada una de estas fuentes se muestra en la figura 2.3.



Fig. 2.3 Puertos-1 activos

Una fuente de esfuerzo es externa al sistema en el sentido de que el sistema no tiene influencia en su salida. La fuente de esfuerzo determina el esfuerzo en el bond asociado con él. El esfuerzo prescrito así por una fuente puede ser función del tiempo o incluso por los estados del sistema o ambos.

La fuente de flujo determina la variable de flujo en el bond asociado con éste. Para esta fuente la variable de esfuerzo es una entidad extra en el sistema y no tiene influencia en la salida de ésta fuente. El flujo preescrito así por una fuente puede ser cualquier función del tiempo, del estado del sistema o ambos.

2.2.2 Puertos-2

En el modelado con Bond Graph se cuenta con otro tipo de componentes llamados elementos ideales de puerto-2; el primero de ellos es el *transformador* (TF) y el segundo es el *girador* (GY), estos sistemas son lineales los cuales cambian la relación entre las variables de flujo y esfuerzo. Caracterizándose por tener dos puertos, y una relación lineal

entre esfuerzos y flujos. De manera particular, el transformador no crea, almacena o destruye la energía, este conserva la potencia y transmite el factor de potencia con su propia escala definida por la modulación del transformador. Las relaciones de las variables de bond generalizadas para el transformador están dadas por las siguientes ecuaciones, donde n es el módulo.

$$e_1(t) = ne_2(t) \quad (2.10)$$

$$f_1(t) = \frac{1}{n} f_2(t) \quad (2.11)$$

El bond que representa a un transformador se muestra en la figura 2.4

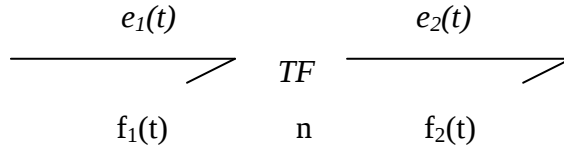


Fig. 2.4 Bond Graph de un transformador

Por otro lado está el girador (GY), que a diferencia del transformador el cual establece la relación flujo-flujo y esfuerzo-esfuerzo, este establece la relación entre el flujo y el esfuerzo o viceversa, pero que al igual que el transformador mantiene la potencia en cada uno de los puertos. La relación de las variables generalizadas para el girador se muestran en las siguientes ecuaciones, así como también el modelo en Bond Graph de éste sistema en la figura 2.5.

$$e_1(t) = rf_2(t) \quad (2.12)$$

$$f_1(t) = \frac{1}{r} e_2(t) \quad (2.13)$$

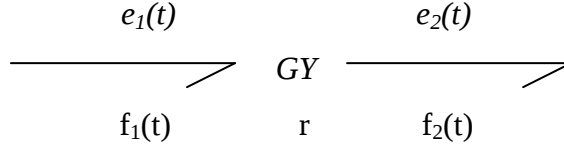


Fig. 2.5 Bond Graph de un girador.

2.2.3 Puertos-3 o uniones

En Bond Graph se tienen elementos de uniones que sirven para interconectar otros componentes dentro de un subsistema, éstas uniones son 0 y 1; la unión 0 se utiliza cuando los componentes que se van a conectar se encuentran en paralelo y su relación constitutiva para n bonds se muestra a continuación.

$$e_1(t) = e_2(t) = \dots = e_n(t) \quad (2.14)$$

$$f_1(t) + f_2(t) + \dots + f_n(t) = 0 \quad (2.15)$$

De manera contraria, la unión 1 se utiliza para cuando los elementos a conectar se encuentran en serie, para este tipo de uniones se tienen las siguientes expresiones.

$$f_1(t) = f_2(t) = \dots = f_n(t) \quad (2.16)$$

$$e_1(t) + e_2(t) + \dots + e_n(t) = 0 \quad (2.17)$$

2.2.4 Causalidad

Por último, un concepto muy importante en el modelado de sistemas en Bond Graph y que es necesario definirlo es la causalidad, el cual organiza las leyes constitutivas de los componentes en conjuntos de ecuaciones diferenciales. Las relaciones de causa-efecto para esfuerzos y flujos son representadas en direcciones opuestas; en cada puerto ambas variables de esfuerzo y flujo existen, si una de las variables de esfuerzo o de flujo es una entrada, la otra será la salida. Tanto el esfuerzo como el flujo, siempre están en direcciones opuestas, por lo que el trazo causal es representado por una pequeña línea perpendicular al

inicio o al final del bond, este trazo causal indica la dirección de la señal del esfuerzo, lo cual se muestra en la figura 2.6.

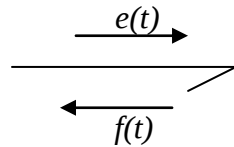


Fig. 2.6 Trazo causal con las señales de esfuerzo y flujo.

2.3 Modelado de un sistema hidráulico

Para poder modelar un sistema que implique el flujo de líquidos, primeramente es necesario considerar un factor importante, que es el “Número de Reynolds”. Éste número establece que si el valor se encuentra entre 3000 a 4000, el flujo es turbulento, es decir, inestable; en el caso de que el número de Reynolds sea menor a 2000, el flujo se considera como laminar, el cual tiene un flujo estable en las corrientes y sin turbulencia.¹

El hecho de que un sistema hidráulico tenga un flujo turbulento o laminar, implica que al momento de modelar el sistema en forma matemática, se obtengan ecuaciones diferenciales no lineales o lineales, respectivamente.

Una vez definido los tipos de flujo existentes, así como el número que los condiciona, en la figura 2.7 se presenta el modelo del sistema hidráulico así como las ecuaciones que rigen al sistema, considerando los dos tipos de flujo, de igual forma se precisan las variables involucradas en éste tipo de sistemas.

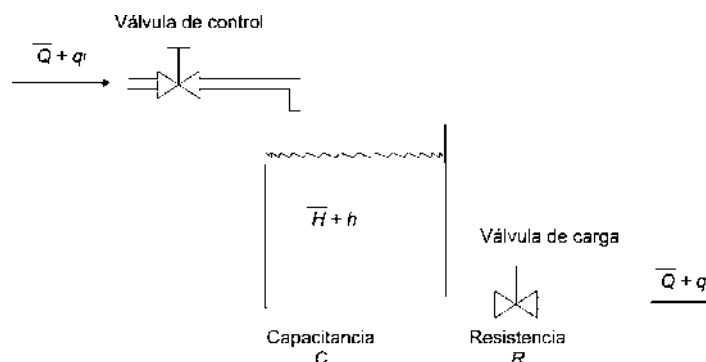


Fig. 2.7 Modelo del sistema hidráulico

¹ Ingeniería de Control Moderna, “Katsuhiko Ogata”

A partir del modelo comencemos a definir las variables que se establecen en él.

Resistencia (R). Es el cambio en la diferencia de nivel necesaria para producir un cambio de una unidad en la velocidad del flujo.

$$R = \frac{\text{cambio en la diferencia de nivel, } m}{\text{cambio en la velocidad de flujo, } m^3 / \text{seg}} \quad (2.18)$$

Debido a que se considera un flujo laminar, la relación entre la velocidad del flujo en estado estable y la altura en estado estable en el nivel de la restricción se obtiene de la siguiente forma:

$$Q = KH \quad (2.19)$$

En donde:

Q es la velocidad del flujo del líquido en estado estable (m^3/seg)

K es el coeficiente (m^2/seg)

H es la altura en estado estable (m)

Por lo tanto, para el flujo laminar, la resistencia R_1 se obtiene como:

$$R_1 = \frac{dH}{dQ} = \frac{H}{Q} \quad (2.20)$$

Ahora si consideramos un flujo turbulento a través de la restricción, la velocidad del flujo en estado estable se obtiene mediante:

$$Q = K\sqrt{H} \quad (2.21)$$

En donde:

Q es la velocidad del flujo del líquido en estado estable (m^3/seg)

K es el coeficiente (m^2/seg)

H es la altura en estado estable (m)

La resistencia R_t para el flujo turbulento se obtiene a partir de:

$$R_t = \frac{dH}{dQ} \quad (2.22)$$

Debido a que de la ecuación (2.21) obtenemos:

$$dQ = \frac{K}{2\sqrt{H}} dH \quad (2.23)$$

Tenemos que:

$$\frac{dH}{dQ} = \frac{2\sqrt{H}}{K} = \frac{2\sqrt{H}\sqrt{H}}{Q} = \frac{2H}{Q} \quad (2.24)$$

Por lo tanto:

$$R_t = \frac{2H}{Q} \quad (2.25)$$

Otra de las variables que hace falta definir y que es importante, es la capacitancia C , la cual está asignada al tanque de almacenamiento de agua y la cual está definida como el cambio necesario en la cantidad de líquido almacenado, para producir un cambio de una unidad en la altura.

$$C = \frac{\text{cambio en el líquido almacenado (m}^3\text{)}}{\text{cambio en la altura (m)}} \quad (2.26)$$

Es importante señalar que la capacitancia del tanque es igual a su área transversal, si esta es constante, la capacitancia será la misma para cualquier altura.

Para finalizar cabe mencionar dos cosas, la primera que la resistencia R_t para un flujo turbulento depende tanto del flujo como de la altura, sin embargo, el valor de R_t se considera constante si los cambios en la altura y en el flujo son pequeños; segundo, el coeficiente K utilizado en las ecuaciones anteriores, en ocasiones se desconoce el valor, por lo que éste se determina mediante una gráfica de la curva de la altura contra el flujo, basada en datos experimentales, de la cual se obtiene la pendiente de la curva en la condición de operación.

2.4 Observadores de estado

Existen algunos métodos para el diseño de la ubicación de polos, los cuales utilizan la realimentación de todas las variables de estado, con el fin de formar el vector de control deseado, esto requiere que todas las variables de estado estén disponibles para la medición directa. Es importante señalar que debemos evitar diferenciar una variable de estado para generar otra. En ocasiones en muchos casos prácticos, sólo son medibles unas cuantas variables de estado de un sistema dado, mientras que las demás no lo son. Un caso puede ser cuando sólo las variables de salida son medibles, por lo que es necesario estimar aquellas variables de estado que no puedan medirse directamente, ésta estimación suele llamarse *observación*. En un sistema práctico es necesario observar o estimar las variables de estado no medibles a partir de las variables de salida y las de control.

Antes de continuar, es necesario definir el concepto de *observabilidad*, ya que es importante porque, en la práctica, la dificultad que se encuentra con el control mediante la realimentación del estado es que algunas de las variables de estado no son accesibles para una medición directa, por lo que se hace necesario estimar las variables de estado no medibles para construir las señales de control. Para definir de manera más adecuada éste concepto, se considera el siguiente sistema sin excitación descrito mediante las siguientes ecuaciones.

$$\dot{x} = Ax \quad (2.27)$$

$$y = Cx \quad (2.28)$$

En donde x es el vector de estado (vector de dimensión n)
 y es el vector de salida (vector de dimensión m)
 A es la matriz de $n \times n$
 C es la matriz de $m \times n$

Se establece que el sistema es completamente observable si el estado $x(t_0)$ se determina a partir de la observación $y(t)$ durante un intervalo de tiempo finito, $t_0 \leq t \leq t_1$. Por tanto, el sistema es completamente observable si todas las transiciones del estado afectan eventualmente a todos los elementos del vector de salida. El concepto de

observabilidad es útil al resolver el problema de reconstruir variables de estado no medibles a partir de variables que sí lo son en el tiempo mínimo posible. Éste sistema se considera como lineal, por lo que se supone $t_0=0$.

Existen métodos para estimar las variables de estado que no se miden sin un proceso de diferenciación. Un dispositivo o programa de computadora que estima u observa las variables de estado se llama *observador de estado* o simplemente *observador*. Un *observador de estados*, también conocido como *estimador de estados*, es un subsistema del sistema de control que lleva a cabo una estimación de las variables de estado, a partir de las mediciones de las variables de salida y control. Si el observador de estado capta todas las variables de estado del sistema, sin importar si algunas están disponibles para una medición directa, se denomina *observador de estado de orden completo*.

Hay ocasiones en las que un observador tal no es necesario, en las que sólo se requiere de la observación de las variables de estado que no se miden, pero no de aquellas que también se miden directamente. Por ejemplo, dado que las variables de salida son observables y se relacionan en forma lineal con las variables de estado, no necesitamos observar todas las variables de estado, sino sólo las $n - m$ variables de estado en las que n es la dimensión del vector de estado y m es la dimensión del vector de salida.

Un observador que estima menos de n variables de estado, en donde n es la dimensión del vector de estado, se denomina *observador de estado de orden reducido* o, simplemente, *observador de orden reducido*. Si el observador de estado de orden reducido tiene el orden mínimo posible, se denomina *observador de estado de orden mínimo*, u *observador de orden mínimo*.

En los observadores de estado, se utiliza la notación $\tilde{x}$ para designar el vector de estado observado. En muchos casos prácticos, el vector de estado observado $\tilde{x}$ se usa en la realimentación del estado para generar el vector de control deseado. A continuación se considera un sistema definido mediante

$$\begin{aligned}\dot{x} &= Ax + Bu \\ y &= Cx\end{aligned}$$

En este caso el estado x se aproximará mediante el estado $\tilde{x}$ del modelo dinámico

$$\dot{\tilde{x}} = A\tilde{x} + Bu + K_e(y - C\tilde{x}) \quad (2.29)$$

Este modelo representa al observador de estado, el cual tiene y y u como entradas y $\tilde{x}$ como salida. El último término del segundo miembro de ésta ecuación modelo, es un término de corrección que contiene la diferencia entre la salida y medida y la salida $C\tilde{x}$ estimada. La matriz K_e funciona como una matriz de ponderación. El término de corrección vigila el estado $\tilde{x}$. Ante la presencia de una discrepancia entre las matrices A y B usadas en este modelo y las del sistema real, la adición del término de corrección ayuda a reducir los efectos producidos por la diferencia entre el modelo dinámico y el sistema real.

Otro tipo de observadores son los de orden mínimo, éstos sistemas se utilizan cuando las variables de estado se miden con precisión, tales variables no necesitan estimarse. Para estos observadores se establece el vector de estado x , este es un vector de dimensión n y el vector de salida y es un vector de dimensión m medible. Dado que las m variables de salida son combinaciones lineales de las variables de estado, no necesitan estimarse n variables de estado, sino sólo $n - m$ variables de estado. Así, el observador de orden reducido se vuelve un observador $(n - m)$ -ésimo orden. Tal observador $(n - m)$ -ésimo orden es el observador de orden mínimo.

Es importante considerar que, si la medición de las variables de salida implica ruido significativo y es relativamente imprecisa, el uso del observador de orden completo puede proveer un mejor desempeño del sistema.

2.5 Diagnóstico de fallas mediante residuos

El concepto de diagnóstico de fallas se refiere tanto a la detección como a la localización de una falla, es decir, además de poder determinar si una falla está presente en el sistema, también se requiere identificar el punto o el componente, el cual está ocasionando la inestabilidad, esto último es indispensable en la mayor parte de los casos para poder determinar una acción correctiva. La tarea de diagnóstico puede realizarse en

dos pasos principales los cuales son la generación de residuos, así como la evaluación de residuos.

La generación de residuos consiste en la obtención de señales que contienen únicamente información sobre las fallas. Estas señales son llamadas residuos; en el caso ideal de que no existan fallas, los residuos son cero y si difieren de éste valor quiere decir que existe la presencia de una o varias fallas. Para la generación de residuos existen distintos procedimientos basados en redundancia analítica, los cuales se pueden dividir en dos grupos, el primero está basado en el modelo matemático y el segundo se fundamenta en un modelo no obtenido a partir de las leyes de la física, sino a partir de procedimientos comúnmente utilizados en inteligencia artificial.

En cada uno de estos grupos existen tres métodos que destacan, por un lado, en los procedimientos basados en el modelo analítico se tienen los filtros detectores, el espacio de paridad y las técnicas de estimación paramétrica. Por otro lado se encuentran los métodos que utilizan redes neuronales, lógica difusa y otras técnicas de inteligencia artificial.

Como se puede observar, existen diversas formas de generar los residuos, más sin embargo, para la presente investigación, es necesario definir de manera particular el espacio de paridad. Éste método consiste en formar ecuaciones a partir del modelo del sistema, las cuales tienen que cumplirse si el funcionamiento nominal del sistema no se ve alterado por fallas.

Existen tres versiones del espacio de paridad, la primera está basada en una representación interna del sistema, en lo que se conoce como variables de estado. Las ecuaciones de paridad son obtenidas fácilmente después de desarrollar la salida del sistema en el tiempo y de ésta manera formar una ventana de tiempo en la que la variable de salida es conocida, ésta es una versión basada en la misma idea pero utilizando la representación externa. La tercera variante considera sistemas continuos y retrasos en las mediciones de la salida del sistema. La implementación de éste algoritmo requiere del conocimiento matemático del sistema, así como el de las mediciones de salida y entrada. De manera general, todos los anteriores casos pueden ser representados de manera gráfica a través de la figura 2.8.

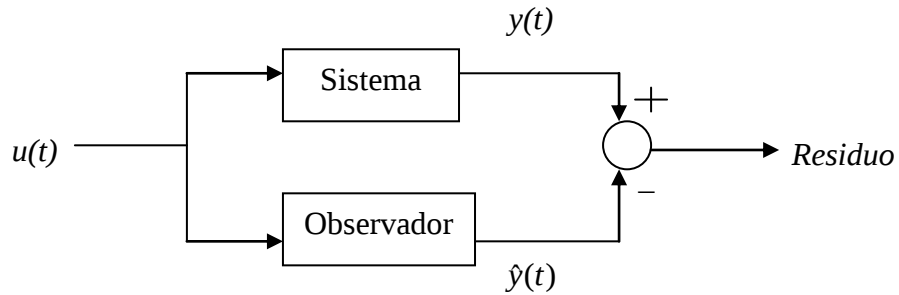


Fig. 2.8 Diagrama general del espacio de paridad.

El segundo paso para el diagnóstico de fallas, se pretende la extracción de información contenida en los residuos, la evaluación proporciona información sobre el tiempo en el que una falla ocurrió y sobre el elemento o punto del sistema en el cual ésta falla está actuando. De igual forma la evaluación de residuos requiere determinar si los residuos sobrepasan algún valor de umbral establecido, éste valor es necesario que se conozca, con la finalidad de poder evitar errores en los resultados, debidos a condiciones iniciales, pequeñas perturbaciones o dinámicas no modeladas. Generalmente la evaluación de estos residuos se realiza obteniendo una medida del residuo.

Capítulo 3

Modelado de un sistema hidráulico en bond graph

3.1 Introducción

En este capítulo se define el modelo del sistema hidráulico de dos tanques en el dominio físico con la ayuda del método de bond graph; para llevar esto a cabo es necesario definir tres etapas importantes. La primera etapa consiste en definir la construcción del sistema hidráulico, es decir, como se encuentra conectado, de igual forma es necesario especificar las variables físicas que interactúan en el sistema, a continuación tanto el sistema así como también las variables que intervienen en él serán representadas en el dominio de bond graph utilizando una asignación de causalidad integral (BGI) en los elementos de almacenamiento de energía y por último, con la ayuda del modelo en bond graph se establece el modelo matemático del mismo a través de la definición de los vectores clave del modelo hidráulico además, se establecen las variables de estado correspondientes al modelo físico.

3.2 Sistema hidráulico de dos tanques

En el modelo físico que se presenta a continuación en la figura 3.1 se tiene dos tanques, el primero de ellos es abastecido por una fuente de líquido externa, a la salida de cada uno de estos tanques se tiene dos válvulas representadas por $R1$ y $R2$, las cuales representan las pérdidas existentes en cada tramo de tubería, en serie con estos parámetros se encuentran las inductancias hidráulicas representadas por $I1$ e $I2$.

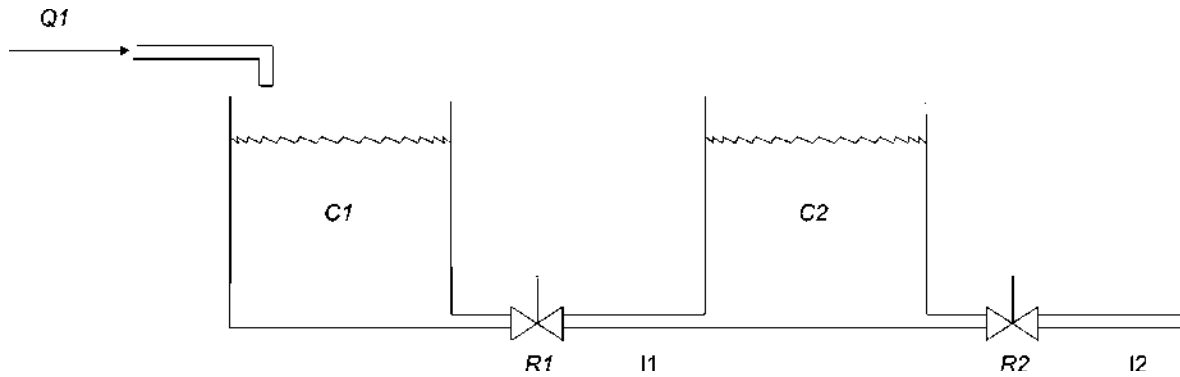


Fig. 3.1 Sistema físico de dos tanques

A continuación en la tabla 3.1 se definen cada uno de los elementos que integran el esquema anteriormente visto para tener un mayor entendimiento del mismo, de igual forma en la tabla 3.2 se especifican las variables generalizadas para los sistemas hidráulicos, las cuales son de gran importancia para poder entender de mejor manera el diseño del sistema en bond graph que se verá en el subtema 3.3

Tabla 3.1 Elementos R, C e I.

Elemento	Definición
R	Disipación
C	Almacenamiento de flujo o caudal
I	Almacenamiento de esfuerzo o presión

Tabla 3.2 Variables generalizadas de sistemas hidráulicos.

	Variable	
	Generalizada	Sistema Hidráulico
Esfuerzo	$e(t)$	$Pe(t)$ Presión
Flujo	$f(t)$	$Q(t)$ Caudal
Momento	$p(t)$	$Pp(t)$ Integral de la presión
Desplazamiento	$q(t)$	$V(t)$ Volumen
Potencia	$P(t)=e(t)f(t)$	$Pe(t)Q(t)$

3.3 Bond Graph del sistema hidráulico

El Bond graph del sistema representado en la figura 3.1, se muestra en la figura 3.2 con una asignación de causalidad integral (BGI) en los elementos de almacenamiento de energía (C, I).

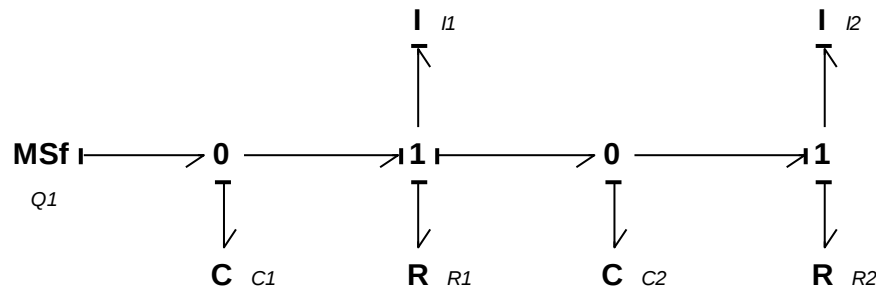


Fig. 3.2 Bond graph del sistema con dos tanques.

En la figura 3.2 se puede observar que la fuente de flujo de agua representada por Q1 se encuentra en paralelo (0) con el primer tanque de almacenamiento de caudal indicado por C1, la salida del primer tanque se encuentra en serie (1) con la válvula R1 y ésta a su vez en serie con un parámetro de almacenamiento de presión indicada por I1. A la salida de la primera tubería se encuentra el segundo tanque C2, el cual se encuentra en paralelo con los parámetros R1 e I1 así como R2 e I2.

3.4 Modelo matemático a partir de su bond graph

Primeramente para definir el modelo matemático de la figura 3.2, es necesario establecer los vectores clave del bond graph, lo cual se realiza sin considerar alguna salida del sistema hidráulico, únicamente se toma en cuenta las variables de estado.

Para entender de mejor manera la formulación de estos vectores, a continuación se describen de forma sencilla los vectores clave. De forma convencional en un bond graph, todos los bonds pueden ser clasificados en *bonds externos*, que conectan a los elementos o puertos R, C, I, MSe y MSf, y en *bonds internos* que conectan a 0,1, TF y GY. En la figura 3.3 se muestra un diagrama a bloques de la *Estructura de Unión* de un Bond Graph.

En la figura 3.3, las variables MSe MSf , L , C y R denotan los campos de fuente, de almacenamiento y de disipación respectivamente, D representa el detector y 0 , 1 , TF y GY son las estructuras de unión.

Los vectores que representan al sistema llamados vectores clave o vectores significativos incluidos en la figura 3.3 se definen a continuación. $u(t) \in R^p$ contiene las variables de potencia o los esfuerzos y flujos impuestos por los elementos de las fuentes en la Estructura de Unión. Los estados $x(t) \in R^n$ están compuestos de variables de energía; $z(t) \in R^n$ son variables de co-energía en causalidad integral, respectivamente $D_{in}(t) \in R^r$ y $D_{out}(t) \in R^r$ son una mezcla de esfuerzos y flujos que muestran los intercambios energéticos entre el campo de disipación y la Estructura Unión.

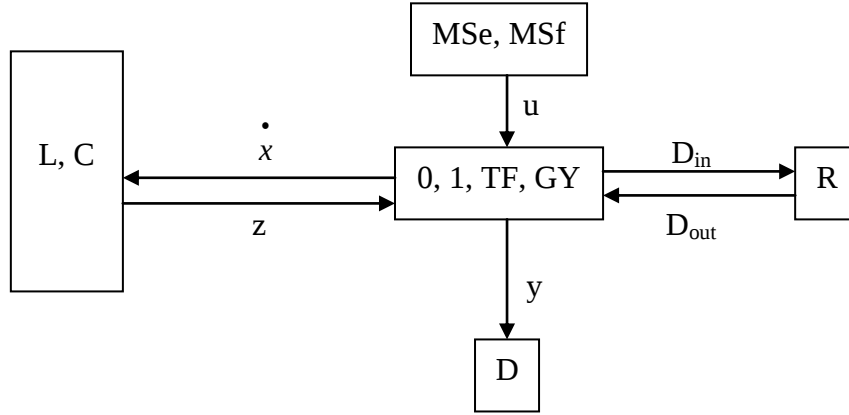


Fig. 3.3 Diagrama de bloques de la Estructura de Unión de un bond graph.

Las relaciones de los campos de almacenamiento y de disipación son:

$$z = Fx \quad (3.1)$$

$$D_{out} = LD_{in} \quad (3.2)$$

Las relaciones de la estructura unión son:

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ D_{in} \\ y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} \\ S_{21} & S_{22} & S_{23} \\ S_{31} & S_{32} & S_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} z \\ D_{out} \\ u \end{bmatrix} \quad (3.3)$$

Los valores de S toman valores dentro del conjunto $(0, \pm 1, \pm m, \pm n)$ donde m y n son los módulos del transformador y girador. S_{11} y S_{22} son matrices antisimétricas y S_{12} es la matriz transpuesta negativa de S_{21} . Las siguientes ecuaciones permitirán la obtención directa del modelo del sistema físico en variables de estado, utilizando la representación de Bond Graph.

$$\dot{x} = A_p x + B_p u \quad (3.4)$$

$$y = C_p x + D_p u \quad (3.5)$$

donde

$$A_p = (S_{11} + S_{12}MS_{21})F \quad (3.6)$$

$$B_p = S_{13} + S_{12}MS_{23} \quad (3.7)$$

$$C_p = (S_{31} + S_{32}MS_{21})F \quad (3.8)$$

$$D_p = S_{33} + S_{32}MS_{23} \quad (3.9)$$

siendo

$$M = (I_n - LS_{22})^{-1}L \quad (3.10)$$

Para establecer los vectores clave es necesario apoyarnos en la figura 3.4, en la cual se enumeran cada uno de los bond de energía con la finalidad de identificar a que bond de energía pertenecen las variables de flujo, esfuerzo, momento y volumen utilizadas en los vectores clave.

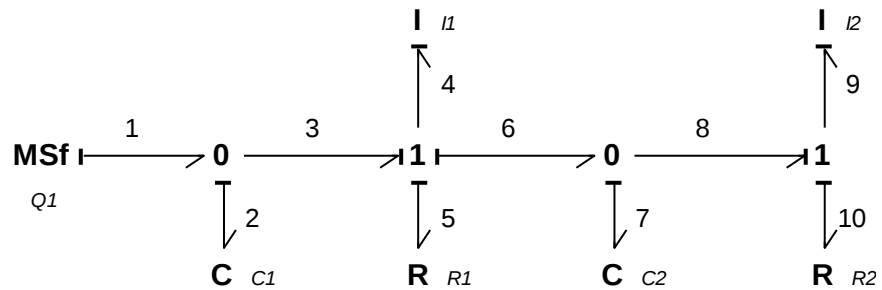


Fig. 3.4 Bond graph del sistema con numeración en cada bond de energía.

Vectores clave

$$x = \begin{bmatrix} q_2 \\ p_4 \\ q_7 \\ p_9 \end{bmatrix}; \quad \dot{x} = \begin{bmatrix} f_2 \\ e_4 \\ f_7 \\ e_9 \end{bmatrix}; \quad z = \begin{bmatrix} e_2 \\ f_4 \\ e_7 \\ f_9 \end{bmatrix} \quad (3.11)$$

$$D_{in} = \begin{bmatrix} f_5 \\ f_{10} \end{bmatrix}; \quad D_{out} = \begin{bmatrix} e_5 \\ e_{10} \end{bmatrix}; \quad u = f_1 \quad (3.12)$$

A continuación se definen las relaciones constitutivas de los campos de almacenamiento y disipación; cabe señalar que una relación constitutiva es una ley física que describe el comportamiento de un elemento en específico.

$$F = \begin{bmatrix} \frac{1}{C_1} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{I_1} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{C_2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{I_2} \end{bmatrix}; \quad L = \begin{bmatrix} R_1 & 0 \\ 0 & R_2 \end{bmatrix} \quad (3.13)$$

Enseguida se establecen las submatrices de la estructura unión del bond graph,

$$S_{11} = \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (3.14)$$

$$S_{12} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ -1 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & -1 \end{bmatrix} \quad (3.15)$$

$$S_{13} = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3.16)$$

$$S_{21} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.17)$$

$$S_{22} = S_{23} = 0 \quad (3.18)$$

Sustituyendo desde la ecuación (3.13) hasta la ecuación (3.18) en las ecuaciones (3.6), (3.7) y (3.8) las matrices del sistema en el espacio de estados quedan de la siguiente manera.

$$A_p = \begin{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ -1 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R_1 & 0 \\ 0 & R_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{1}{C_1} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{I_1} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{C_2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{I_2} \end{bmatrix}$$

Por lo tanto

$$A_p = \begin{bmatrix} 0 & -\frac{1}{I_1} & 0 & 0 \\ -\frac{1}{C_1} & -\frac{R_1}{I_1} & -\frac{1}{C_2} & 0 \\ 0 & \frac{1}{I_1} & 0 & -\frac{1}{I_2} \\ 0 & 0 & \frac{1}{C_2} & -\frac{R_2}{I_2} \end{bmatrix} \quad (3.19)$$

$$B_p = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ -1 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R_1 & 0 \\ 0 & R_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$B_p = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3.20)$$

$$C_p = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{1}{C_1} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{I_1} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{C_2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{I_2} \end{bmatrix}$$

$$C_p = \begin{bmatrix} \frac{1}{C_1} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{I_1} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{C_2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{I_2} \end{bmatrix} \quad (3.21)$$

Una vez obtenido las variables de estado del sistema hidráulico, estas se sustituyen en (3.4) y (3.5) para determinar las ecuaciones de estado.

$$\dot{x} = A_p x + B_p u$$

$$\begin{bmatrix} f_2 \\ e_4 \\ f_7 \\ e_9 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -\frac{1}{I_1} & 0 & 0 \\ -\frac{1}{C_1} & -\frac{R_1}{I_1} & -\frac{1}{C_2} & 0 \\ 0 & \frac{1}{I_1} & 0 & -\frac{1}{I_2} \\ 0 & 0 & \frac{1}{C_2} & -\frac{R_2}{I_2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} q_2 \\ p_4 \\ q_7 \\ p_9 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} f_1 \quad (3.22)$$

$$y = C_p x + D_p u$$

$$\begin{bmatrix} e_2 \\ f_4 \\ e_7 \\ f_9 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{C_1} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{I_1} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{C_2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{I_2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} q_2 \\ p_4 \\ q_7 \\ p_9 \end{bmatrix} \quad (3.23)$$

Una vez que el modelo en bond graph y el modelo matemático del sistema hidráulico han sido obtenidos, el siguiente capítulo describirá el resto de los elementos requeridos para la detección de fallas del sistema.

Capítulo 4

Detección de fallas basado en Modelo-Observador en bond graph

4.1 Introducción

En el capítulo anterior se definió la primera etapa en el proceso para determinar las fallas en el sistema, la cual se refiere al modelado del sistema hidráulico por medio de bond graph para así poder establecer las ecuaciones de estado correspondientes al sistema físico, por lo que corresponde al presente capítulo definir la segunda y más importante etapa que es la detección de fallas en el sistema hidráulico de dos tanques.

La etapa de identificación de fallas se realiza a través de un diagnóstico de residuos, el cual realiza una comparación entre el sistema hidráulico y el observador, recordando que éste último se encuentra integrado por una copia idéntica del sistema a observar. Para realizar el observador en bond graph y lograr comparar al sistema y a su observador es necesario utilizar los componentes definidos en la sección 2.1 llamados componentes de puerto-2, estos son el girador (GY) y el transformador (TF), además de éstos componentes, es necesario utilizar fuentes de flujo así como de esfuerzo las cuales servirán como sensores de caudal así como de presión respectivamente. Para poder representar de mejor manera un sistema con su respectivo observador, en la figura 4.1 se muestra un ejemplo.

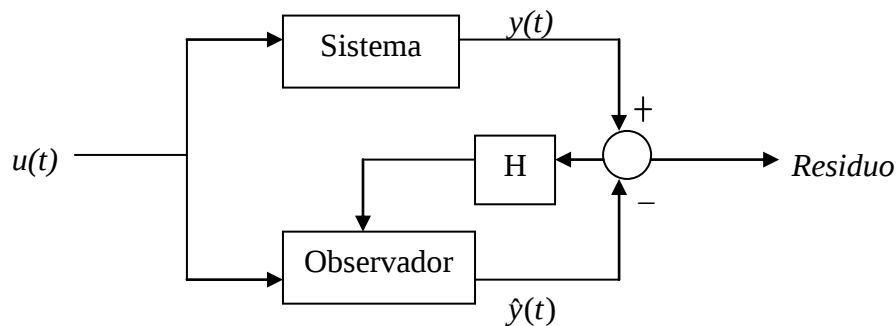


Fig. 4.1 Esquema de un sistema con su observador.

La ecuación de estado estimada del sistema está definida por,

$$\hat{\dot{x}} = A_p \hat{x} + B_p u + H(y - \hat{y}) \quad (4.1)$$

la salida del observador es

$$\hat{y} = C_p \hat{x} + D_p u \quad (4.2)$$

y el o los residuos se encuentran determinados por

$$r = C_p (\hat{x} - x) \quad (4.3)$$

Las ganancias del sistema definidas por la variable H, la cual se refiere al valor que deben tomar los componentes TF y GY, los valores deben lograr que el sistema sea estable, es decir, que los polos del sistema tengan parte real negativa y sean complejos conjugados.

4.2 Detección de fallas con sensores de caudal

Para esta primera parte se utilizan sensores de caudal, por medio de los cuales se diagnostican las fallas dentro del sistema hidráulico. El tipo de fallas que se introducen al modelo hidráulico en bond graph son de dos tipos, la primera es una señal de pulso, la segunda es una señal de escalón. Cada una de estas señales se aplican primeramente por separado y a continuación ambas se introducen al mismo tiempo, este procedimiento es aplicado para ambos tanques de tal forma que podamos observar a detalle el comportamiento de cada uno de los tanques respecto a cada una de las falla de manera separada y enseguida como un conjunto.

A continuación en la figura 4.2 se muestra el sistema hidráulico de dos tanques modelado en bond graph con su respectivo observador sin intervención de fallas, con la finalidad de mostrar gráficamente el diseño del mismo, pero además, poder identificar en las subsecuentes figuras donde se encuentra cada una de las fallas.

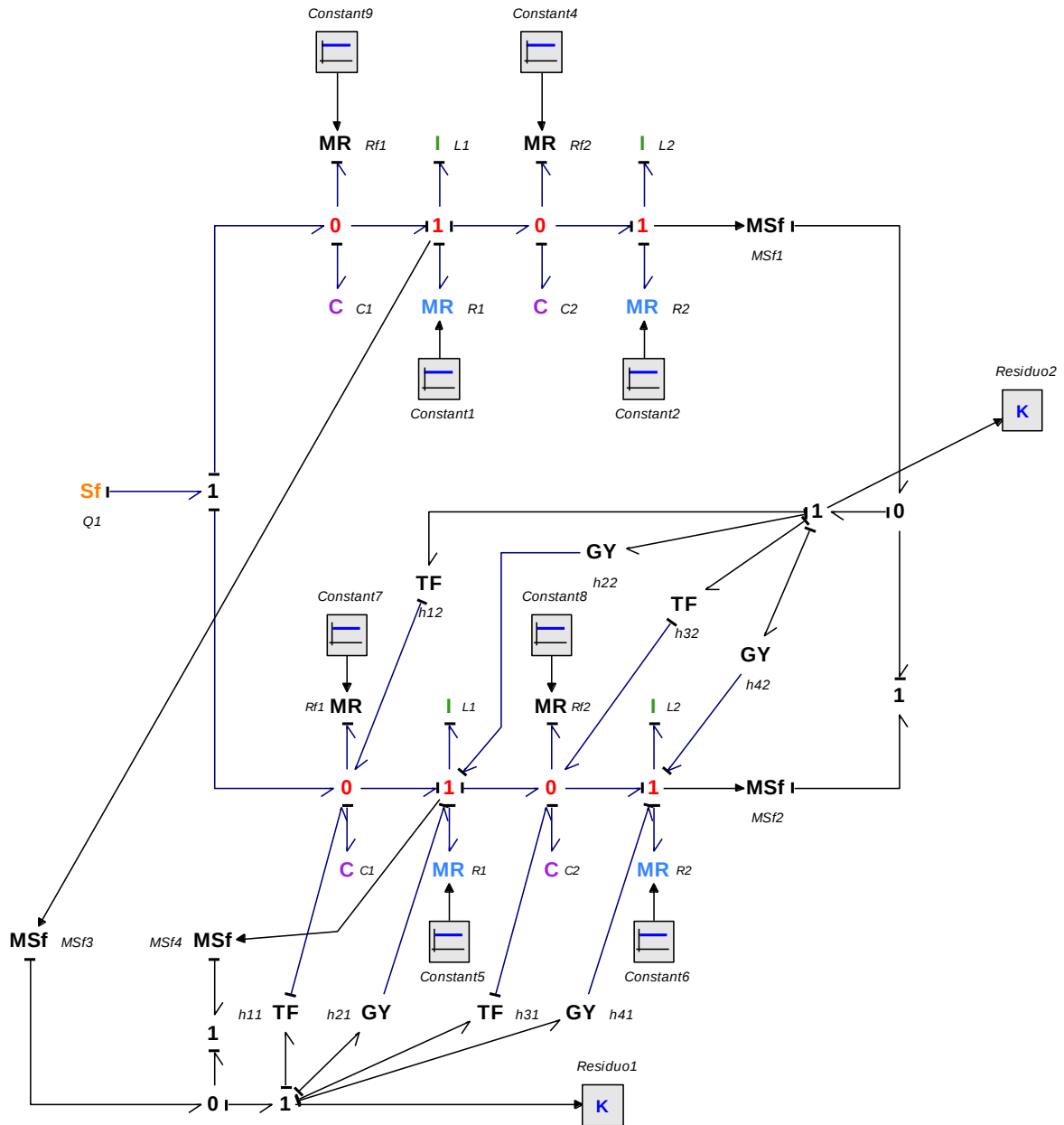


Fig. 4.2 Sistema hidráulico y observador.

Para entender de mejor forma la figura 4.2 a continuación se muestra la tabla 4.1, en la cual se definen cada uno de los parámetros así como los valores que les corresponden.

Tabla 4.1 Parámetros del sistema completo

Elemento	Definición	Valor
Rf1	Disipación	100
Rf2	Disipación	100
R1	Disipación	1
R2	Disipación	1.5
L1	Almacenamiento de presión	0.1
L2	Almacenamiento de presión	0.8
C1	Almacenamiento de caudal	0.25
C2	Almacenamiento de caudal	0.05
Q1	Fuente de flujo de agua	10
MSf3	Sensor de presión para el tanque 1	
MSf1	Sensor de presión para el tanque 2	
MSf4	Sensor de presión para el tanque 1 del observador	
MSf2	Sensor de presión para el tanque 2 del observador	
Residuo 1	Residuo del tanque 1	
Residuo 2	Residuo del tanque 2	
TF (h11)	Ganancia	13
TF (h12)	Ganancia	6
TF (h31)	Ganancia	2.3
TF (h32)	Ganancia	0.5
GY (h21)	Ganancia	0.6
GY (h22)	Ganancia	4.5
GY (h41)	Ganancia	1.3
GY (h42)	Ganancia	3.5

El valor de cada una de las ganancias de los transformadores (TF) y giradores (GY) se definen de tal manera que se obtienen polos que provocan que el sistema sea estable. A continuación se muestra el procedimiento a seguir para determinar el valor de los polos del sistema hidráulico.

Primeramente se parte de definir un valor para cada una de las ganancias del sistema, una vez hecho este paso se desarrolla el determinante de la siguiente ecuación.

$$\det(sI - A_p + HC_p) = 0 \quad (4.4)$$

$$sI = \begin{bmatrix} s & 0 & 0 & 0 \\ 0 & s & 0 & 0 \\ 0 & 0 & s & 0 \\ 0 & 0 & 0 & s \end{bmatrix}; A_p = \begin{bmatrix} -0.01 & -1 & 0 & 0 \\ 1 & -1 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & -0.01 & -1 \\ 0 & 0 & 1 & -1.5 \end{bmatrix}$$

$$H = \begin{bmatrix} H_{11} & H_{12} \\ H_{21} & H_{22} \\ H_{31} & H_{32} \\ H_{41} & H_{42} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 13 & 6 \\ 0.6 & 4.5 \\ 2.3 & 0.5 \\ 1.3 & 3.5 \end{bmatrix}; C_p = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Por lo que aplicando la ecuación (4.4) a las anteriores matrices se obtiene la siguiente matriz resultante, para que a su vez se aplique el determinante y poder obtener el polinomio del sistema hidráulico.

$$\det \left(\begin{bmatrix} s+0.01 & 14 & 0 & 6 \\ -1 & s+1.6 & 1 & 4.5 \\ 0 & 1.3 & s+0.01 & 1.5 \\ 0 & 1.3 & -1 & s+5 \end{bmatrix} \right) \quad (4.5)$$

$$s^4 + 6.62s^3 + 16.4821s^2 + 54.38566s + 13.742215 = 0 \quad (4.6)$$

Una vez obtenido el polinomio es posible determinar el valor de los polos del sistema, los cuales son:

$$P_1 = -5.3496$$

$$P_2 = -0.4987 + 3.0274i$$

$$P_3 = -0.4987 - 3.0274i$$

$$P_4 = -0.2729$$

De ésta forma observamos que el valor de los polos obtenidos brinda una respuesta estable al modelo hidráulico.

En la figura 4.3 se muestra el diagrama en bond graph al cual se le agrega una señal de pulso descrita como *Falla 1* con una amplitud de 90, la cual actúa como tal en el primero de los dos tanques; esta falla comienza a los 10 segundos de haber puesto en marcha al sistema y termina 2 segundos después.

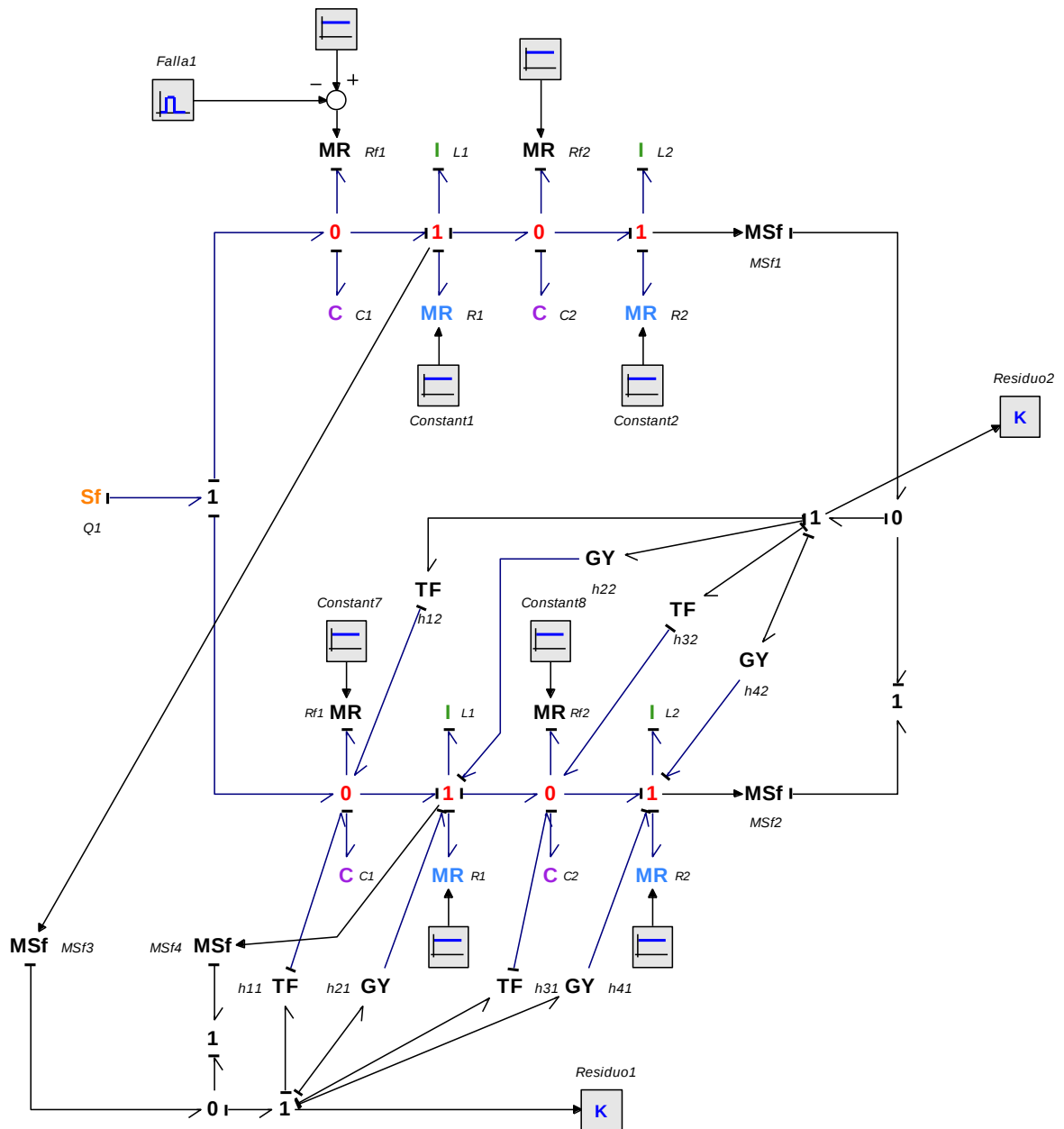


Fig. 4.3 Sistema hidráulico en bond graph con una falla de pulso.

En la figura 4.4 se muestran las respuestas de los residuos en ambos tanques, como se puede observar se tiene un residuo tanto para el *Tanque 1*, como para el *Tanque 2*, lo que quiere decir que ambos sensores de caudal detectan que existe una falla, más sin embargo donde se está agregando la falla que es en el *Tanque 1* se tiene como respuesta un valor negativo cercano a -0.5 el cual va en aumento hasta llegar a cero conforme se elimina la falla y por el contrario la respuesta en el *Tanque 2* es prácticamente del mismo valor pero positiva, la cual de igual forma se va eliminando conforme transcurren los dos segundos de la falla.

La descripción anterior indica que al momento de tener una fuga de líquido en el primer tanque, esta afecta de manera directa al segundo tanque que se encuentra en serie, lo cual es verdadero ya que el *Tanque 2* depende del suministro que reciba por parte del *Tanque 1*.

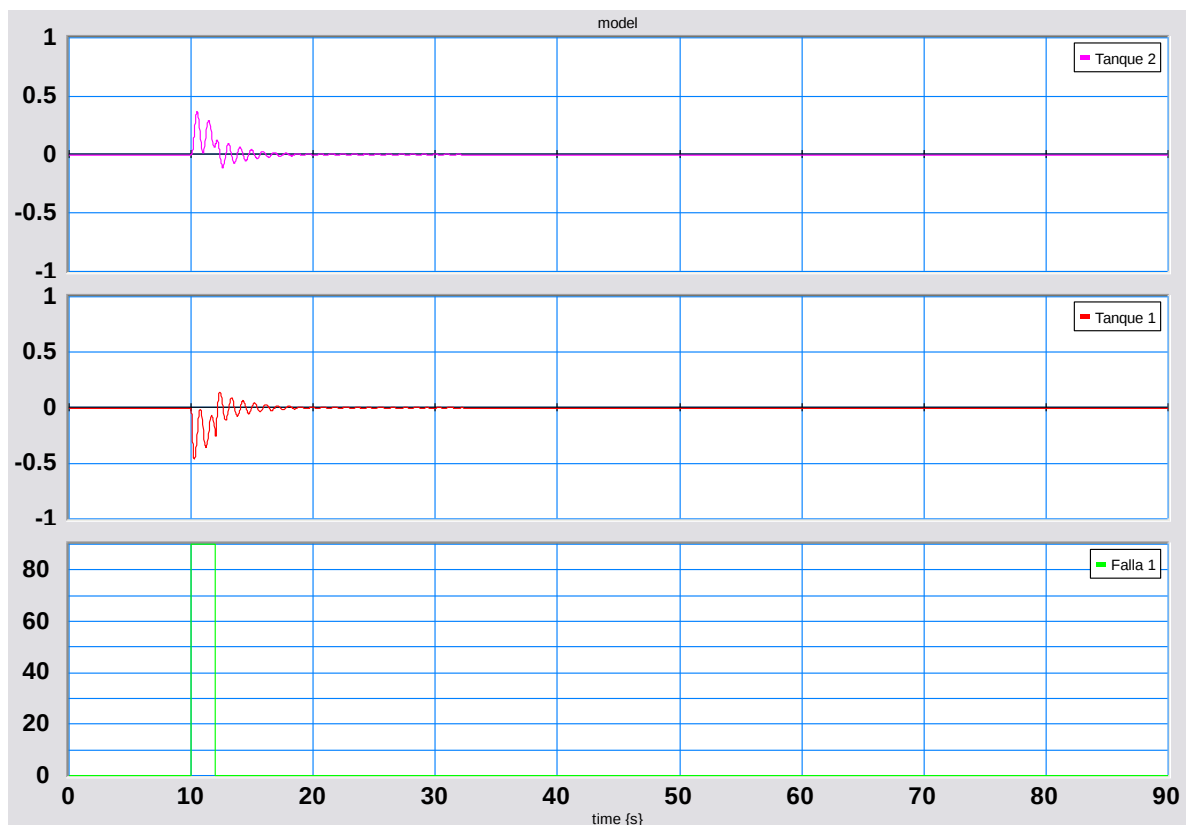


Fig. 4.4 Simulación de la falla de pulso en el Tanque 1 (C1).

Ahora en la figura 4.5 se agrega una falla de escalón denominada *Falla 2* en el primer tanque, esta falla tiene un valor de 90 al igual que la de pulso e inicia a los 20 segundos de haber arrancado el sistema hidráulico, este tipo de señal brinda la posibilidad de conocer el comportamiento de ambos tanques al tener una falla sostenida durante un largo lapso de tiempo.

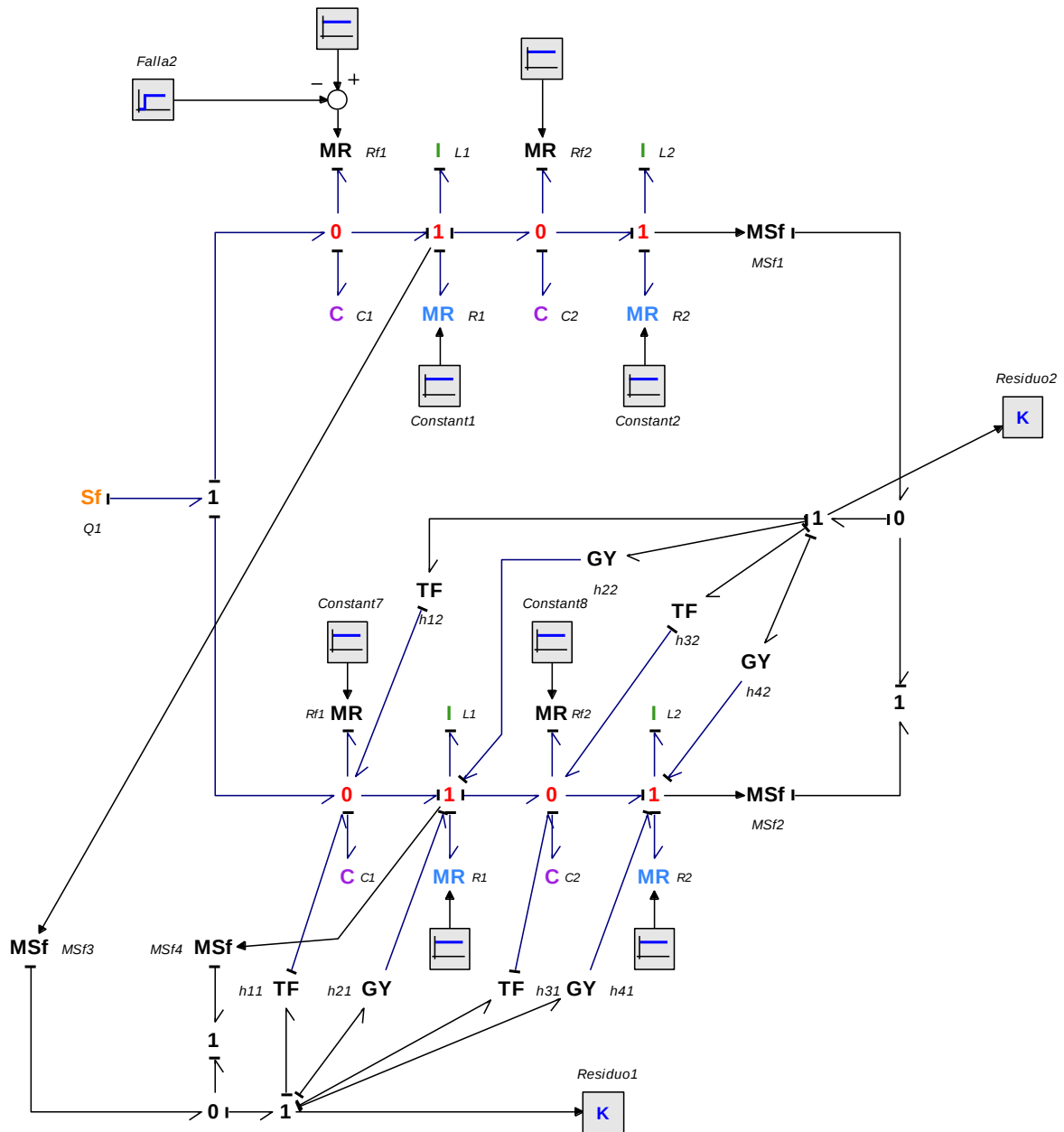


Fig. 4.5 Sistema hidráulico en bond graph con una falla sostenida.

La figura 4.6 ilustra los residuos que se obtienen por parte de cada uno de los tanques ante una falla sostenida, como se puede observar en el *Tanque 1* que es en el cual ocurre la falla se tiene un residuo el cual alcanza un valor máximo de casi -0.5 y el cual a continuación disminuye hasta alcanzar prácticamente un valor de -0.2 en el cual se mantiene durante todo el transcurso de la falla. Si bien en el *Tanque 2* se obtiene de igual forma un residuo, este por el contrario es positivo con un valor de 0.4 en su punto más alto y enseguida disminuye hasta alcanzar un valor de 0.2 durante el tiempo en que permanece la falla en el primer tanque.

Se puede apreciar que el segundo tanque nuevamente vuelve a sufrir de un cambio como consecuencia de la falla existente en el *Tanque 1*, pero es importante realzar que la respuesta del residuo que se obtiene para el tanque en el cual sucede la falla se encuentra por debajo de cero, al igual que sucedió con la señal de pulso.

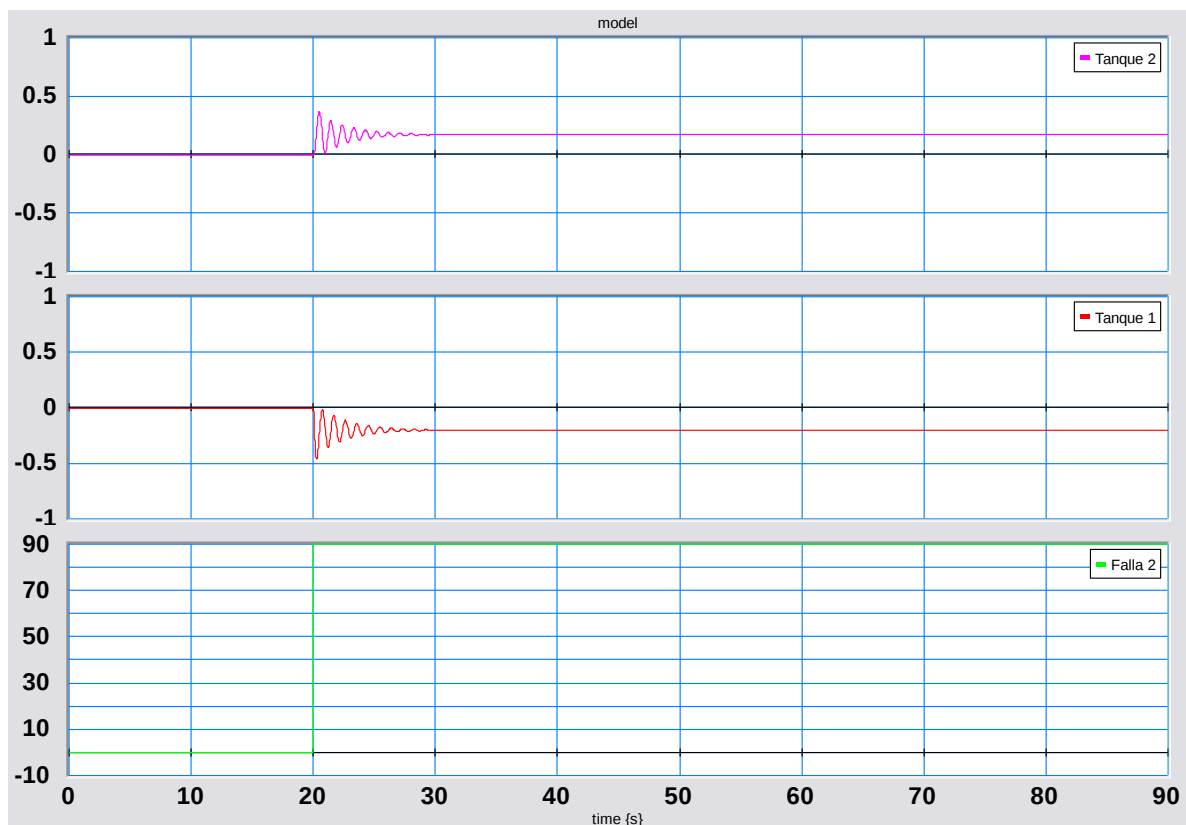


Fig. 4.6 Simulación de la falla de escalón en el Tanque 1 (C1).

A continuación en la figura 4.7 se presenta el mismo sistema hidráulico que se ha mostrado en las figuras anteriores, la diferencia se encuentra en que se simulan los dos tipos de falla en el *Tanque 1* pero en ésta ocasión se aplican las dos fallas en un mismo periodo de funcionamiento del sistema. Ambas fallas tendrán un valor de 90; la *falla 1* iniciará a los 10 segundos de haber iniciado la simulación y terminará 2 segundos después, la *falla 2* a su vez, iniciará 8 segundos después de haberse eliminado la *falla 1*.

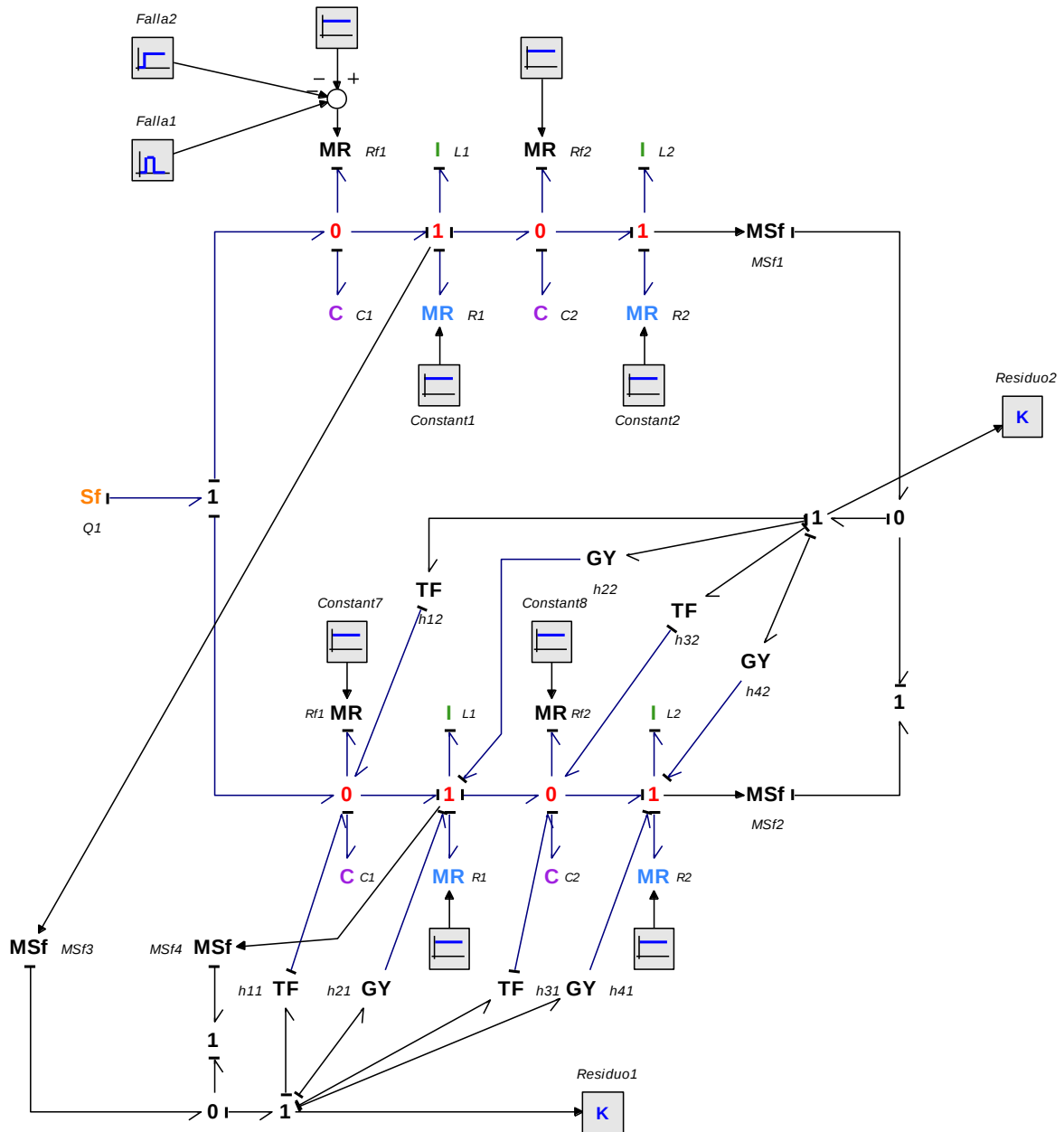


Fig. 4.7 Sistema hidráulico en bond graph con ambos tipos de fallas.

Si bien en esta ocasión se introdujeron al modelo hidráulico ambos tipos de falla en una misma simulación con algunos segundos de defasamiento, la respuesta de los residuos tanto para el *Tanque 1* como para el *Tanque 2* mostradas en la figura 4.8 son idénticas a las ya vistas en la figuras 4.4 y 4.6, donde se puede observar que las fugas de agua que se tienen en el primer tanque afectan al tanque adyacente. La finalidad de introducir estos dos tipos de falla es tratar de simular una fuga de agua la cual dura solamente por algunos segundos y que un tiempo más tarde ésta misma falla vuelve a ocurrir, con la única diferencia de que es una fuga permanente.

Es necesario no perder de vista la constante que se ha presentado en las anteriores simulaciones y que se vuelve a repetir en la figura 4.8, esa constante es que el residuo que se obtiene del tanque al cual se le aplica las fallas se mantiene por debajo del cero, mientras que en el otro tanque se obtiene una respuesta casi idéntica pero con un valor positivo.

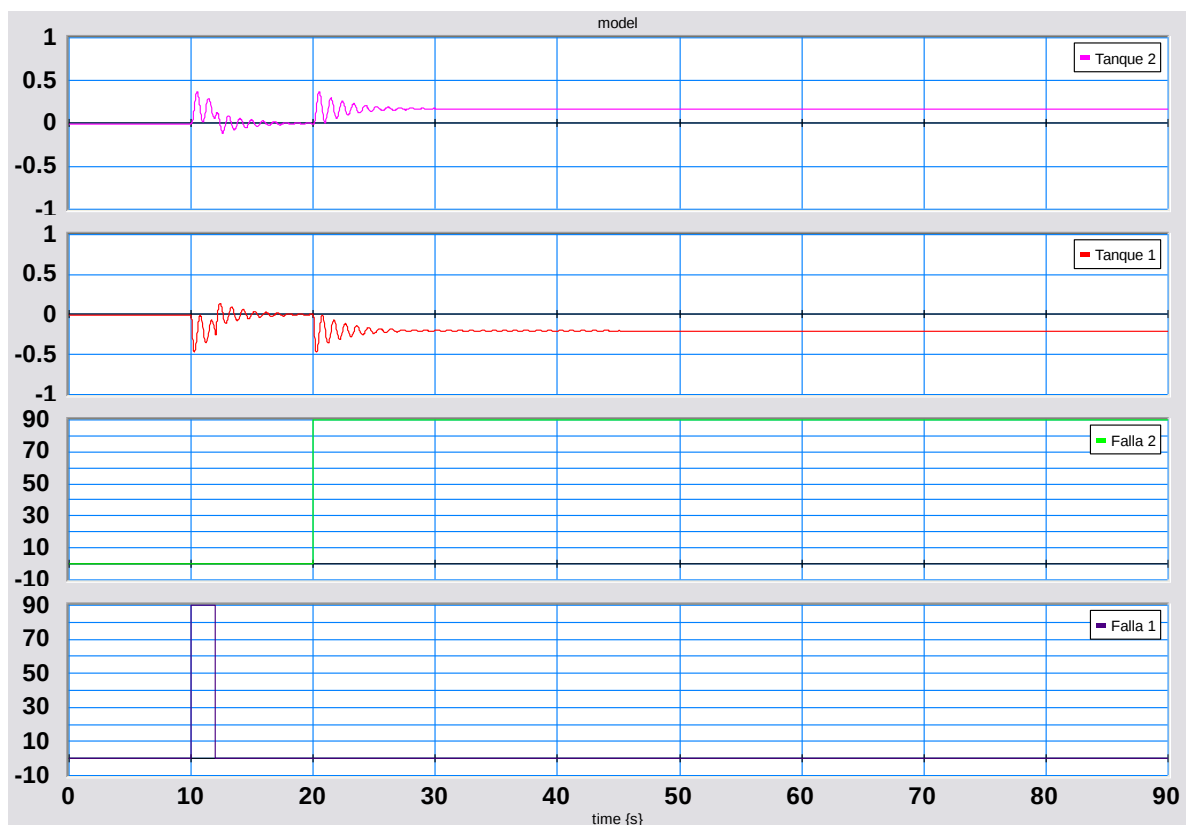


Fig. 4.8 Simulación de ambas fallas aplicadas al Tanque 1 (C1).

De la misma manera en que se introdujeron fallas al sistema específicamente en el *Tanque 1*, a continuación se repite el mismo procedimiento para el *Tanque 2* como se muestra en la figura 4.9, comenzando con la simulación de una falla tipo pulso la cual tiene el mismo valor de 90, comenzando en los 10 segundos y finalizando 2 segundos más tarde.

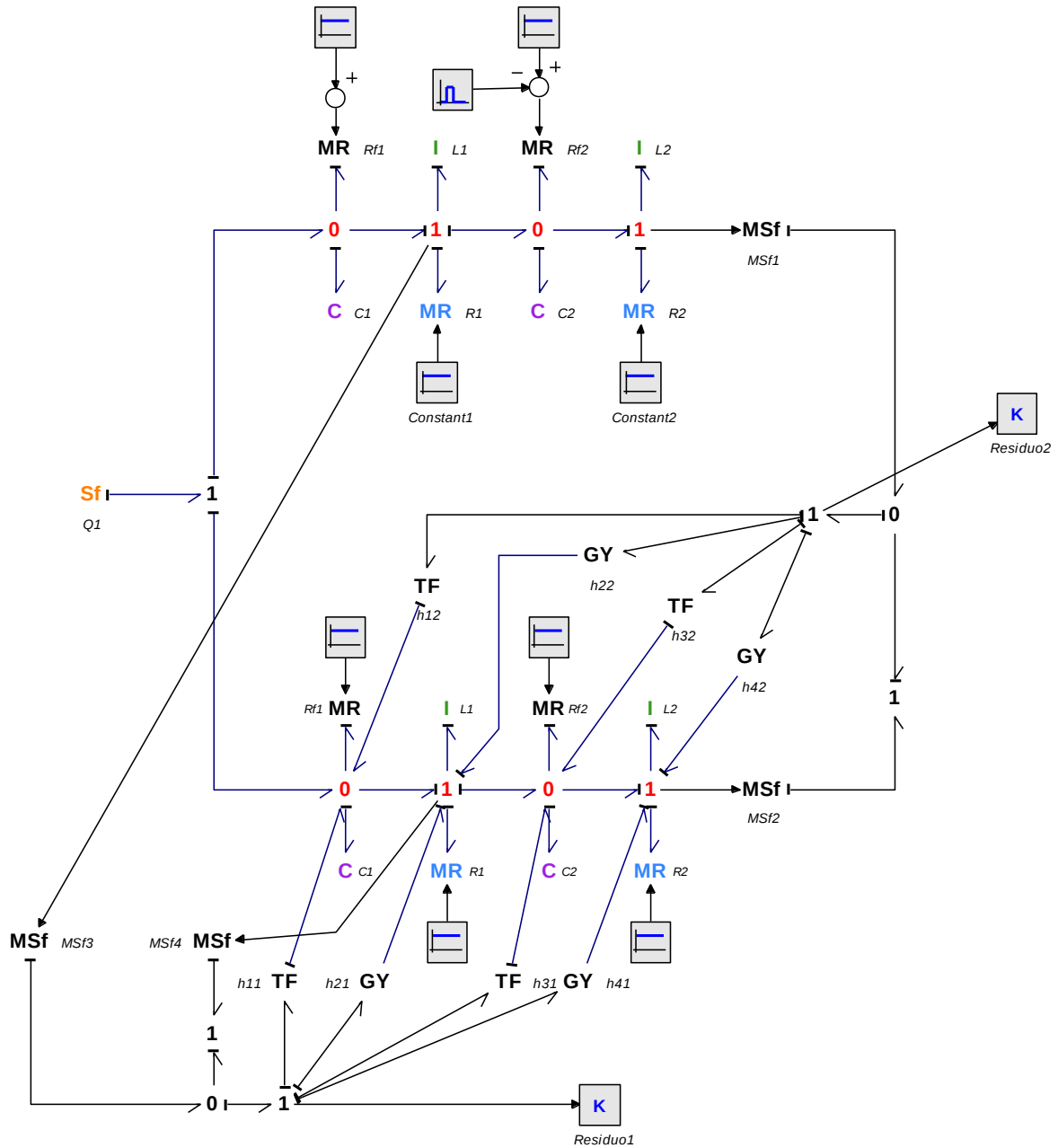


Fig. 4.9 Sistema hidráulico en bond graph con una falla de pulso en el tanque 2 (C2).

De la figura 4.10 se observan los residuos obtenidos tanto para el primero como para el segundo tanque, indicando de esta manera que si existe una fuga de agua en el segundo tanque se verá afectado el primero de ellos.

Si comparamos las respuesta que se obtienen en la figura 4.10 para cada uno de los tanques se puede apreciar que los valores que se alcanzan son muy aproximados entre sí, la diferencia estriba en que el residuo del *Tanque 2* en el cual ocurre la falla es negativo, mientras que en el otro tanque la respuesta es positiva durante el transcurso de la falla.

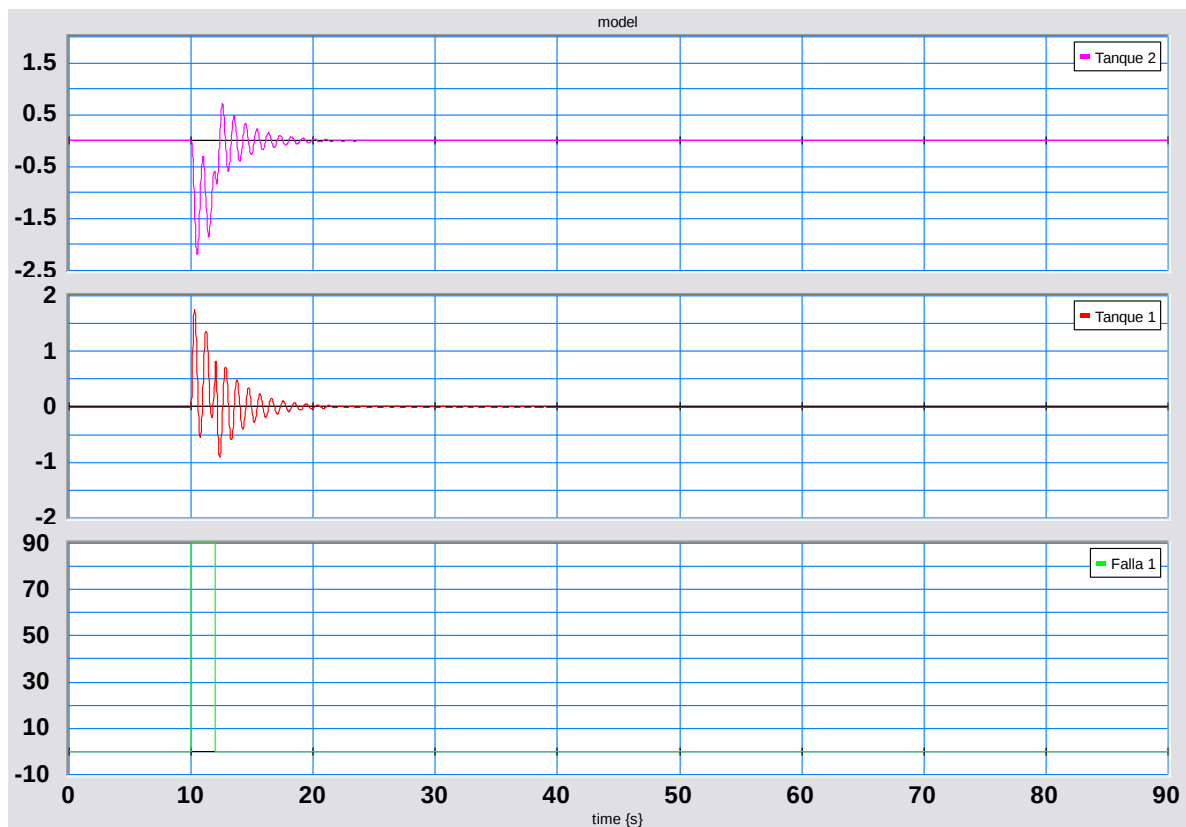


Fig. 4.10 Simulación de la falla tipo pulso en el Tanque 2 (C2).

A continuación en la figura 4.11 se simula una falla tipo escalón, la cual representa una fuga de líquido en el *Tanque 2* por un tiempo indeterminado; la *falla 2* como se ha venido simulando actuará en el segundo tanque a los 20 segundos de que el sistema se encuentre funcionando tomando un valor de 90.

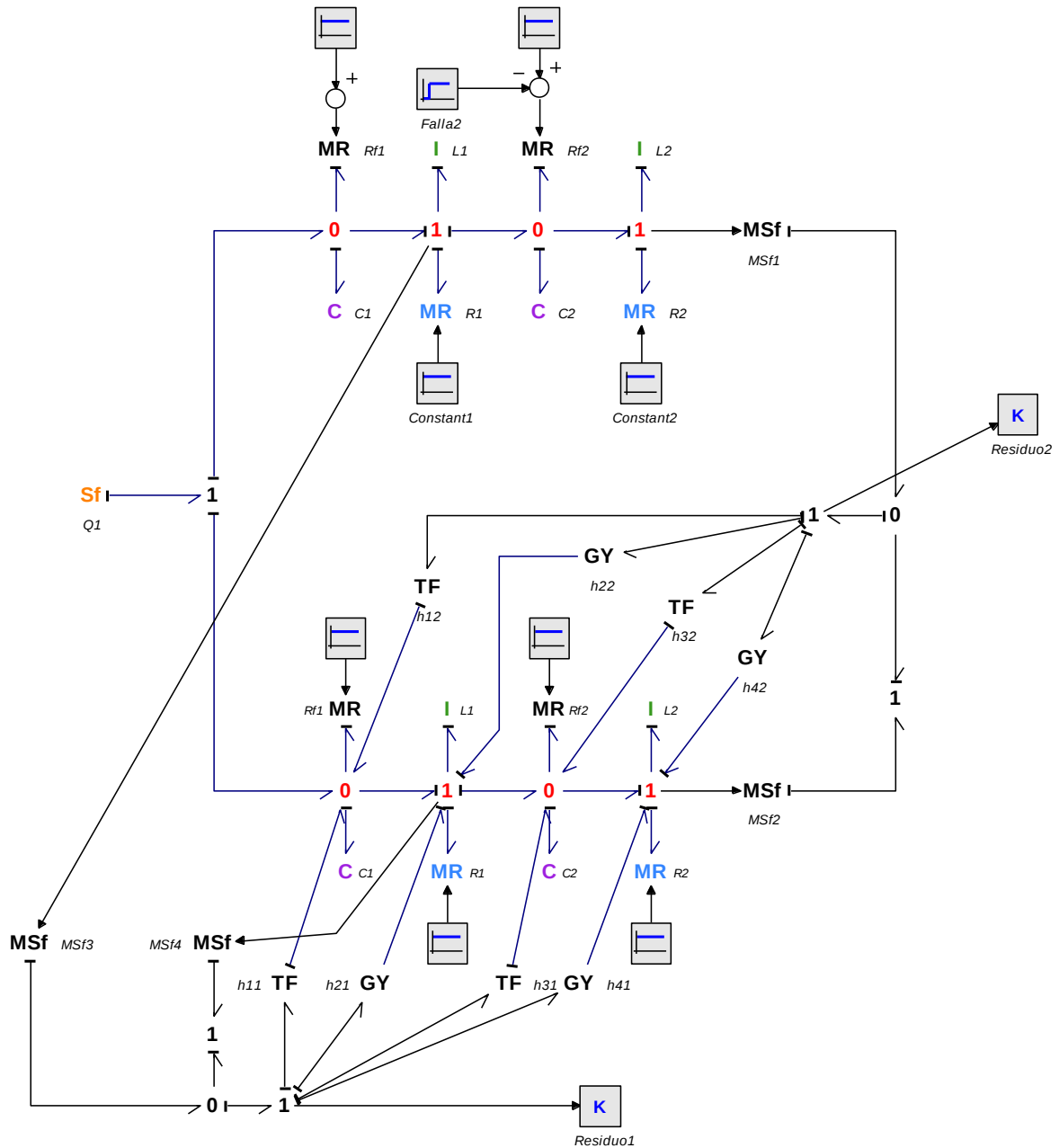


Fig. 4.11 Sistema hidráulico en bond graph con una falla tipo escalón en el tanque 2 ($C2$).

Al tener una fuga de agua continua en el segundo tanque se puede apreciar de la figura 4.12 que el *Tanque 1* se ve de igual forma afectado por esta falla, más sin embargo el valor del residuo para el primero de los tanques es de 0.5 una vez que la falla se mantiene constante, mientras que el valor que alcanza el residuo para el *Tanque 2* es de prácticamente -1.1, indicando así con el signo que la falla está ocurriendo en el segundo tanque.

Realizando una confrontación entre la figura 4.12 y la figura 4.6 podemos ver que las fallas provocadas a cada uno de los tanques afectan de manera distinta al tanque adyacente del sistema, lo cual indica que dependiendo de la ubicación del tanque externo a la falla será la magnitud de afectación que reciba.

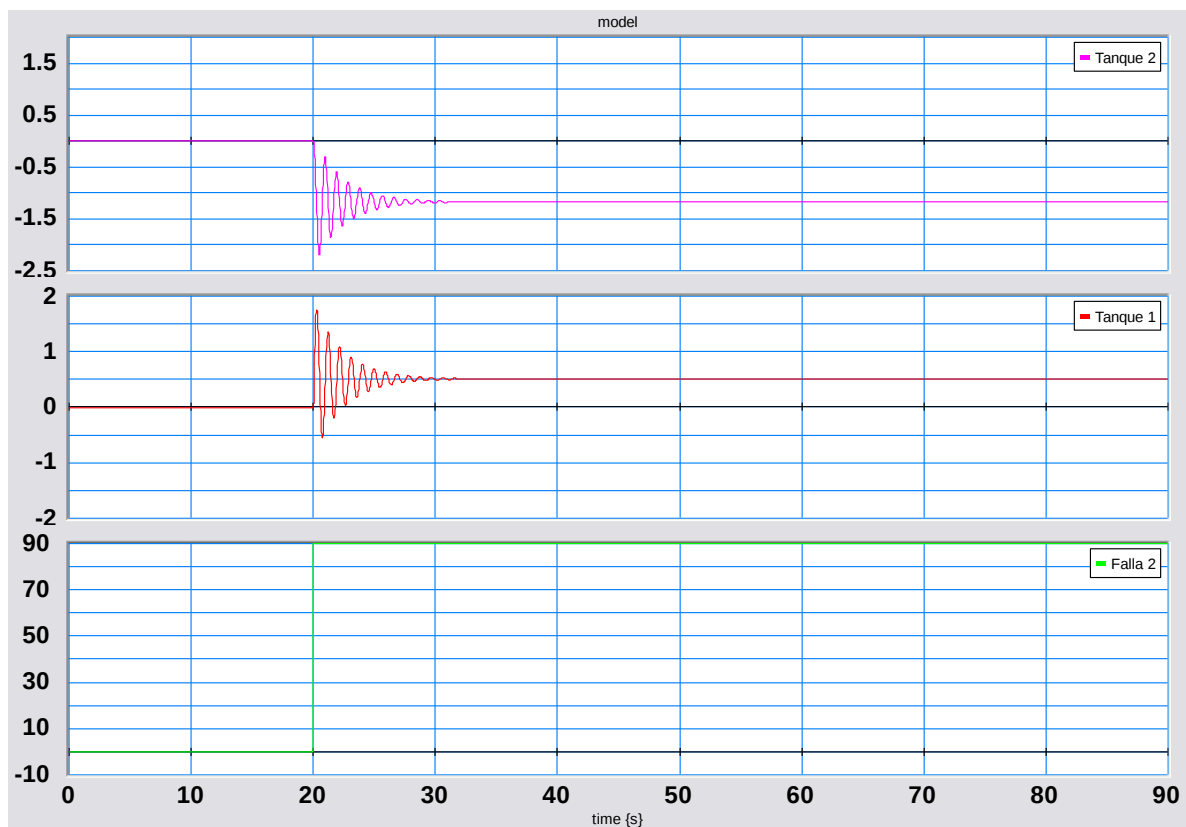


Fig. 4.12 Simulación de la falla tipo escalón en el Tanque 2 (C2).

Por último para terminar con ésta primera parte de detección de fallas por residuos mediante el uso de sensores de caudal, se presenta en la figura 4.13 el sistema hidráulico en el cual actúan las dos fallas de manera simultánea sobre el *Tanque 2*. Esta simulación tiene como propósito comparar su respuesta con la que se obtuvo al introducir de igual forma ambas fallas pero al primer tanque.

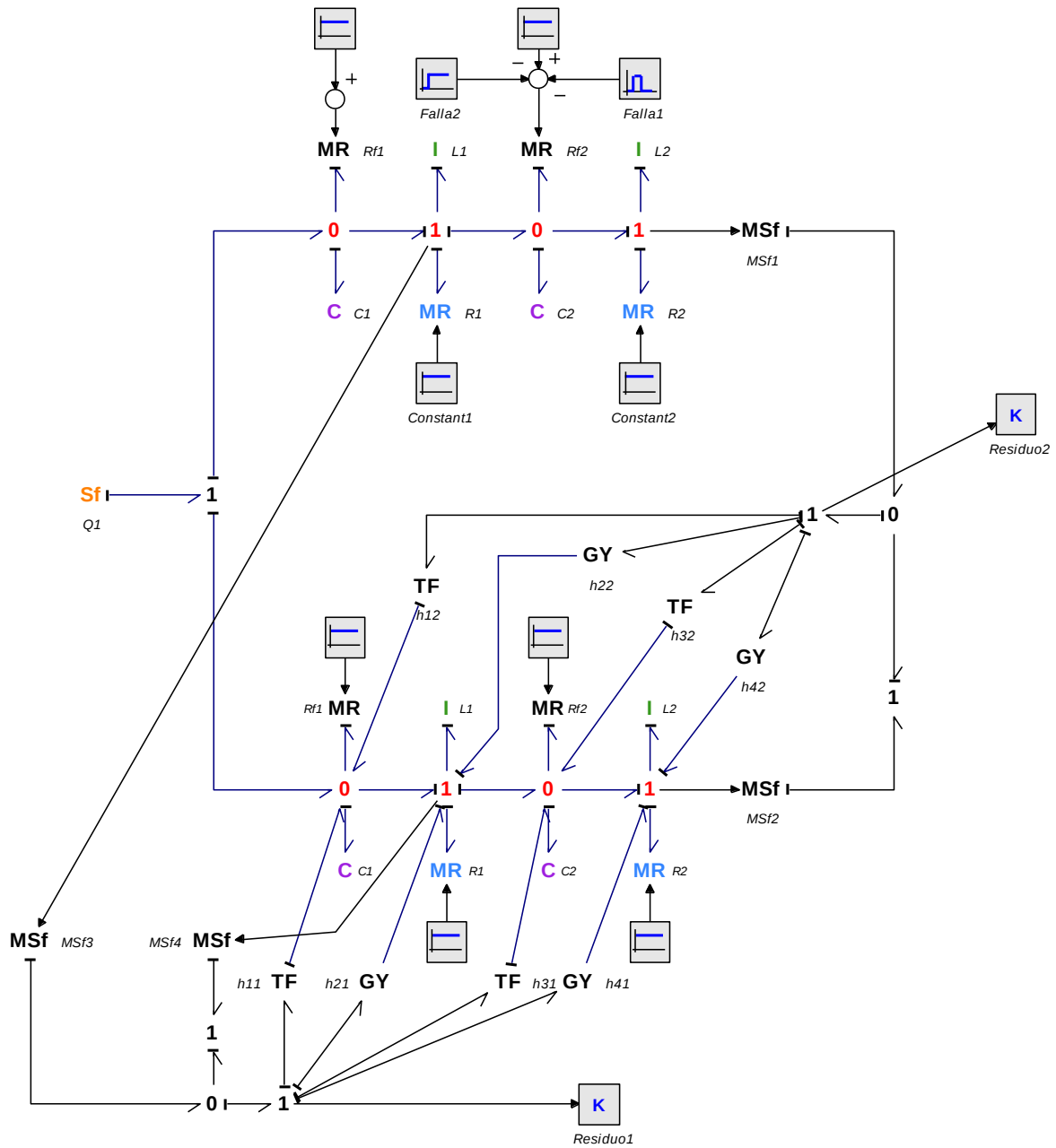


Fig. 4.13 Sistema hidráulico en bond graph con ambos tipos de falla en el tanque 2 (C2).

Al observar las respuestas de ambos residuos plasmadas en la figura 4.14 y estas a su vez cotejándolas con las respuestas obtenidas en las figuras 4.10 y 4.12, se puede ver que las señales alcanzan los mismos valores al inicio y al término de cada falla, no importando si la primera falla actúa de manera conjunta o por separado con la *falla 2*.

La forma en como se ha venido comportado cada una de las respuestas del sistema al momento de realizar las pruebas con dos fallas distintas, brinda la pauta con solo ver la figura 4.14 para aseverar que la falla está ocurriendo en el *Tanque 2* , ya que haciendo una retrospectiva de lo ocurrido las respuestas de los residuos en el tanque donde se encuentra la falla es de signo negativo, lo cual es consiste con lo que está sucediendo en éste caso.

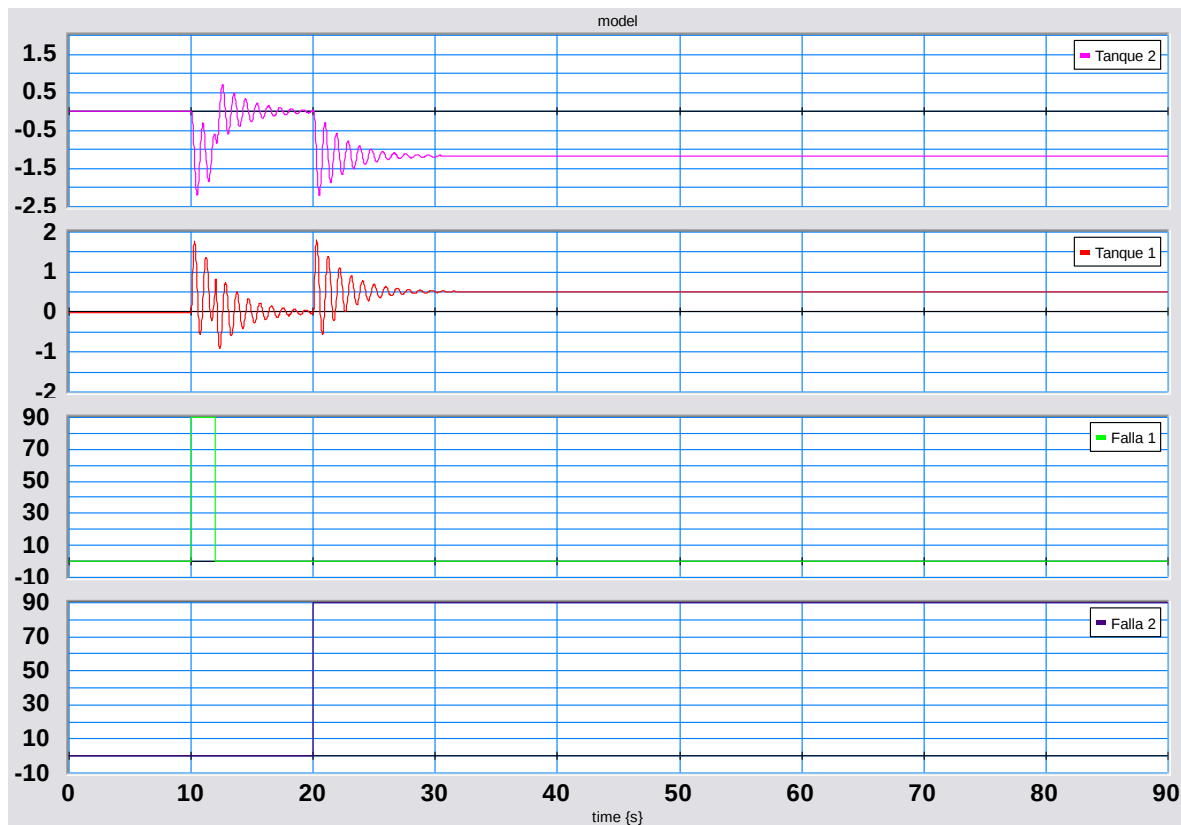


Fig. 4.14 Simulación con ambas fallas sobre el Tanque 2 (C2).

4.3 Detección de fallas con sensores de presión

En esta segunda parte de detección de fallas se presentan los sensores de presión, con la intención de identificar el comportamiento general de todo el sistema así como en cada uno de los tanques ante fugas de líquido momentáneas y constantes; esas fallas son

representadas por una señal tipo pulso y una señal tipo escalón. Cada una de las señales es introducida de forma separada a cada tanque y a continuación ambas fallas se aplicarán de forma conjunta.

En la figura 4.15 se tiene el modelo en bond graph del sistema hidráulico el cual es alterado por una falla tipo pulso con un valor de 90 sobre el *Tanque 1*, esta falla que solamente dura un par de segundos proporcionará información sobre la alteración de la presión que se tiene en primer tanque, así como la alteración que sufre el *Tanque 2*.

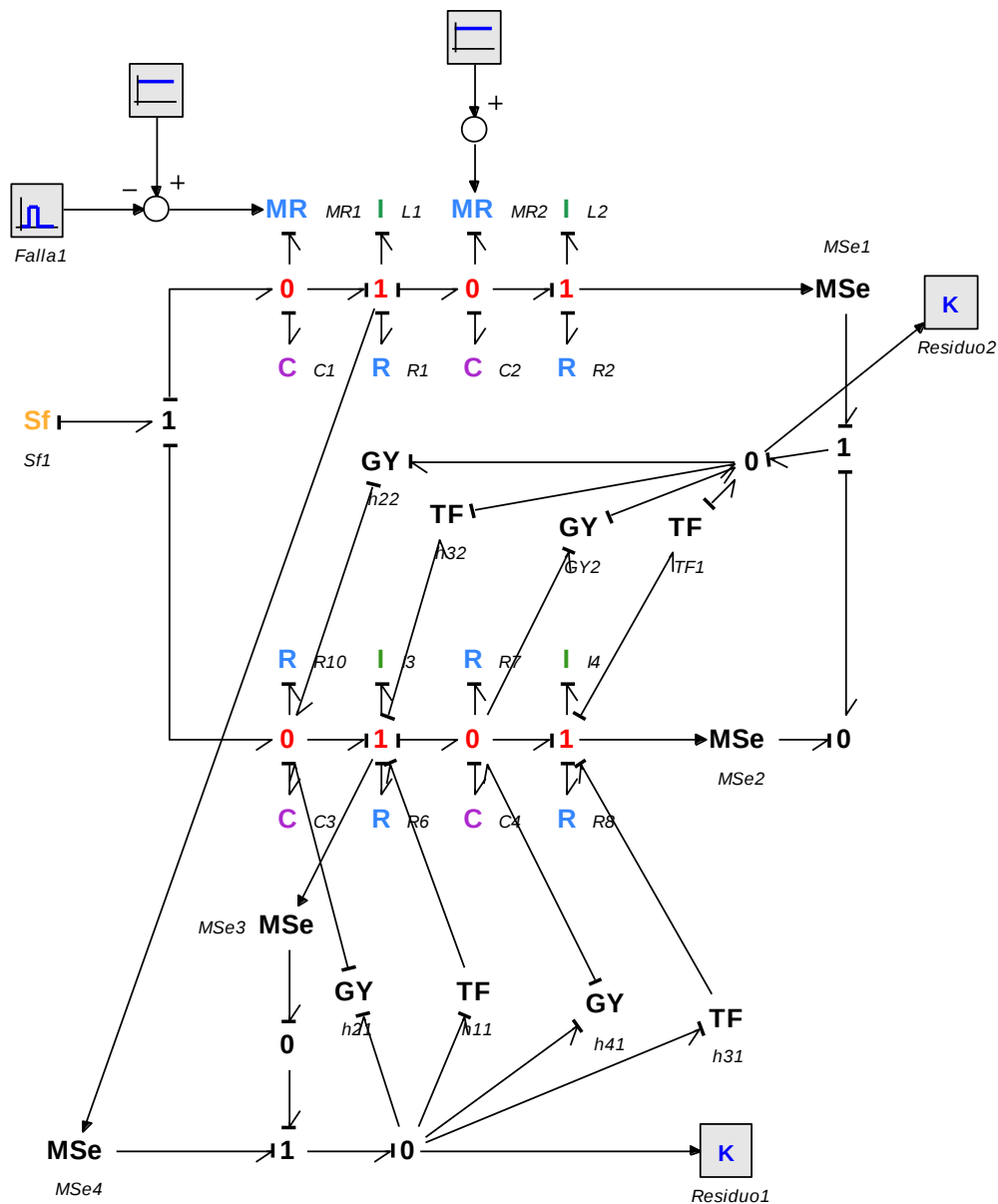


Fig. 4.15 Sistema hidráulico en bond graph con una falla tipo pulso en el Tanque 1 (C1).

Se puede observar en la figura 4.16 que al momento en que el primer tanque sufre una fuga de agua por algunos segundos se obtienen residuos tanto para el *Tanque 1* así como para el *Tanque 2*; estos residuos por tanto indican que existe una falla en alguno de los dos tanques. Si bien las alteraciones que sufren las señales de cada residuo son distintas en magnitud, se puede apreciar que en el momento en que ocurre la falla el valor de los residuos casi son iguales.

Por lo anterior se puede decir que la primera falla aplicada directamente al *Tanque 1* afecta de la misma manera el funcionamiento adecuado del segundo tanque, es decir que si la presión varía en el primer tanque debido a la falla, la presión en el segundo tanque se verá modificada de manera directa.

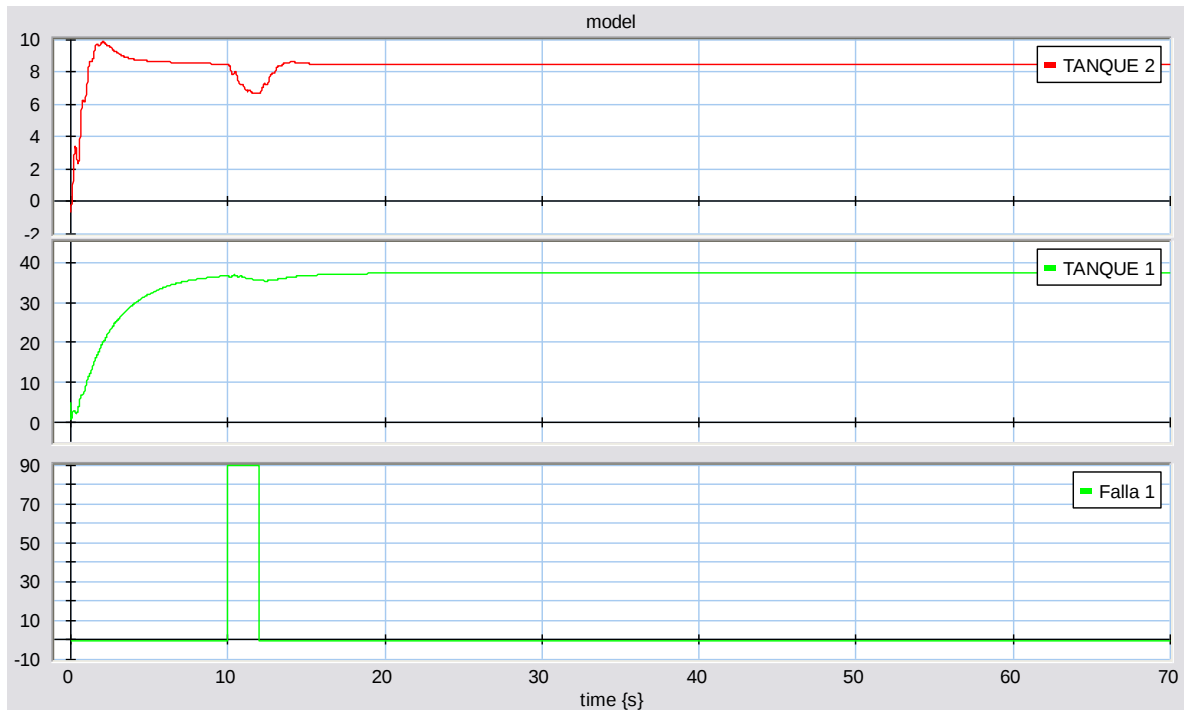


Fig. 4.16 Simulación con una falla tipo pulso sobre el Tanque 1 (C1).

A continuación en la figura 4.17 se presenta el mismo esquema anteriormente visto pero con la diferencia de que ahora existe una fuga de agua continua en el primero de los tanques, la cual está simulada a través de una señal de escalón la cual se designó con un valor de 90, esta falla comienza a actuar a los 20 segundos de haber iniciado el funcionamiento del sistema hidráulico.

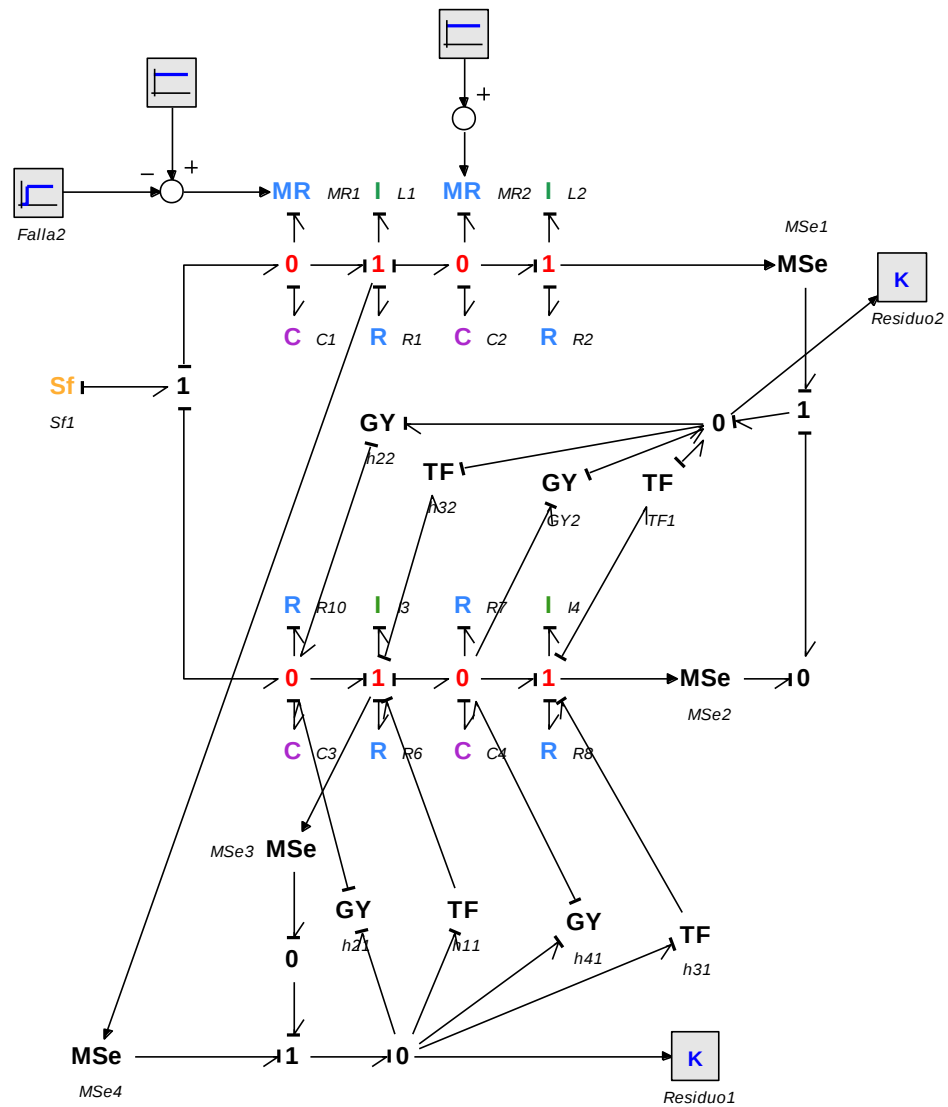


Fig. 4.17 Sistema hidráulico en bond graph con una falla tipo escalón en el Tanque 1 (C1).

Las respuestas obtenidas de los residuos mostradas en la figura 4.18 indican nuevamente que existe una falla en alguno de los tanques que conforman al sistema. Nuevamente vemos que la variación en la presión que sufre el primer tanque debido a una falla constante, afecta de igual forma la respuesta en cuanto a la presión se refiere del segundo tanque.

Si bien en este momento no se puede definir con sólo observar las figura 4.16 y 4.18 en cual de los dos tanques se encuentra la falla, si podemos hablar de que existe una fuga que está actuando sobre el sistema ya sea solamente por algunos segundos o de lo contrario que esta falla se mantenga durante un tiempo indefinido.

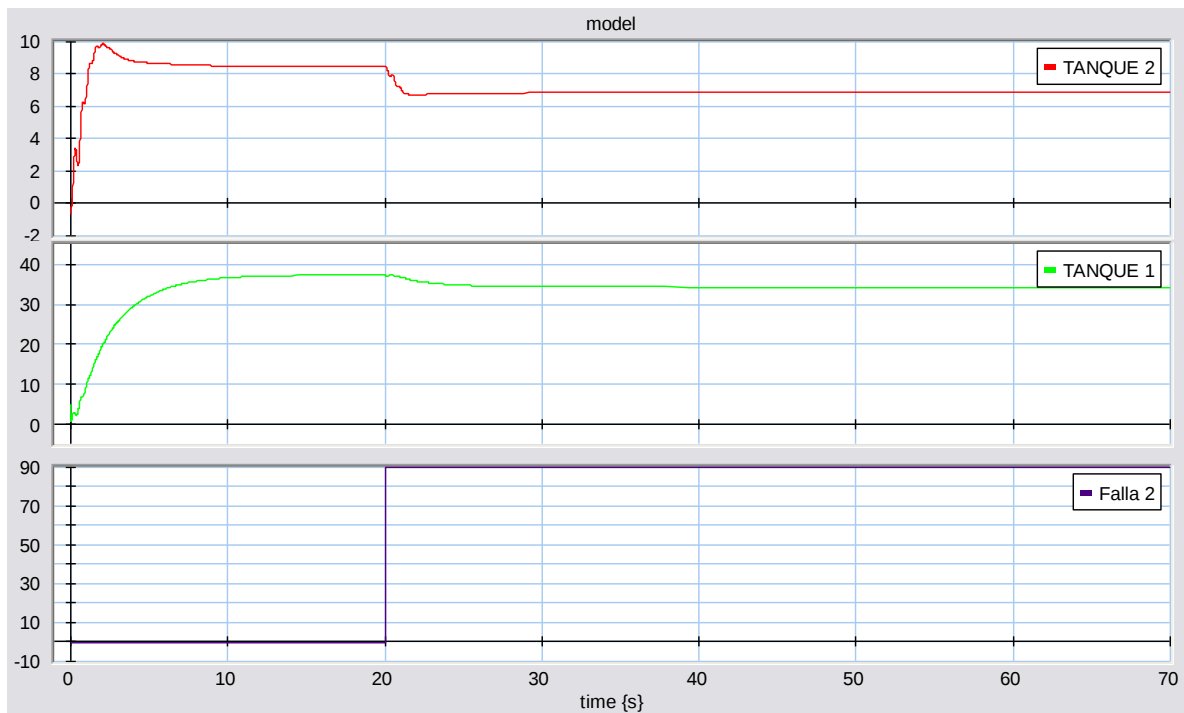


Fig. 4.18 Simulación con una falla tipo escalón sobre el Tanque 1 (C1).

Ahora para la siguiente simulación se considera que el sistema sufre de dos fallas en el *Tanque 1*, la primera de ellas es la de tipo pulso la cual inicia a los 10 segundos de haber comenzado el funcionamiento del sistema y finaliza dos segundos más tarde, enseguida se tiene la segunda falla que interviene a los 20 segundos, esta falla permanece durante el periodo dinámico restante manteniéndose en un valor de 90.

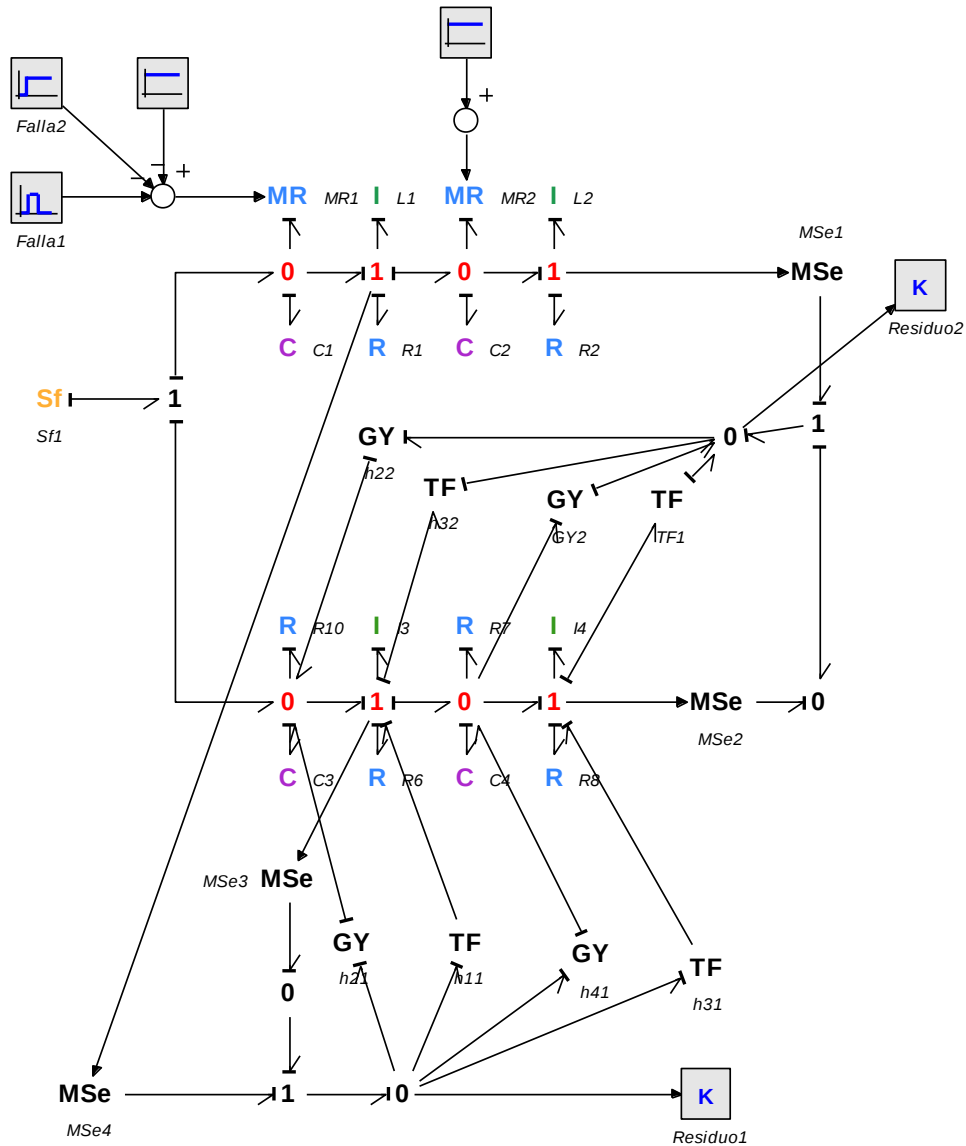


Fig. 4.19 Sistema hidráulico en bond graph con ambos tipos de falla en el Tanque 1 (C1).

La información proporcionada por la figura 4.20 indica que existen dos fallas o fugas de agua dentro del sistema hidráulico las cuales ocurren con una diferencia de 8 segundos entre el término de la primera falla y el inicio de la segunda fuga de agua. Como se aprecia el valor de los residuos en cada uno de los tanques es idéntico cada vez que ocurre la falla.

La figura 4.20 muestra que no importa el número de fallas que afecten al sistema, estas serán detectadas, la detección de esas fallas se verá reflejado en una disminución en el valor del residuo de ambos tanques.

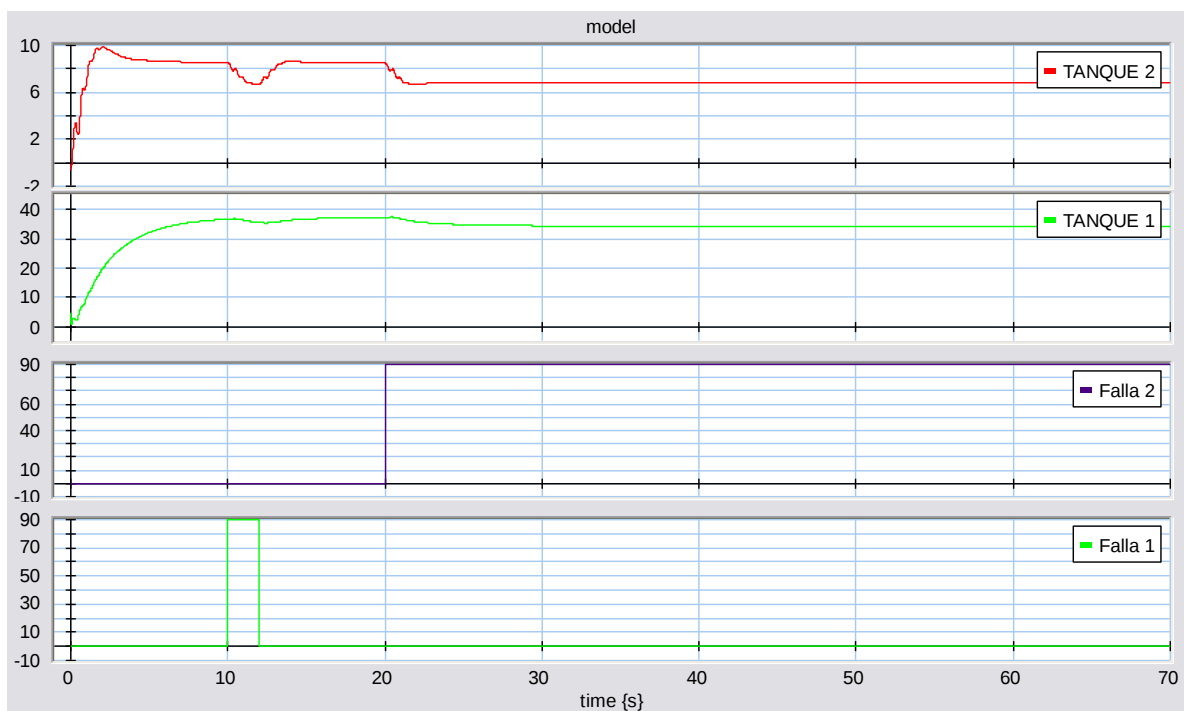
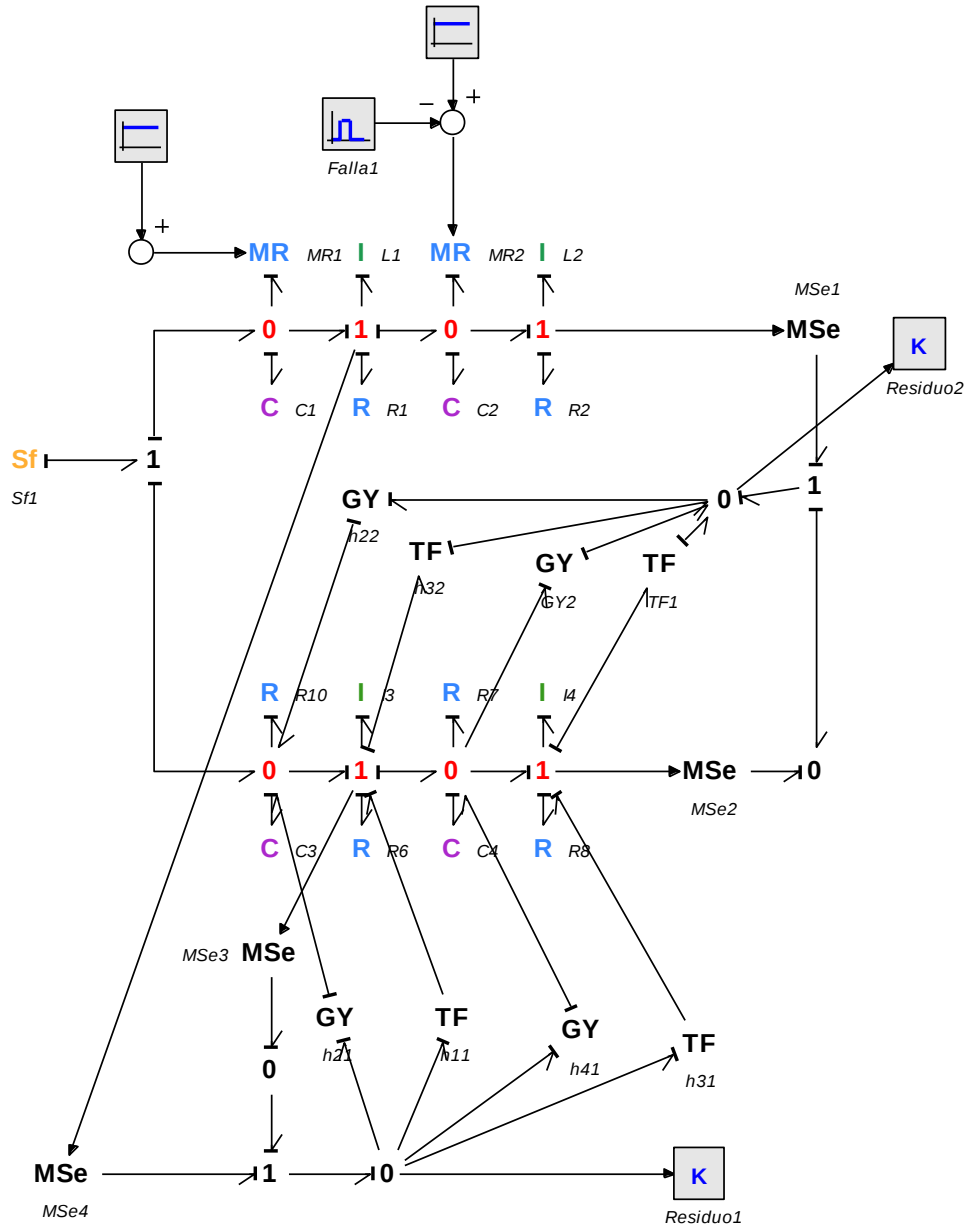


Fig. 4.20 Simulación con ambas fallas actuando sobre el Tanque 1 (C1).

Para el siguiente esquema representado por la figura 4.21 se produce una falla con un valor de 90 en el segundo tanque. La finalidad de producir una fuga de agua en esta parte del sistema es poder observar el comportamiento del *Tanque 2* al sufrir una falla directa, además se podrá observar la implicación que tiene una fuga instantánea en el segundo tanque sobre el primero. De esta manera comprobaremos si las respuestas del sistema visto en la figura 4.15 y la figura 4.21 son las mismas.



4.21 Sistema hidráulico en bond graph con una falla tipo pulso en el Tanque 2 (C2).

La respuesta de los residuos para el primero así como para el segundo tanque mostrada en la figura 4.22 brinda información valiosa, primeramente porque la fuga de agua que ocurre en el sistema es detectada adecuadamente, más sin embargo la diferencia respecto a las simulaciones anteriores con sensores de presión es que donde ocurre la falla, que en éste caso es en el *Tanque 2* se puede apreciar con una mayor intensidad.

Por otro lado, la respuesta del residuo obtenido para el primer tanque al momento de que ocurre la falla se modifica de forma muy ligera, por lo que se puede decir que prácticamente el *Tanque 1* se mantiene constante sin sufrir una alteración debida a la falla en el segundo tanque.

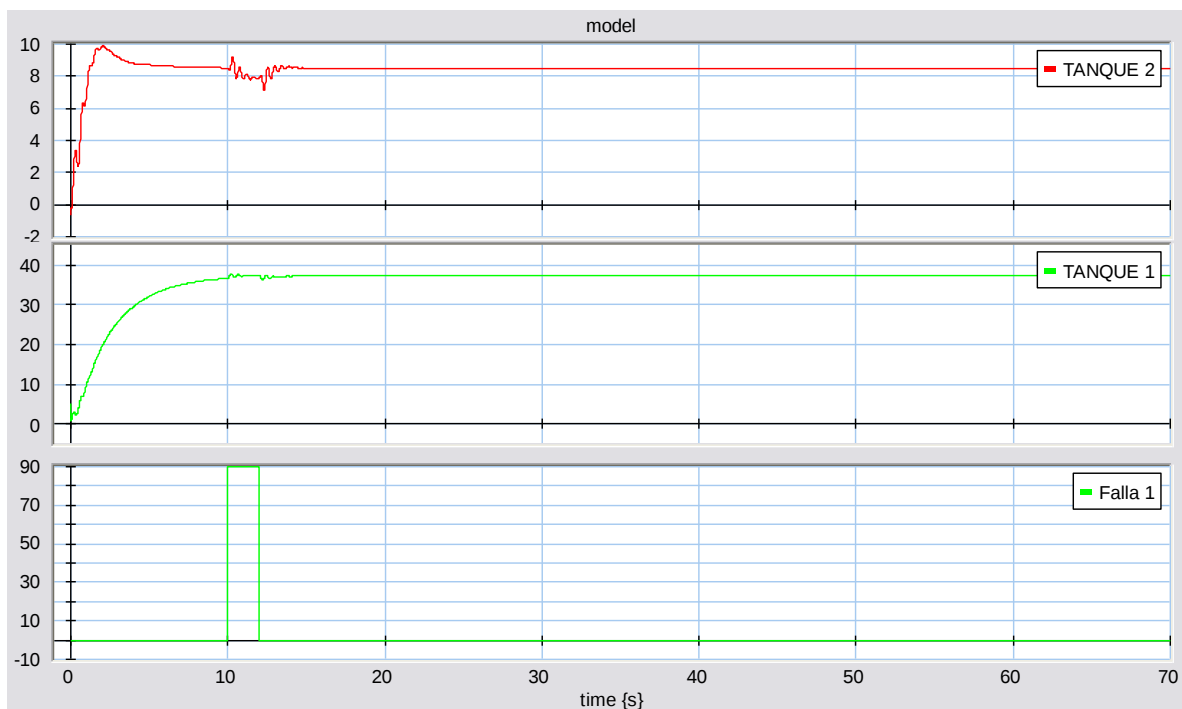


Fig. 4.22 Simulación con una falla tipo pulso actuando sobre el Tanque 2 (C2).

Enseguida en la figura 4.23 se simula una fuga de agua dentro del *Tanque 2* a los 20 segundos de haber iniciado el funcionamiento del sistema hidráulico, la cual permanece constante durante todo el periodo dinámico. Ésta simulación brinda información para analizar el comportamiento del segundo tanque, pero sobre todo podremos observar si existe un cambio en el comportamiento del *Tanque 1*

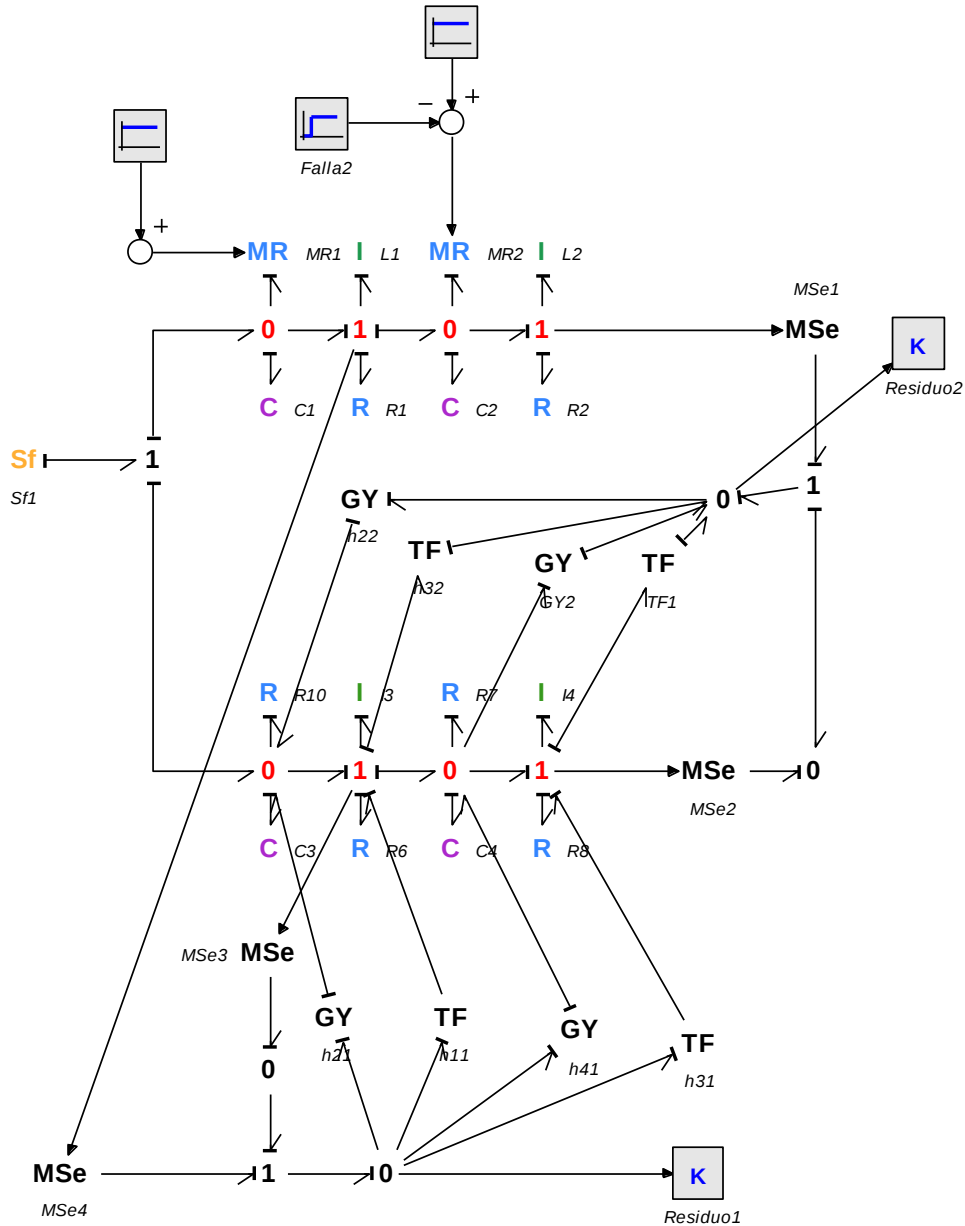


Figura 4.23 Sistema hidráulico en bond graph con una falla tipo escalón en el Tanque 2 (C2).

La figura 4.24 muestra en primer lugar que la falla que ocurre a los 20 segundos en el segundo tanque es detectada de manera adecuada, debido a que existe una diferencia del residuo para el *Tanque 2* antes y después de que la fuga aparezca.

Por otro lado, como se puede apreciar en la respuesta del residuo para el *Tanque 1* la detección de la falla es realizada más sin embargo es muy difícil de distinguir, ya que después de que aparece la fuga de agua la señal se mantiene sin variación alguna.

Observando las respuestas de los residuos para el primer tanque obtenidas en las figuras 4.22 y 4.24 se puede decir que las fugas que ocurren en el segundo tanque no afectan de manera considerable al *Tanque 1*. Lo anterior implica el poder definir de manera exacta con solamente observar las respuestas de los residuos en que tanque se encuentra la fuga.

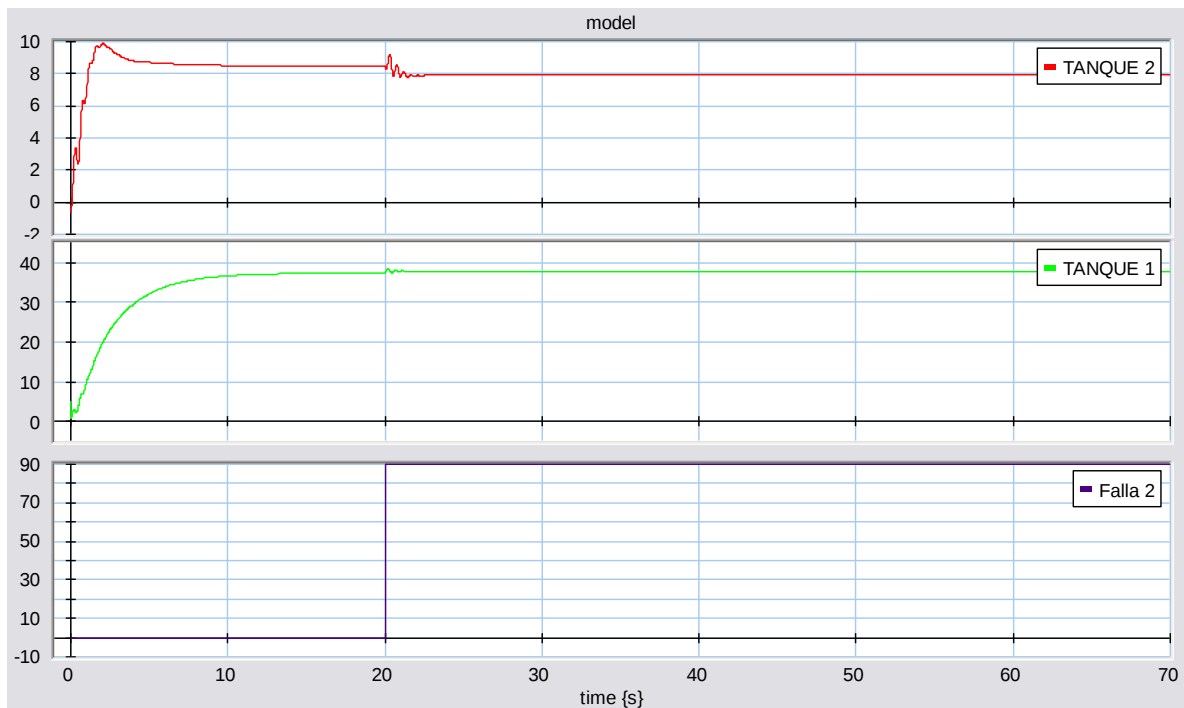


Fig. 4.24 Simulación con una falla tipo pulso actuando sobre el Tanque 2 (C2).

Para finalizar esta sección de detección de fallas con la ayuda de sensores de presión, se presenta en la figura 4.25 el esquema del sistema hidráulico con los dos tipos de falla que se han mostrado con anterioridad, con el objetivo de ver claramente los comportamientos de los residuos entre el primero y el segundo tanque que es donde se encuentran las fugas de agua.

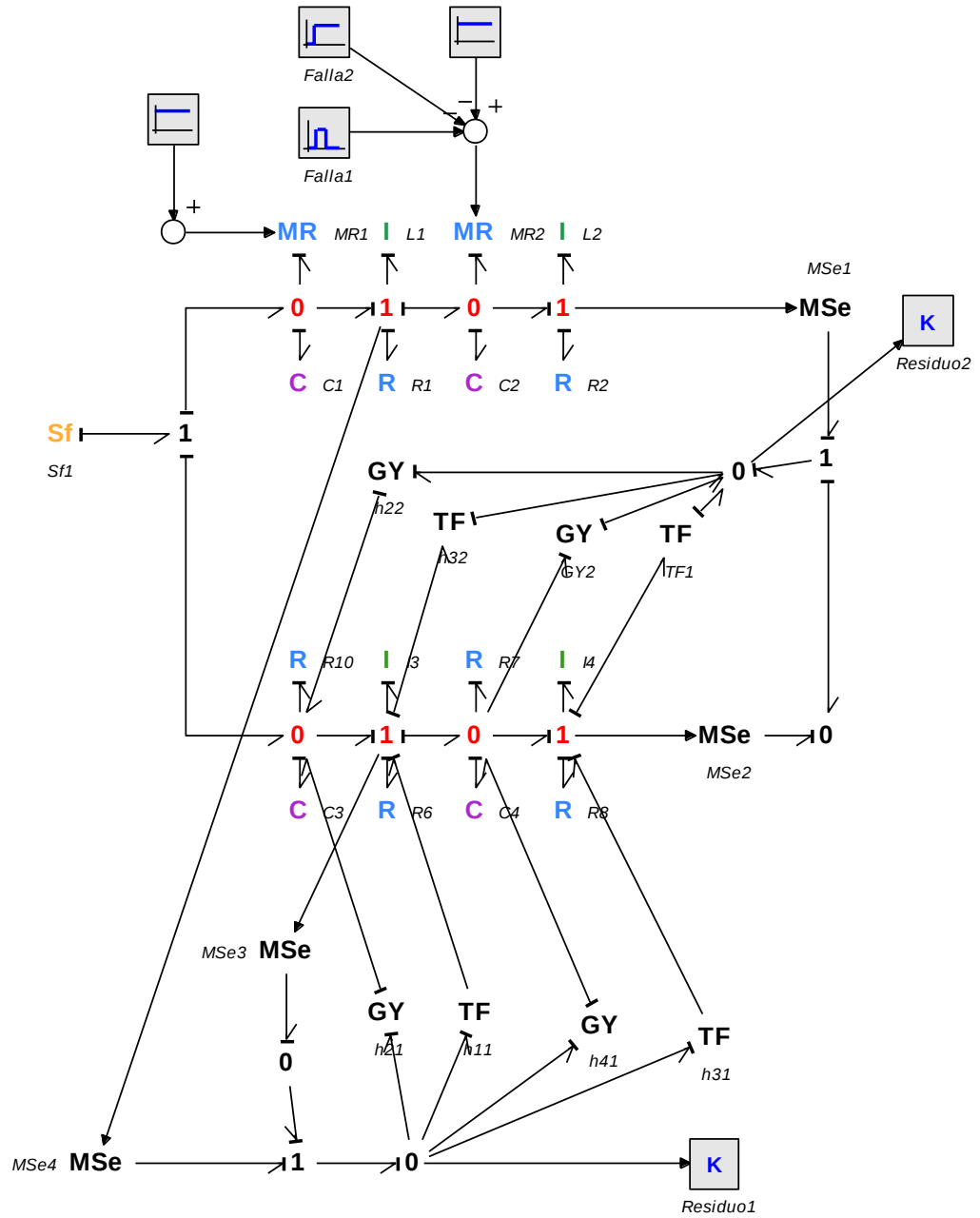


Fig. 4.25 Sistema hidráulico en bond graph con ambos tipos de falla en el Tanque 2 (C2).

Las gráficas de los residuos mostrados en la figura 4.26 son un resumen de lo que sucede al usar sensores de presión para detectar una o varias fallas dentro del sistema hidráulico modelado en bond graph específicamente sobre el segundo tanque, ya que como lo indican las respuestas al momento de tener una falla sobre el *Tanque 2* el comportamiento del primer tanque prácticamente no se ve afectado por las fugas presentadas en el tanque subsecuente, brindando así la posibilidad de determinar las fallas que ocurren en alguno de los dos tanques a través de sensores presión.

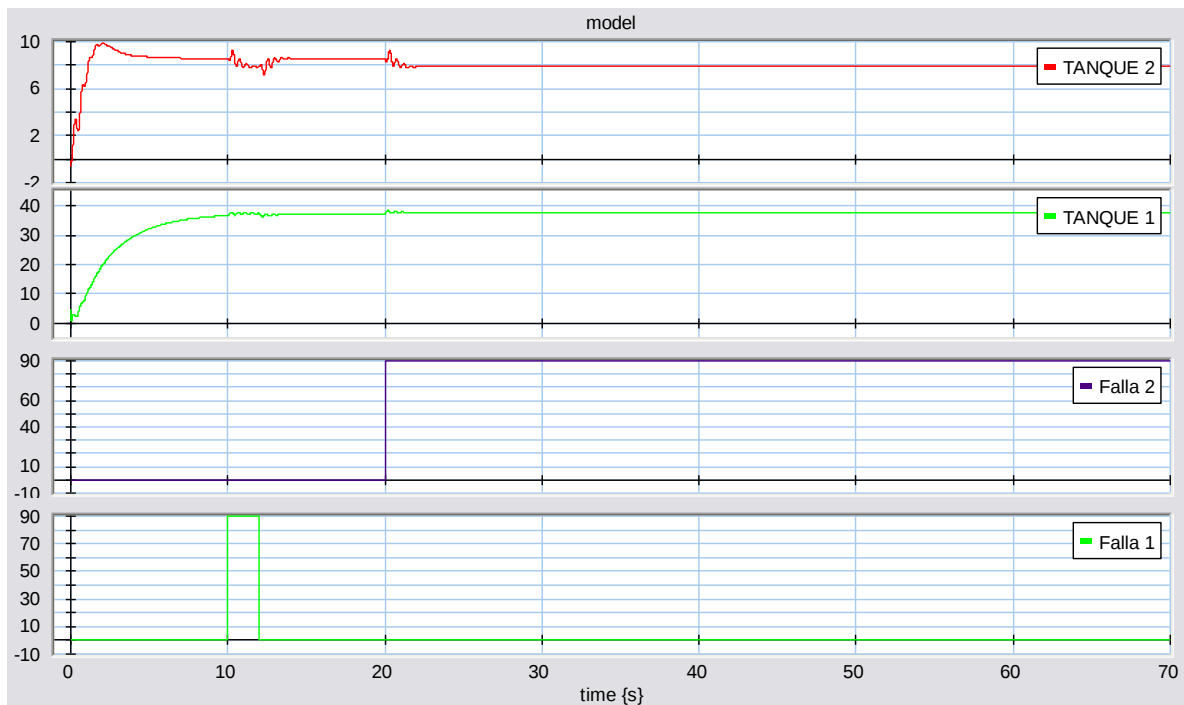


Fig. 4.26 Simulación con ambas fallas actuando sobre el Tanque 2 (C2).

4.4 Detección de fallas con sensores de caudal y presión

Para este subtema se presentan algunas pruebas realizadas al sistema hidráulico por medio de sensores de caudal y de presión, los cuales funcionan conjuntamente de manera que se podrán observar las diferencias entre un tipo de sensor y otro al momento detectar una fuga en el primer y segundo tanque.

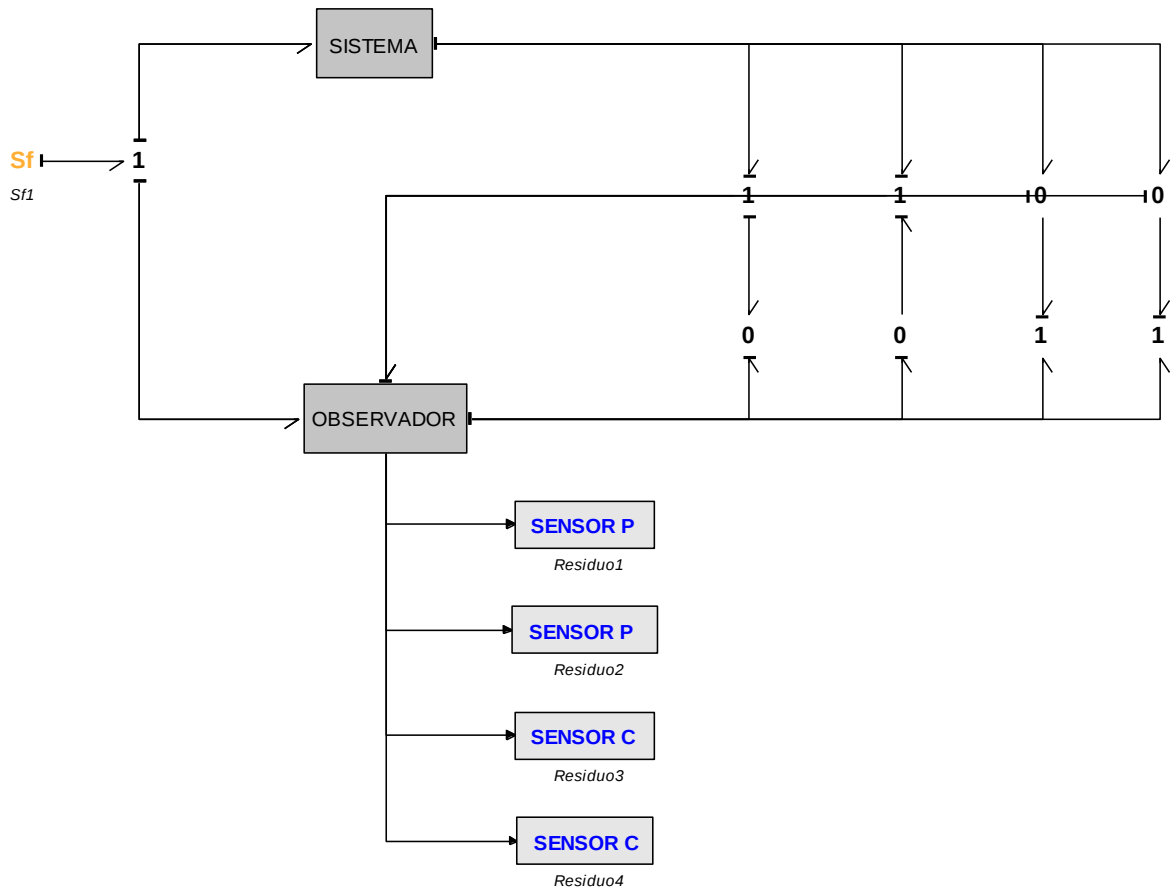
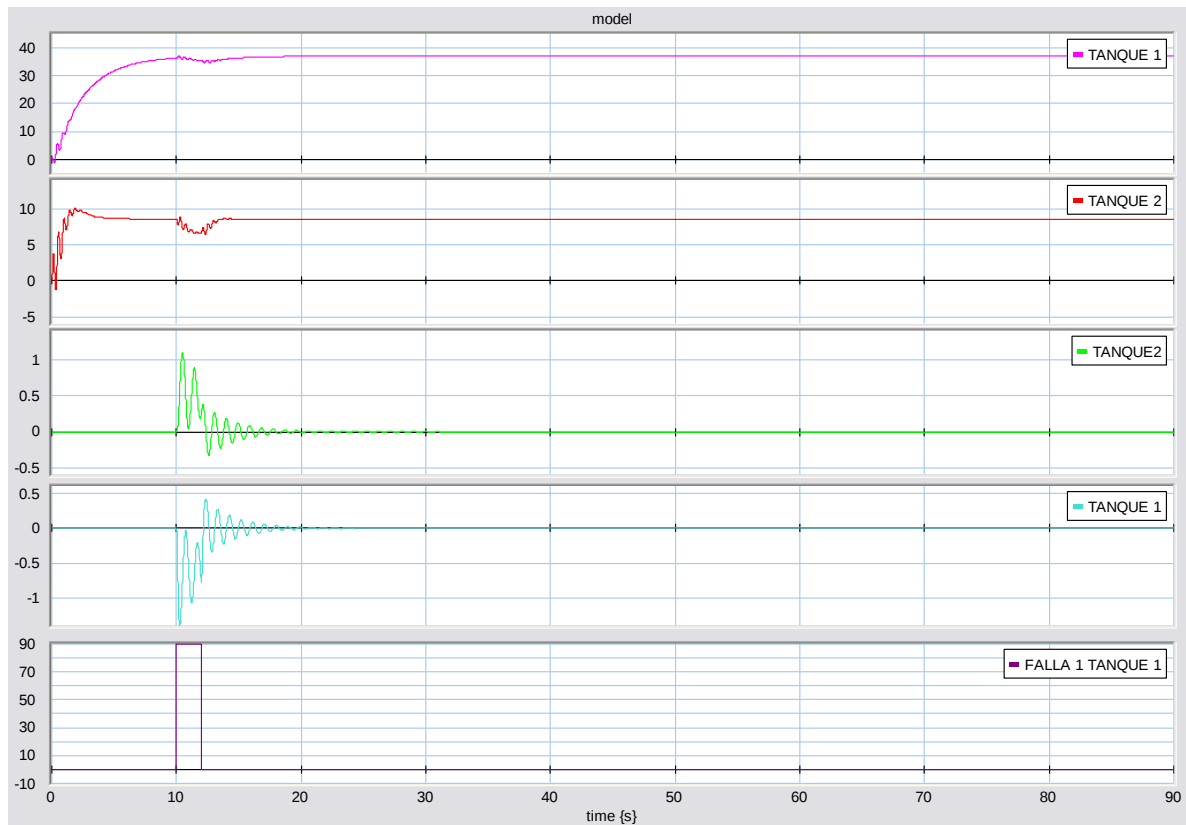


Fig. 4.27 Sistema hidráulico con sensores de presión y caudal representado en forma de bloques.

Al igual que en las pruebas realizadas en las subsecciones anteriores, en esta se presenta la primera falla, la cual representa una fuga de agua con una duración de dos segundos en el primer tanque; como se aprecia en la figura 4.27 la falla es detectada por ambos sensores, con los sensores de presión se muestra la influencia que se tiene sobre el segundo tanque al momento de tener una fuga en el primer tanque, más sin embargo con los sensores de caudal podemos apreciar de mejor forma donde está ocurriendo la falla, ya que como se mostró en la subsección 4.2 la respuesta negativa del residuo indica en que tanque se encuentra la fuga.

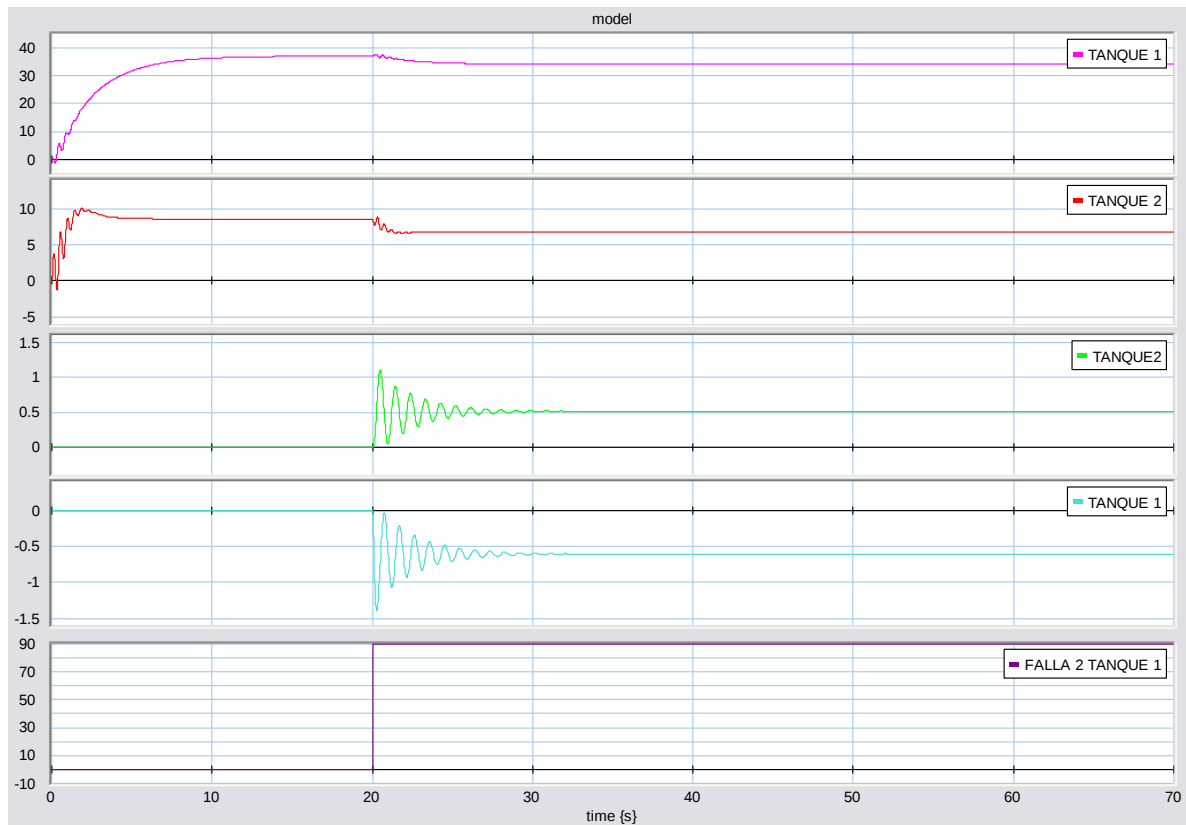


■ ■ Respuesta de los residuos a través de sensores de presión.

■ ■ Respuesta de los residuos a través de sensores de caudal.

Fig. 4.28 Simulación con sensores de presión y caudal para una falla tipo pulso en el Tanque 1.

Ahora en la figura 4.28 se muestran las respuestas de los residuos que se obtienen al presentarse una fuga constante de agua en el primer tanque a través de los dos tipos de sensores, por lo que nuevamente se lleva a cabo la detección de la falla de forma favorable ya que al igual que la respuesta que se logra cuando se tiene una fuga por algunos segundos en el primer tanque, se obtiene cuando esta dura por un tiempo indefinido.



■ ■ Respuesta de los residuos a través de sensores de presión.
■ ■ Respuesta de los residuos a través de sensores de caudal.

Fig. 4.29 Simulación con sensores de presión y caudal para una falla tipo escalón en el Tanque 1.

En la figura 4.29 se presentan las respuestas de los residuos de cada uno de los tanques al momento de que aparece una fuga de agua en el segundo tanque a los 10 segundos de haber comenzando el funcionamiento del sistema. Por un lado la gráfica indica a través de los sensores de presión que la falla presentada en el *Tanque 2* no tiene una gran repercusión sobre el *Tanque 1* y por otro lado las respuestas obtenidas por los sensores de caudal revelan de forma más clara en cual de los dos tanques se ubica la fuga.

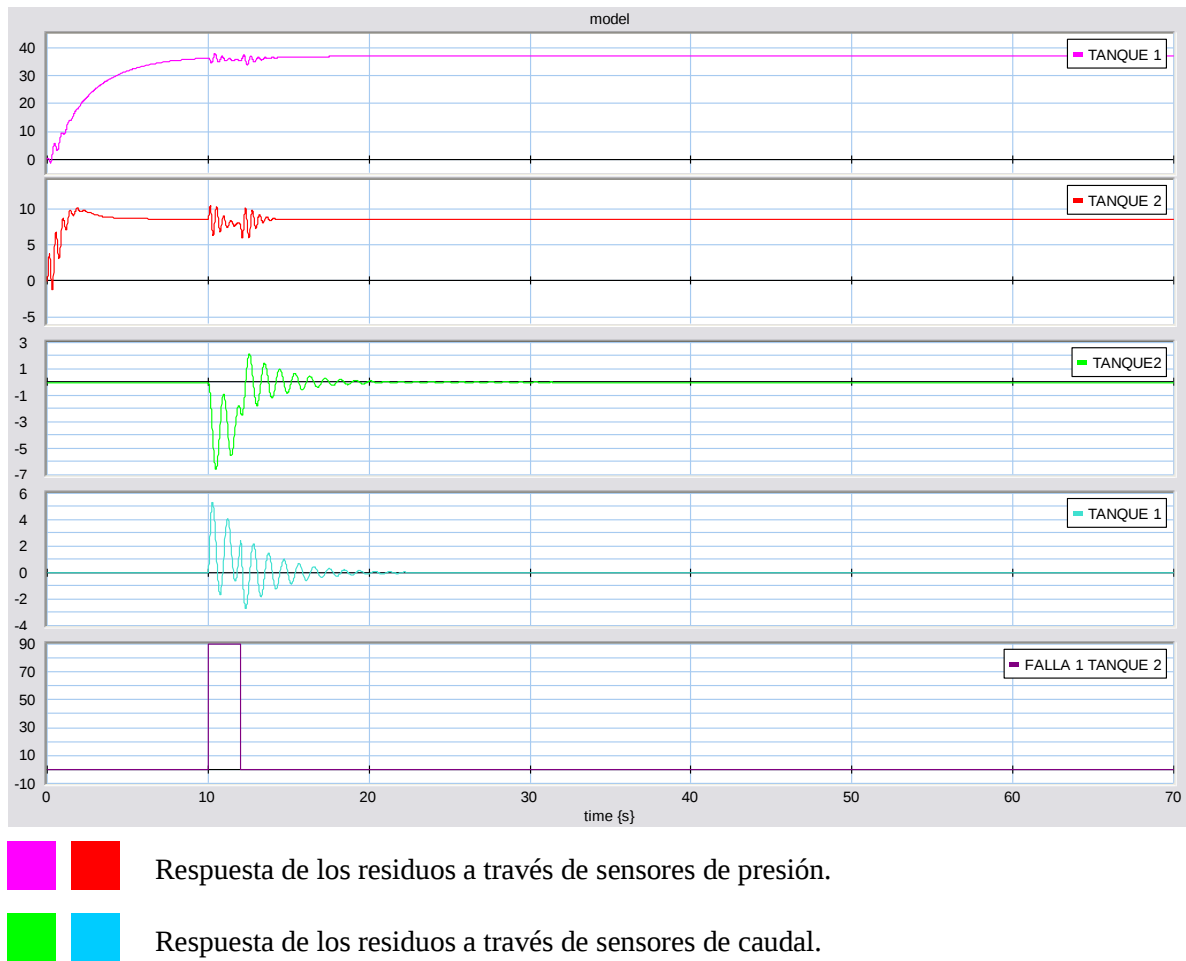
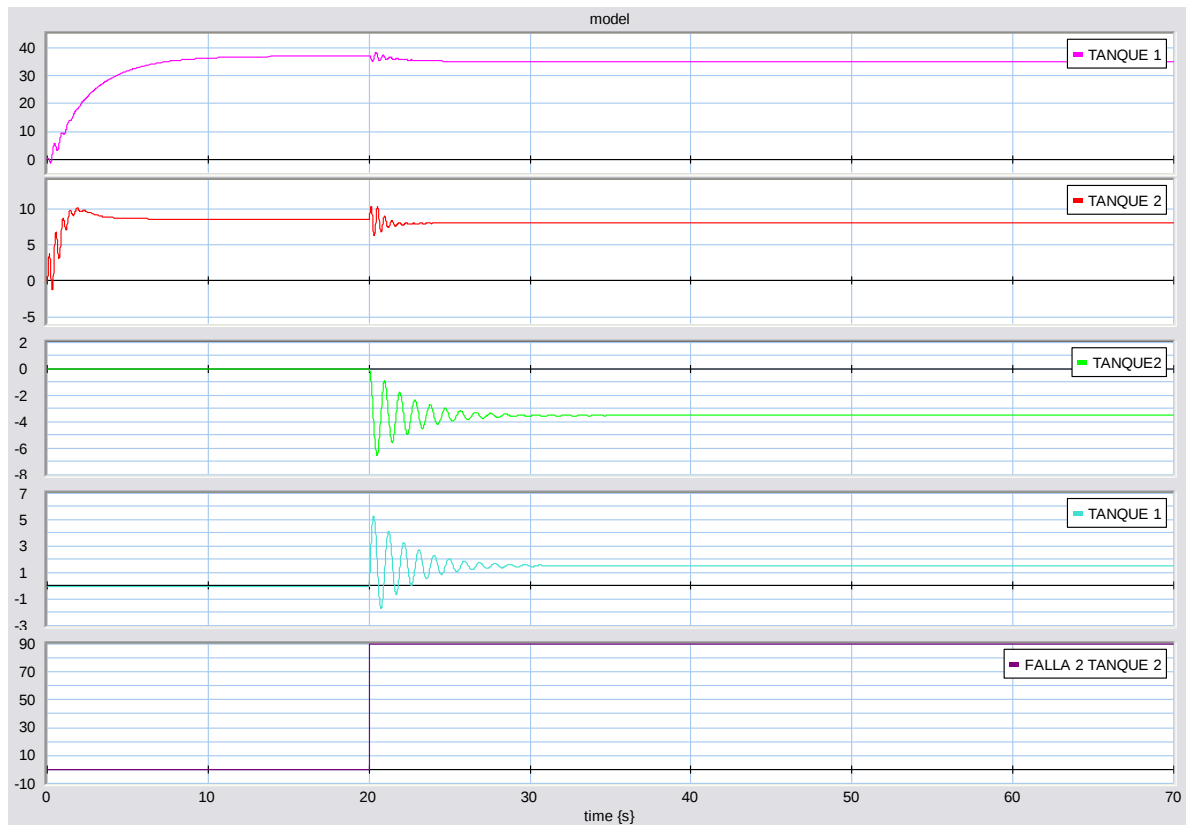


Fig. 4.30 Simulación con sensores de presión y caudal para una falla tipo pulso en el Tanque 2.

Por último en la figura 4.30 se muestra la simulación cuando se tiene una fuga constante de agua en el segundo tanque, donde nuevamente se puede apreciar la poca influencia que existe sobre el primer tanque al momento de tener una falla la cual se mantiene constante en el segundo tanque gracias a los sensores de presión.



■ ■ Respuesta de los residuos a través de sensores de presión.
■ ■ Respuesta de los residuos a través de sensores de caudal.

Fig. 4.31 Simulación con sensores de presión y caudal para una falla tipo escalón en el Tanque 2.

A través de las simulaciones realizadas al sistema hidráulico de dos tanques en donde se representaron las fallas tipo pulso y escalón en forma separada y de manera conjunta se lograron obtener excelentes resultados en cuanto a la detección de fallas se refiere, además de poder señalar la ubicación de la fuga existente a través de las respuestas logradas por parte de las gráficas de los residuos para cada uno de los tanques, lo cual fue posible gracias a la aplicación de sensores de presión y caudal. Si bien tanto con la ayuda de los sensores de presión y de caudal es posible determinar la existencia y la ubicación de la falla, estos últimos brindan la posibilidad de precisar de mejor forma el tanque que está siendo afectado debido a que la respuesta de los residuos para los sensores de caudal es más visible ya que es negativa durante el momento en que la falla persiste.

Capítulo 5

Detección de fallas a gran escala

5.1 Introducción

En los capítulos 3 y 4 se presentaron el modelado y la detección de fallas para un sistema hidráulico conformado únicamente por dos tanques, por lo que corresponde al presente capítulo modelar y detectar las fallas que se presentan en sistemas hidráulicos conformados por más de dos tanques a través del uso de sensores de caudal. En la figura 5.1 se muestra el esquema físico que debe seguirse en la conexión de cada uno de los tanques para poder realizar esta acción de detección de fugas de agua.

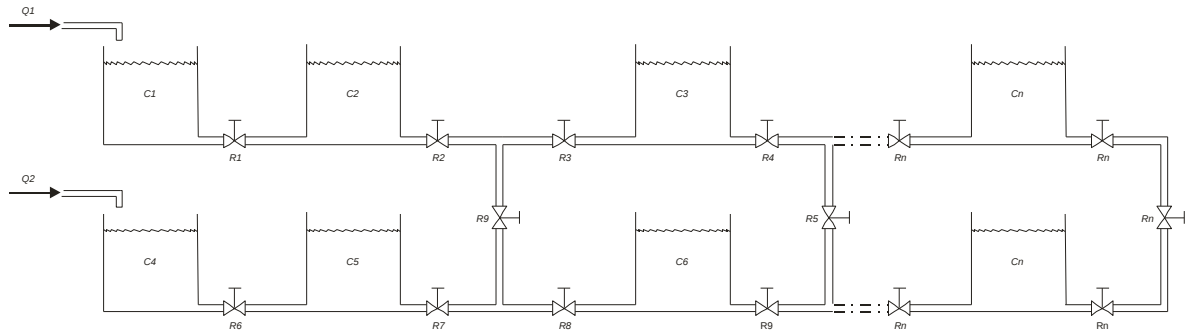


Fig. 5.1 Conexión física del sistema hidráulico a gran escala

Para este capítulo se modela un sistema hidráulico con seis tanques, al igual que el sistema hidráulico presentado en el capítulo 4 a éste nuevo esquema se le provocarán dos tipos de fuga de agua, la primera será por sólo algunos segundos y la segunda falla durará un tiempo indefinido. Las fallas se aplicarán a cada uno de los tanques que conforman el sistema, con la finalidad de observar el comportamiento tanto del tanque en donde ocurre la falla así como en el resto de los tanques.

Las pruebas que se realicen al sistema hidráulico brindarán la posibilidad de establecer un nuevo método efectivo para la detección de fugas en sistemas hidráulicos a gran escala a través del modelado en bond graph.

5.2 Detección de fallas a gran escala con sensores de caudal

El esquema construido en bond graph para la detección de fallas en un sistema de seis tanques es más complejo que el sistema de dos tanques, causando que sea inadecuado presentar el sistema completo, por lo que en la figura 5.2 se muestra el sistema hidráulico conformado por dos bloques, el primero de ellos es el sistema o planta que es donde se encuentra la conexión del sistema hidráulico la cual se presenta en la figura 5.3; el segundo bloque contiene la conexión del observador en el cual se encuentran las ganancias únicamente el sistema hidráulico en bond graph sin el observador debido a que este es una copia exacta del sistema hidráulico. En esta figura 5.2 también se muestran los residuos para cada uno de los tanques representados con la letra K , en el lado derecho del sistema se encuentra la operación de resta realizada para determinar la falla; por último en el lado izquierdo de la figura 5.2 se encuentran las dos fuentes de flujo de agua que suministran al sistema hidráulico

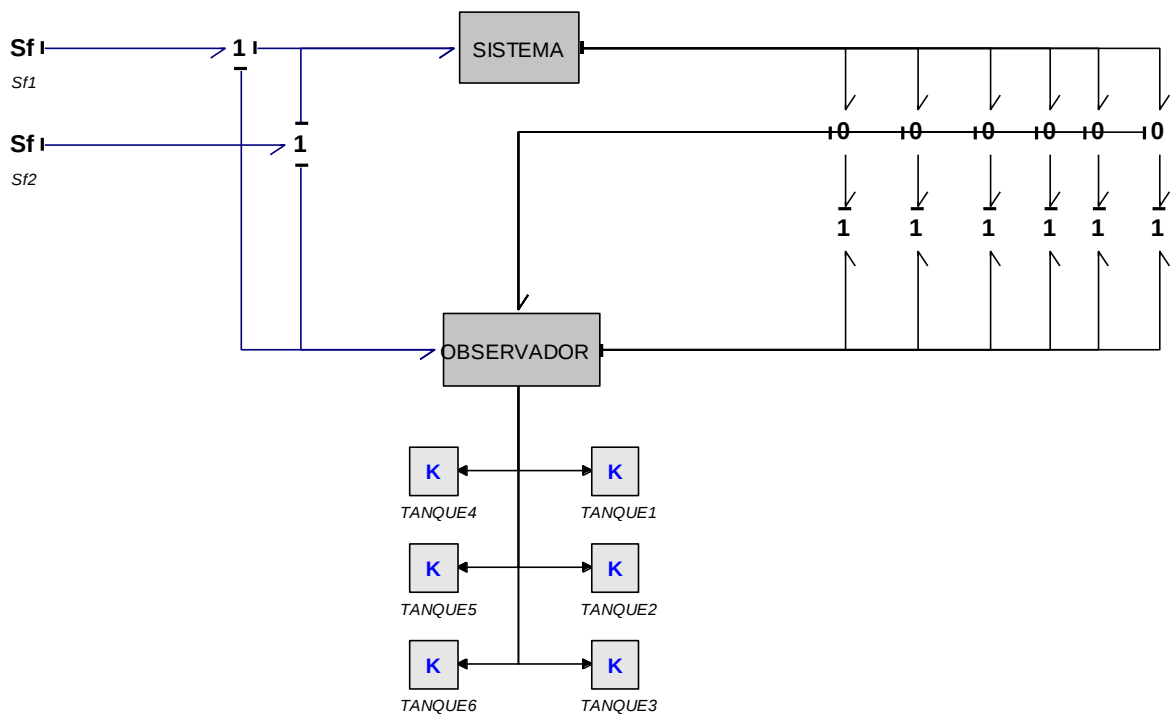


Fig. 5.2 Diagrama en bloques del sistema hidráulico para 6 tanques

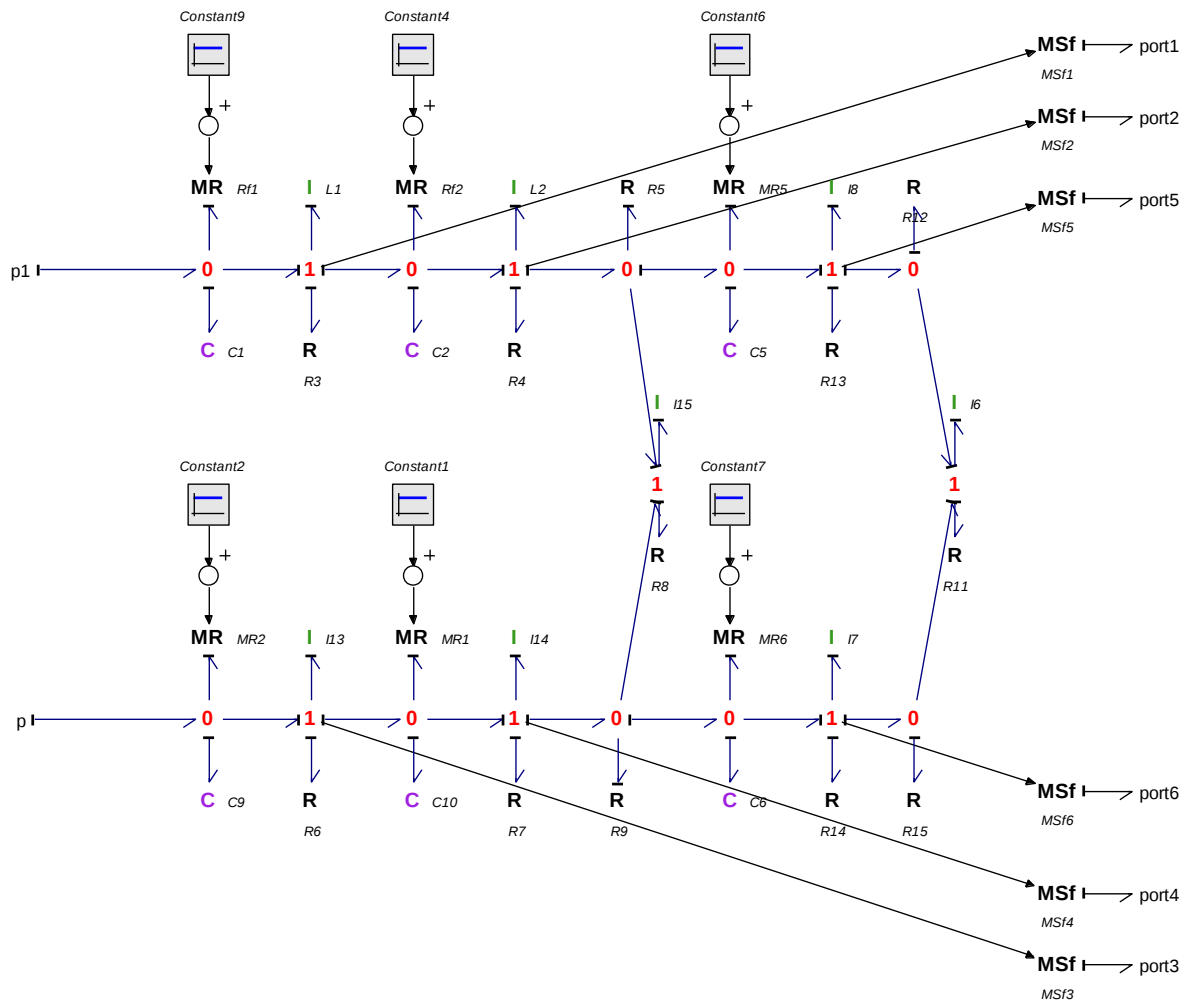


Fig. 5.3 Sistema hidráulico de seis tanques sin observador

La gráfica mostrada en la figura 5.4 proporciona el comportamiento del sistema hidráulico de la figura 5.2 al momento en que este sufre una falla instantánea en el primer tanque la cual inicia a los diez segundos de haber comenzando el funcionamiento del sistema y finaliza diez segundos más tarde; se observa en la figura 5.4 que cuando se presenta la falla los residuos obtenidos de cada uno de los tanques muestran que existe una falla, pero si se observa a detalle las respuestas de los dos primeros tanques se aprecia que la respuesta es negativa, llevando así a reducir las posibilidades para detectar la falla a solamente dos, ya sea que la falla exista en el primer o el segundo tanque.

Además de la falla instantánea producida en el tanque uno, también se introdujo una falla continua a éste de forma separada, la respuesta a ésta fuga se muestra en la figura 5.5 en la que se puede observar una respuesta similar de cada uno de los residuos de los

tanques, la única diferencia que existe es que la falla permanece durante todo el periodo dinámico del sistema.

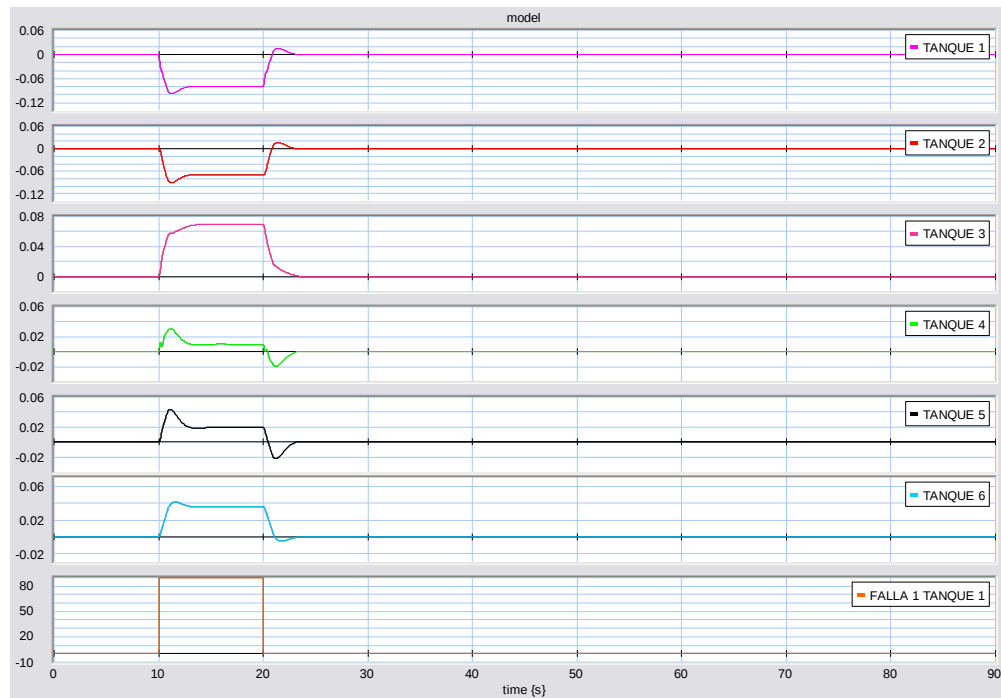


Fig. 5.4 Simulación de una falla tipo pulso en el tanque 1.

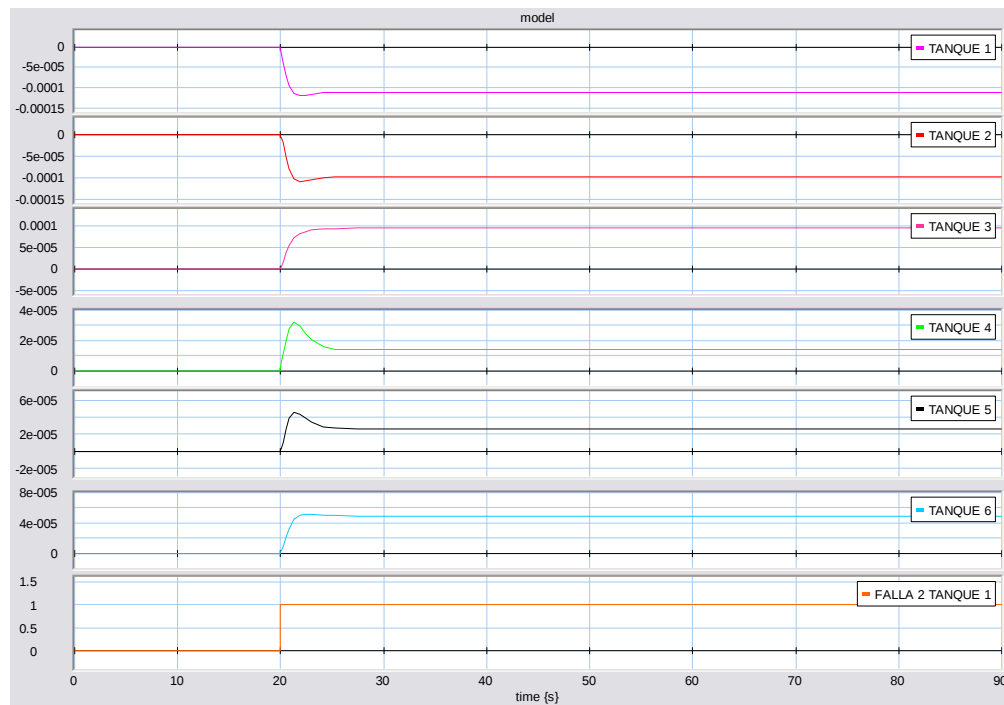


Fig. 5.5 Simulación de una falla tipo escalón en el tanque 1.

A continuación se introducen las fallas tipo pulso y escalón de forma separada en el segundo tanque, las respuestas de los residuos a estas fugas se presentan en la figura 5.6 y 5.7 respectivamente. En estas gráficas se puede apreciar que la fuga es detectada adecuadamente y a diferencia de la falla en el primer tanque, aquí se puede determinar que la falla se encuentra en el segundo tanque ya que la respuesta del residuo para este tanque es la única que es negativa a diferencia de las demás que son positivas.

La respuesta que se obtiene al presentarse la falla en el segundo tanque da pie a definir de manera más clara la figura 5.4, ya que al ver ésta figura ahora si se puede reducir la posibilidad a solamente una que la fuga de agua se encuentra en el primer tanque ya que si se presenta una fuga en el segundo tanque se obtendrá una respuesta negativa del residuo para el tanque dos como la mostrada en la figura 5.6 y 5.7.

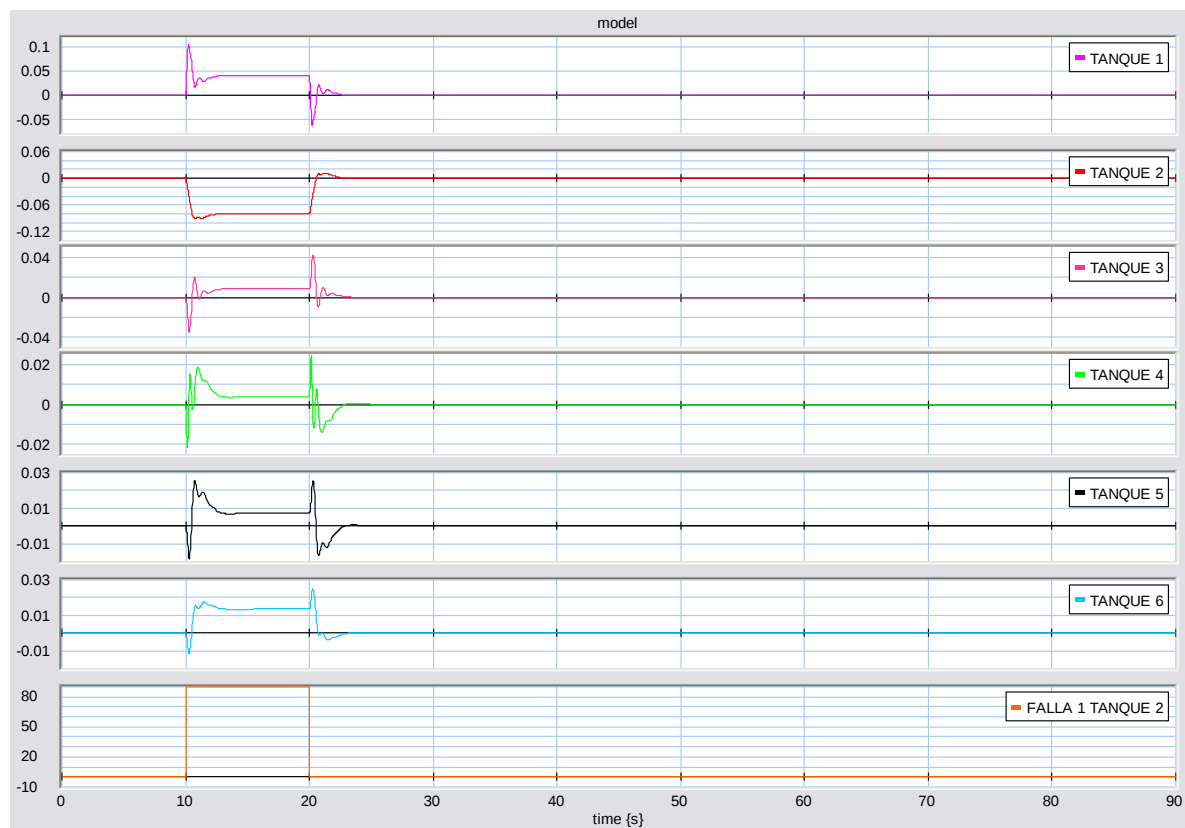


Fig. 5.6 Simulación de una falla tipo pulso en el tanque 2.

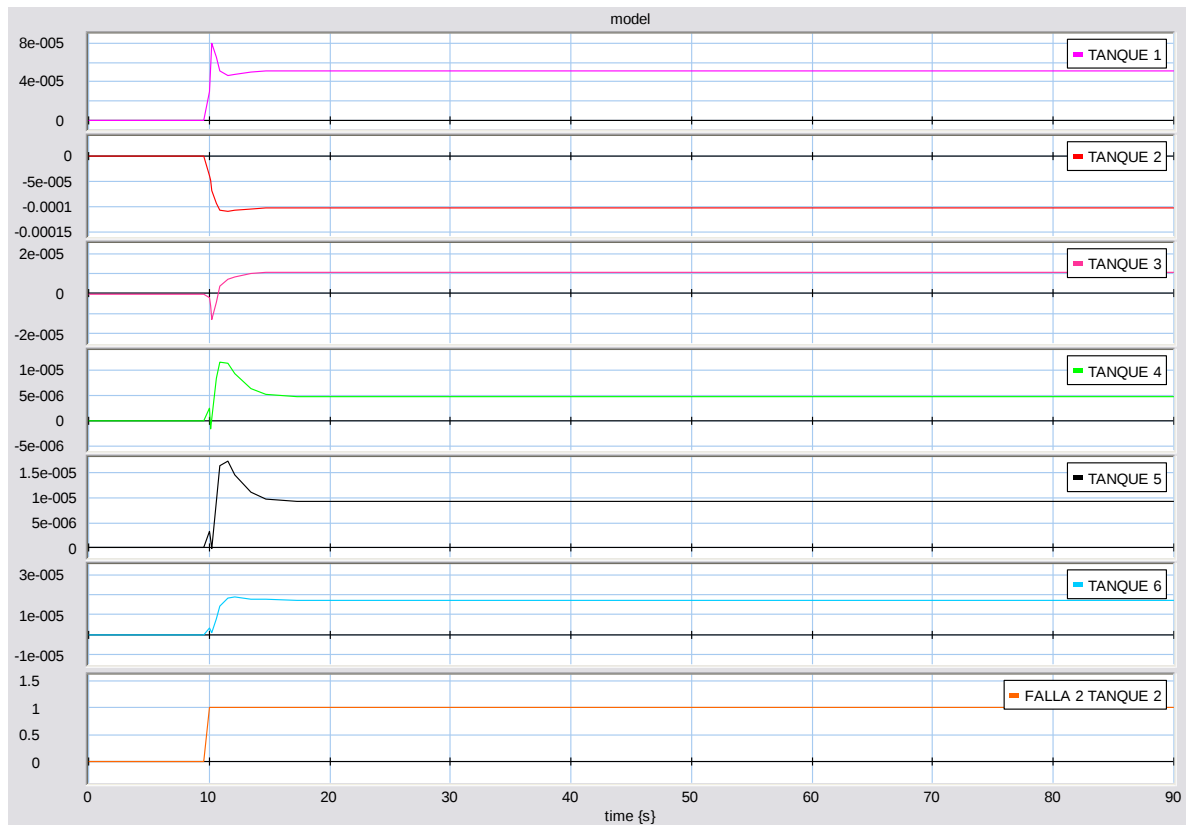


Fig. 5.7 Simulación de una falla tipo escalón en el tanque 2.

Al igual que en los dos casos anteriores enseguida se introducen dos fallas al tercer tanque cada una de forma independiente, las repuestas de los residuos a estas fugas se presentan en las figuras 5.8 y 5.9 las cuales muestran que la falla es detectada debido a los valores obtenidos en las respuestas de los residuos, más sin embargo, observando la respuesta obtenida para el tanque 3 se aprecia que es la única que tiene un valor negativo, esto indica que la falla se encuentra presente solamente en el tercer tanque descartando así la existencia de la falla en alguno de los restantes tanques.

Debido a las respuestas obtenidas cuando existe una fuga de agua en alguno de los primeros tres tanques, se puede definir claramente la existencia de la falla y además con solamente obtener las respuestas del sistema es posible identificar de forma exacta en cual de los seis tanques está presente la fuga.

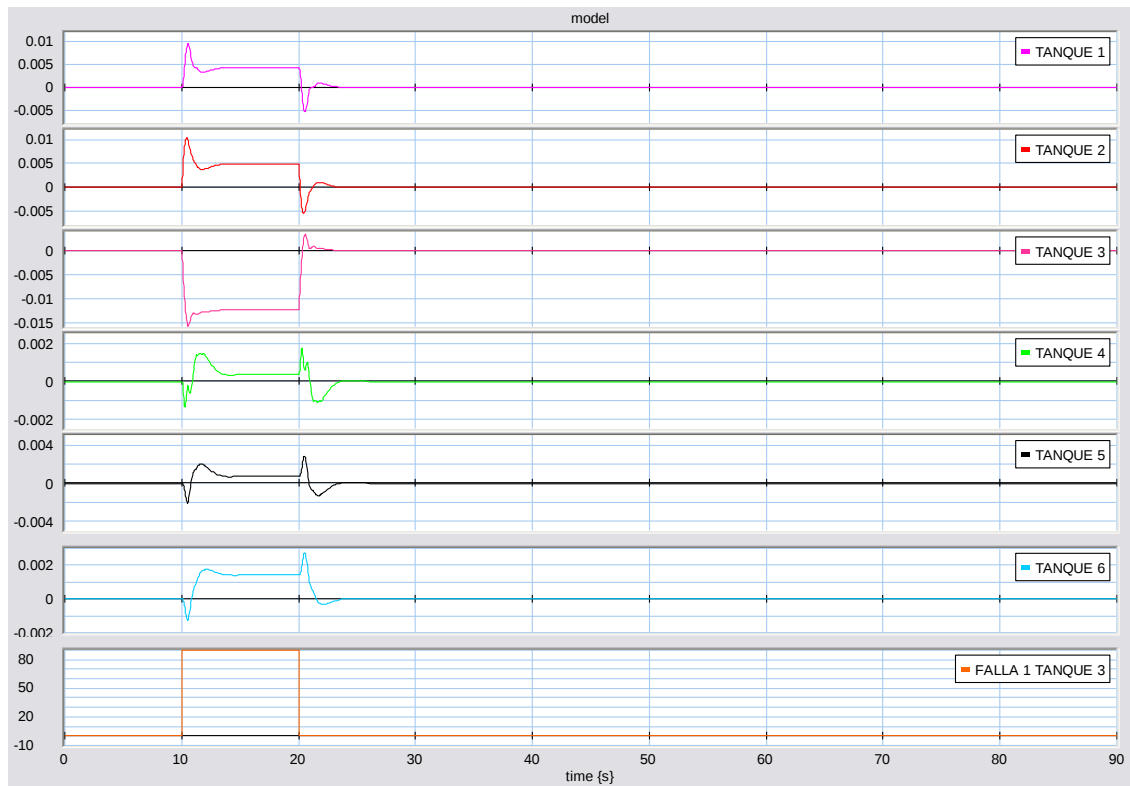


Fig. 5.8 Simulación de una falla tipo pulso en el tanque 3.

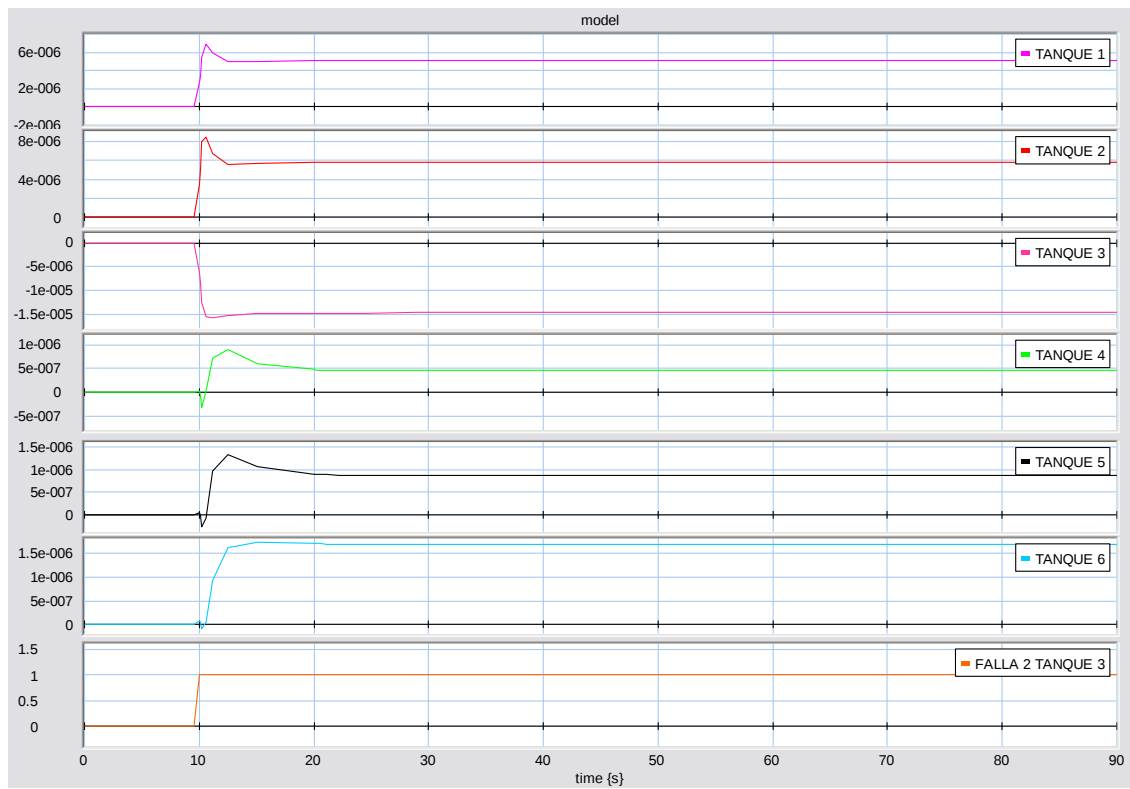


Fig. 5.9 Simulación de una falla tipo escalón en el tanque 3.

Continuando con la simulación de fallas en el sistema hidráulico enseguida se presenta el segundo bloque del sistema la cual tiene una fuente de flujo propia la cual abastece únicamente a los tanques 4, 5 y 6. Comenzando con el tanque 4 las figuras 5.10 y 5.11 proporcionan el comportamiento de todos los residuos del sistema hidráulico al momento de introducir la falla tipo pulso así como la de escalón respectivamente al cuarto tanque.

La falla existente en el cuarto tanque provoca que se obtengan una respuesta positiva en los residuos para los primeros tres tanques, por el contrario para los tanques 4, 5 y 6 la respuesta es negativa, esto conduce a eliminar la posibilidad de que la falla se encuentre en el primer bloque, de esta forma las opciones para poder definir donde se encuentra la falla se reducen solamente a los tres tanques del segundo bloque.

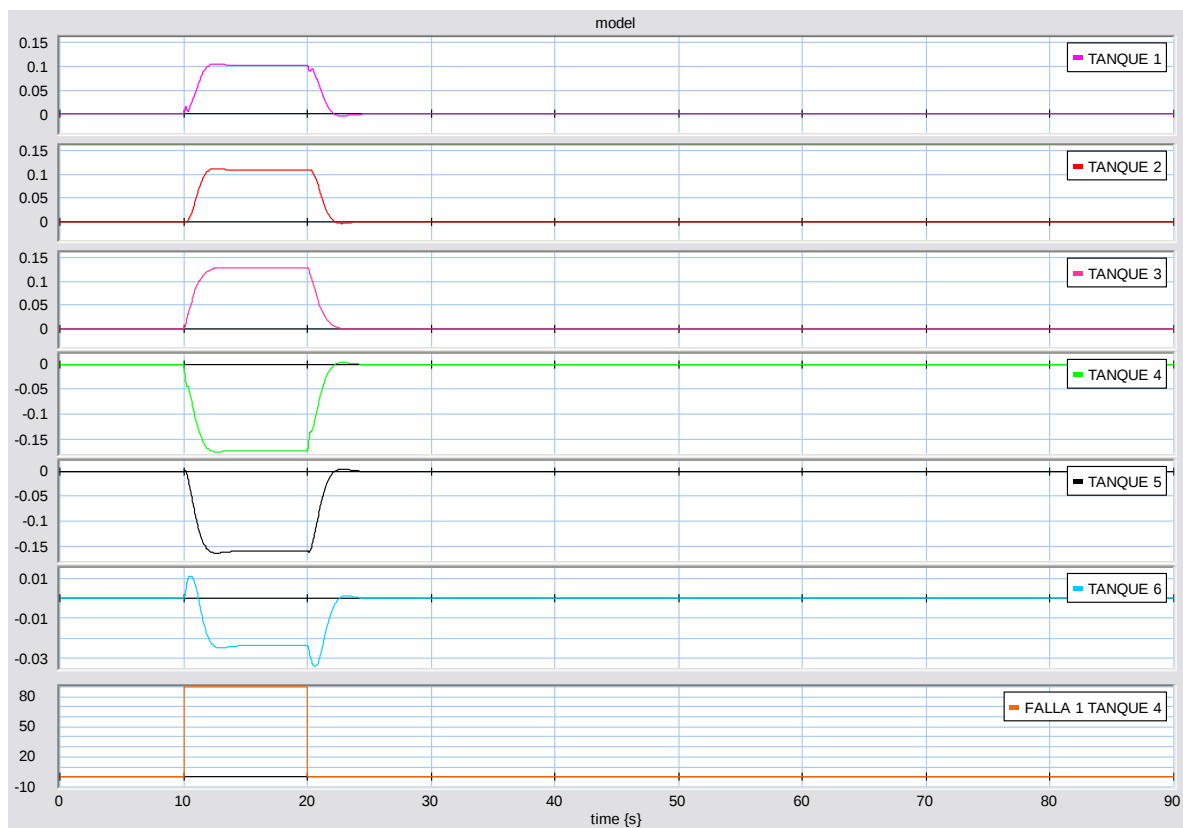


Fig. 5.10 Simulación de una falla tipo pulso en el tanque 4.

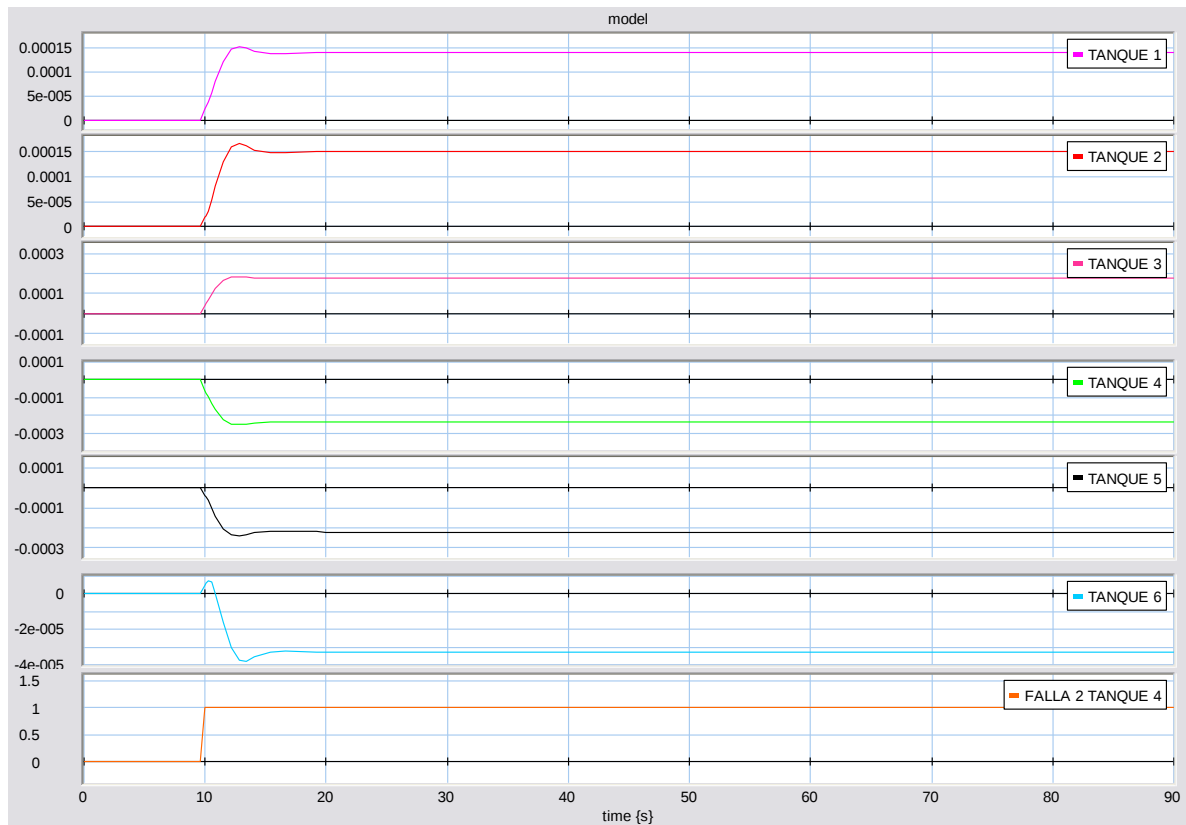


Fig. 5.11 Simulación de una falla tipo escalón en el tanque 4.

En las figuras 5.12 y 5.13 se encuentra expuestas las respuestas de los residuos derivadas de las fallas tipo pulso y escalón respectivamente, como se puede distinguir los residuos para los primeros tres tanques son positivos, de manera contraria para los tanques quinto y sexto esta respuesta se encuentra por debajo de cero al momento en que ocurre la fuga y para el cuarto tanque su respuesta es prácticamente cero por lo que no detecta la falla existente en el quinto tanque y a su vez se descarta como el posible tanque donde se encuentre la fuga.

De esta forma se eliminan cuatro posibilidades, dejando únicamente dos posibles opciones en las cuales pueda existir la fuga de agua, que para éste caso serían en el cuarto o quinto tanque. Si bien con las respuestas presentadas en las figuras 5.12 y 5.13 no es posible definir donde se encuentra la falla, si brinda la posibilidad de descartar la existencia de la falla en el quinto tanque en las figuras 5.10 y 5.11 ya que si así fuera, se tendrían respuestas similares a las que se obtuvieron en las figuras 5.12 y 5.13.

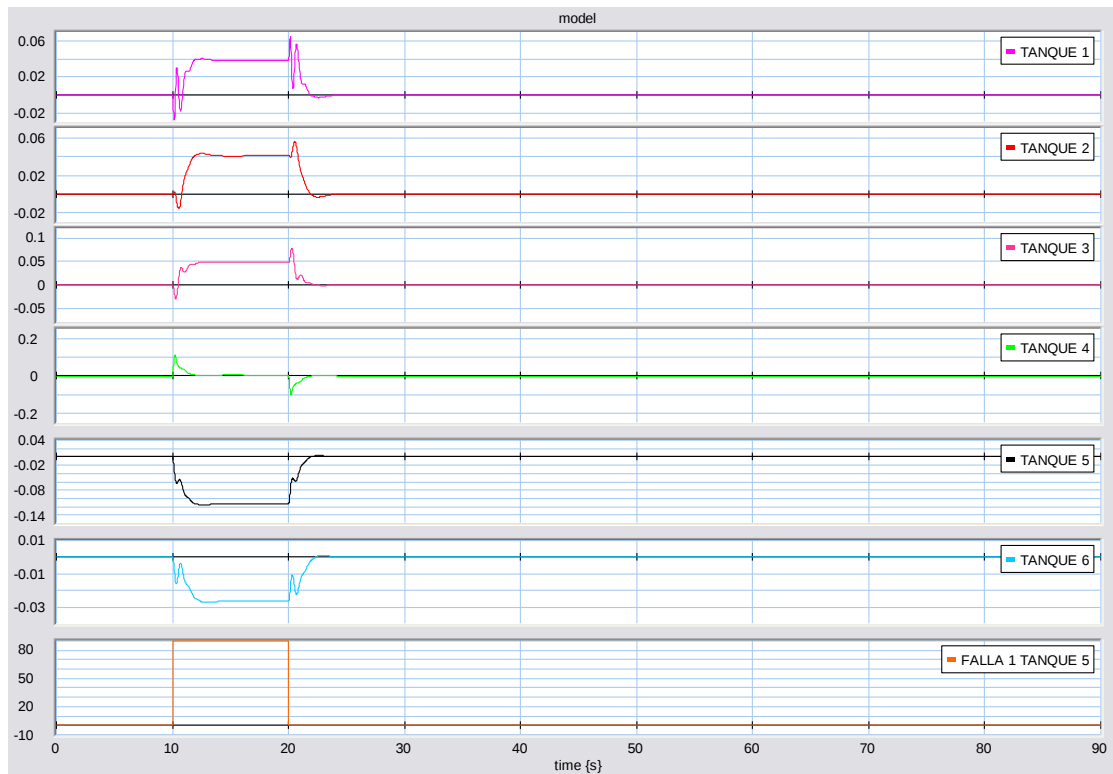


Fig. 5.12 Simulación de una falla tipo pulso en el tanque 5.

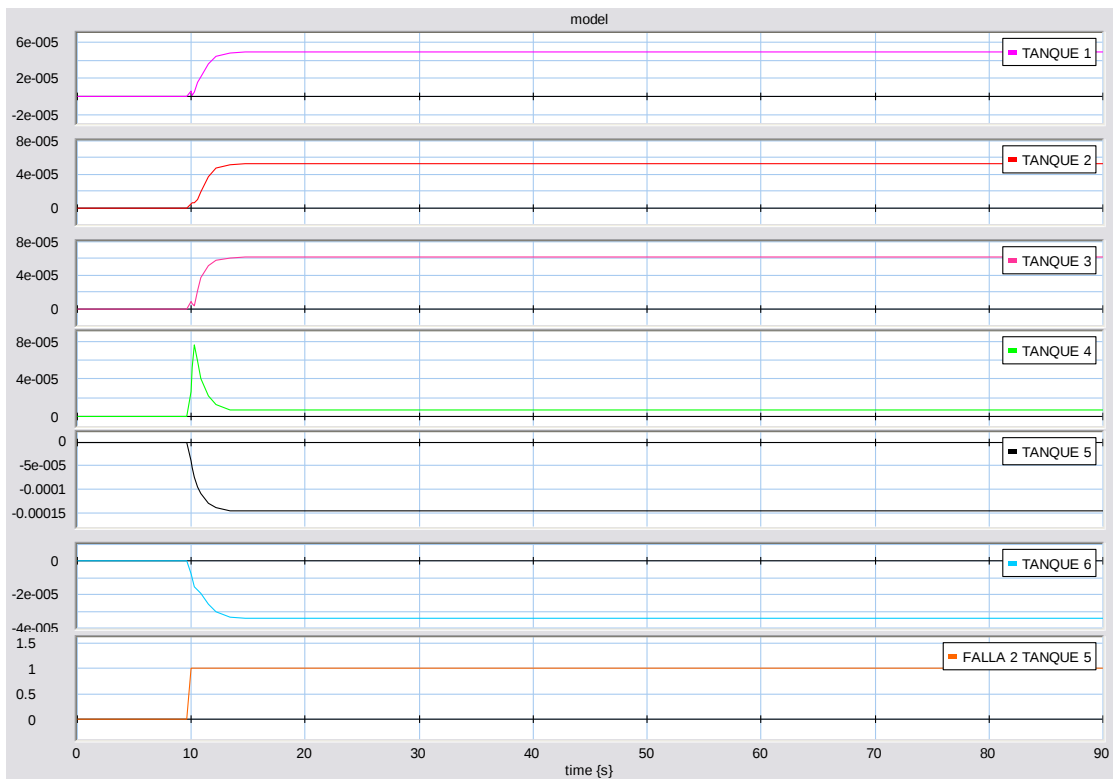


Fig. 5.13 Simulación de una falla tipo escalón en el tanque 5.

Por último, para finalizar este capítulo se presenta en las figuras 5.14 y 5.15 las respuestas de los residuos debido a dos fugas de agua simuladas de forma separada en el tanque 6, la primera de ellas dura diez segundos y la segunda es una fuga que permanece constante durante el periodo dinámico del sistema hidráulico.

Como se puede apreciar la falla provocada en el tanque número seis proporciona nuevamente residuos positivos para cada uno de los primeros tanques, más sin embargo, para los dos tanques que se encuentran dentro del mismo bloque donde ocurre la falla, que en éste caso es el segundo, la falla pasa prácticamente desapercibida.

Lo anterior brinda la pauta para poder identificar las fallas por medio de los sensores de caudal en cada uno de los tanques del segundo bloque al igual que se hizo con los tanques que conforman el primer bloque.

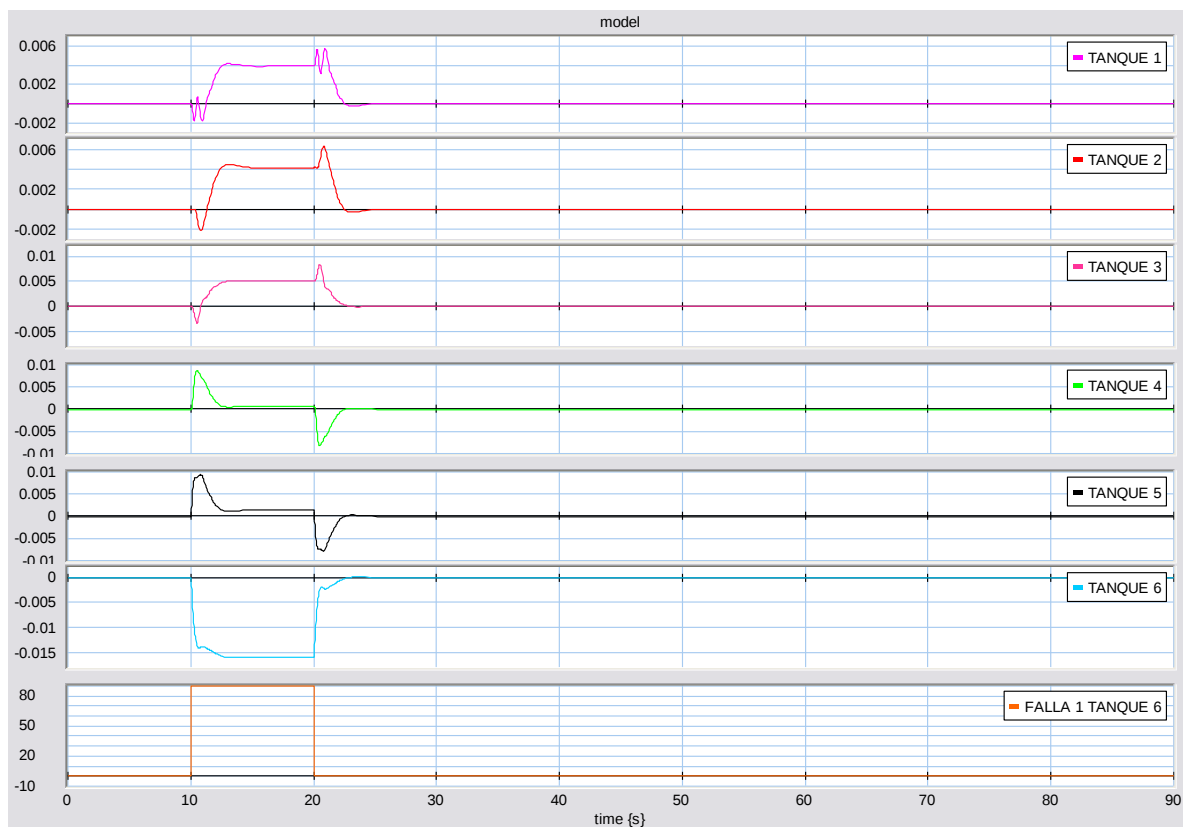


Fig. 5.14 Simulación de una falla tipo pulso en el tanque 6.

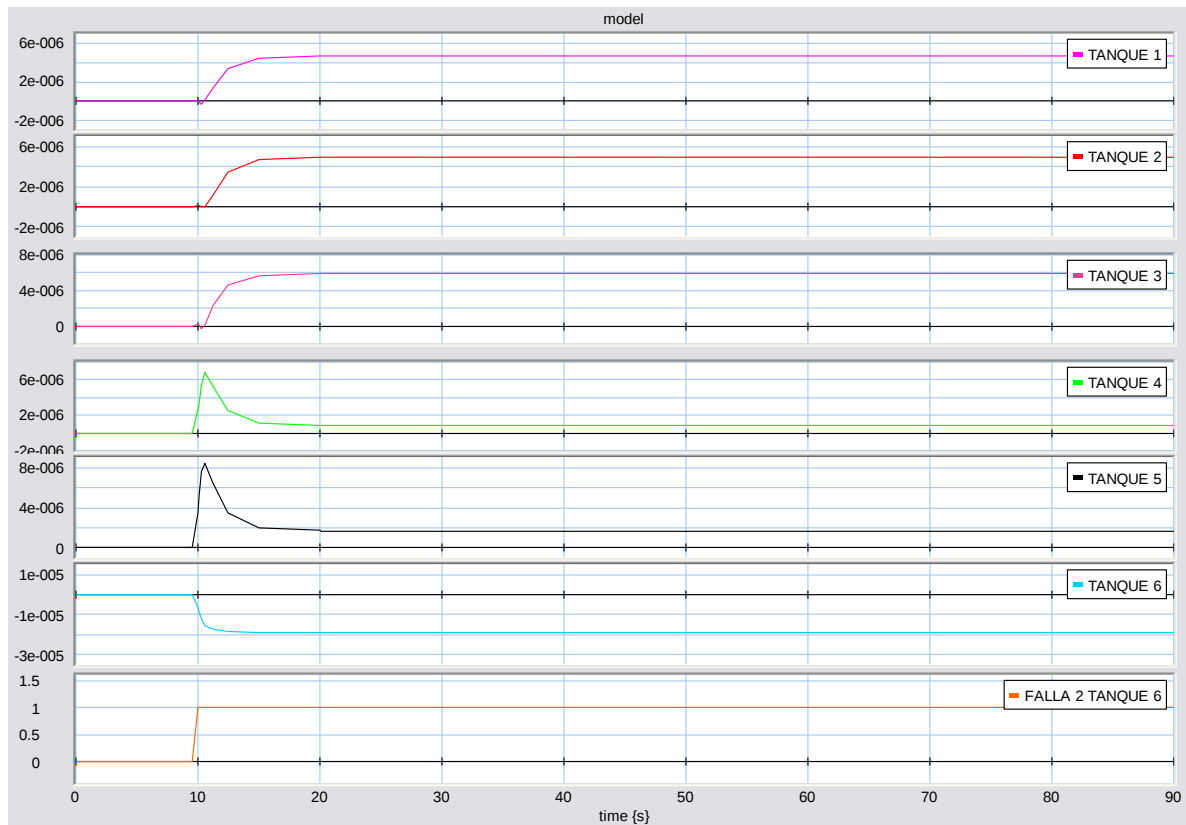


Fig. 5.15 Simulación de una falla tipo escalón en el tanque 6.

Por lo tanto, debido a que los resultados obtenidos han sido favorables para cada una de las pruebas hechas anteriormente, la detección de fallas en un sistema hidráulico formado por seis tanques, con resistencias e inductancias hidráulicas representa la posibilidad de descubrir que por medio de ésta técnica de modelado de sistemas, bond graph, permite su uso para el modelado de sistemas a gran escala donde no se debe olvidar que se tiene incluso el observador para cada una de las variables de estado del sistema, para el cual es necesario obtener el valor de las ganancias de los observadores de forma adecuada esto con la finalidad de poder lograr un sistema hidráulico estable además de obtener una respuesta favorable por parte de los residuos.

Capítulo 6. Conclusiones

Para el desarrollo de la presente investigación fue necesario en primer lugar el aprendizaje del método de bond graph, el cual como se pudo observar es una técnica sencilla y fácil de aplicar para modelar sistemas hidráulicos, debido a que solamente es indispensable la aplicación de algunos conocimientos básicos de este método para poder llevar a cabo el modelado.

Una vez obtenido el modelo del sistema hidráulico éste se elaboró en el programa de simulación 20-sim, éste programa ofrece la posibilidad de trabajar en un ambiente gráfico en el cual es posible arrastrar cada uno de los elementos que son necesarios para la elaboración del modelo, además de poder realizar sistemas complejos a través de bloques como por ejemplo el sistema hidráulico de seis tanques, con lo cual es posible tener una mejor organización del sistema.

A través de la técnica de bond graph y con ayuda del programa de simulación gráfico 20-sim fue posible el diseño del sistema hidráulico para dos tanques en serie y enseguida poder establecer un diagrama de conexión serie paralelo para n número de tanques. En cada uno de estos sistemas hidráulicos se simularon dos tipos de falla, la primera fue a través de una señal tipo pulso, esta falla representó una fuga de agua la cual dura solamente por algunos instantes; en segundo lugar se introdujo a cada uno de los tanques una fuga que se mantenía durante el tiempo dinámico del sistema a través de una señal tipo escalón.

Primeramente para el sistema hidráulico de dos tanques con el uso de sensores de caudal fue posible detectar cada una de las fallas de manera adecuada, además de poder identificar en cual de los dos tanques existía la falla a través de las respuestas de los residuos de los tanques ya que la respuesta negativa de la señal indicaba en cual tanque se encontraba la falla. A continuación para éste mismo sistema se utilizaron sensores de presión los cuales de manera acertada detectaban de igual forma las fallas pero a diferencia de las respuestas obtenidas con los sensores de caudal, se pudo observar que el introducir una falla en el primer tanque afecta tanto la respuesta para el primer tanque como para el

segundo, más sin embargo al simular la fuga en el segundo de los tanques la respuesta en el primero de ellos prácticamente no se ve alterada.

Si bien las respuestas de los residuos obtenidas para un sistema hidráulico con dos tanques a través de un tipo de sensor y otro son diferentes, es posible detectar las fallas con ambos sensores más sin embargo para identificar de mejor forma en cual tanque se encuentra la falla las respuestas determinadas con sensores de caudal son una mejor opción.

En cuanto a la conexión del sistema hidráulico de seis tanques elaborado en el capítulo 5, fue posible determinar la existencia de las fugas dentro del sistema sin importar la clase de falla que estuviera presente, además a través de los resultados de los residuos obtenidos de las pruebas realizadas a cada uno de los tanques que conforman el sistema condujo a ubicar en cual de ellos se encontraba la fuga.

La detección de fallas para este sistema de gran escala se logró solamente por medio del empleo de sensores de caudal ya que al momento de utilizar sensores de presión el sistema hidráulico se comportó de manera inestable debido a que las respuestas de los residuos tendían al infinito así que se recalcularon las ganancias del observador más sin embargo, al realizar nuevamente las pruebas los resultados no fueron los esperados ya que no fue posible detectar ninguna de las fallas aplicadas al sistema.

Debido a los resultados obtenidos en el sistema hidráulico de seis tanques a través del uso de sensores de presión y caudal da paso para establecer que estos últimos son la mejor opción para la detección de fallas no solamente de seis tanques sino de n número de tanques los cuales deben seguir la misma metodología en cuanto a la conexión establecida en la figura 5.1 para poder llevar a cabo el proceso de detección de fallas de manera exitosa. Es importante señalar que aparte de identificar cuales son los sensores adecuados para la detección de fallas, se establece que la aplicación de la metodología de bond graph para la detección de fallas por residuos utilizando observadores de estado es un nuevo método efectivo aplicable a sistemas hidráulicos de ésta naturaleza, constituyendo una opción efectiva alterna a los métodos utilizados tradicionalmente los cuales requieren de procedimientos matemáticos más complicados y prolongados.

Bibliografía

1. A. Mukherjee, Bond Graph in Modeling, Simulation and Fault Identification, Wadala, Mumbai, India: I.K. International Publishing House Pvt. Ltd, 2006.
2. N. S. Nise, Sistemas de Control para Ingeniería, Mexico: Compañía Editorial Continental.
3. K. Ogata, Ingeniería de Control Moderna, México: Prentice Hall Hispanoamericana, S.A., 1998.
4. G. González y I. Nuñez, "Fault Detection using an Observer-based Method of a hydraulic system: A bon Graph Approach".
5. G. González y R. Galindo, "Direct Control in Bond Graph by State Estimated Feedback for MIMO LTI Systems", *IEEE*, págs. 1183-1188, Septiembre 2002
6. H. Higo y K. Yamamoto, "Bondgraph Analysis on Pressure Fluctuation in Hydraulic Pipes", *IEEE*, págs. 1556-1561, Febrero 2000