

Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico

Subdirección Académica

Departamento de Ingeniería Electrónica

TESIS DE MAESTRÍA EN CIENCIAS

**Detección y Aislamiento de Fallas Basados en Modelos Bond-Graph.
Caso de Estudio de un Intercambiador de Calor con Flujo a Contracorriente**

presentada por

Ing. Leonardo Daniel Rodríguez González

como requisito para la obtención del grado de
Maestro en Ciencias en Ingeniería Electrónica

Directora de tesis

Dra. Ma. Guadalupe López López

Codirector de tesis

Dr. Víctor Manuel Alvarado Martínez

Cuernavaca, Morelos, México. Febrero de 2016.

Cuernavaca, Mor., 27 de enero de 2016

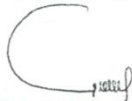
OFICIO No. DIE/019/2016.

Asunto: Aceptación de documento de tesis.

DR. GERARDO VICENTE GUERRERO RAMÍREZ
SUBDIRECTOR ACADÉMICO
PRESENTE

Por este conducto, los integrantes de Comité Tutorial del **C. Leonardo Daniel Rodríguez González** con número de control **M13CE086** de la Maestría en Ciencias en Ingeniería Electrónica, le informamos que hemos revisado el trabajo de tesis profesional titulado **"DETECCIÓN Y AISLAMIENTO DE FALLAS BASADOS EN MODELOS BOND-GRAPH. CASO DE ESTUDIO DE UN INTERCAMBIADOR DE CALOR CON FLUJO A CONTRACORRIENTE"** y hemos encontrado que se han realizado todas las correcciones y observaciones que se le indicaron, por lo que hemos acordado aceptar el documento de tesis y le solicitamos la autorización de impresión definitiva.

DIRECTOR DE TESIS



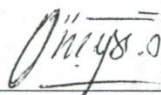
Dra. Ma. Guadalupe López López
Doctora en Ciencias en Ingeniería Química
Cédula profesional **7980045**

CODIRECTOR DE TESIS



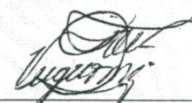
Dr. Víctor Manuel Alvarado Martínez
Doctor en Ciencias en Ingeniería
Electrónica
Cédula profesional **8031070**

REVISOR 1



M.C. Enrique Quintero-Mármol Márquez
Maestro en Ingeniería (Especialidad en
Sistemas de Proceso)
Cédula profesional **2356594**

REVISOR 2



Dr. Gerardo Vicente Guerrero Ramírez
Doctor en Ingeniería
Cédula profesional **3431842**

C.p. Lic. Guadalupe Garrido Rivera.- Jefa del Departamento de Servicios Escolares.
Estudiante
Expediente

CMAZ/lrr.

SEP

SECRETARÍA DE
EDUCACIÓN PÚBLICA



TECNOLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO
Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico

Cuernavaca, Mor., 28 de enero de 2016
OFICIO No. SAC/080/2016

Asunto: Autorización de impresión de tesis

ING. LEONARDO DANIEL RODRÍGUEZ GONZÁLEZ
CANDIDATO AL GRADO DE MAESTRO EN CIENCIAS
EN INGENIERÍA ELECTRÓNICA
PRESENTE

Por este conducto, tengo el agrado de comunicarle que el Comité Tutorial asignado a su trabajo de tesis titulado **"Detección y Aislamiento de Fallas Basados en Modelos Bond-Graph. Caso de Estudio de un Intercambiador de Calor con Flujo a Contracorriente"**, ha informado a esta Subdirección Académica, que están de acuerdo con el trabajo presentado. Por lo anterior, se le autoriza a que proceda con la impresión definitiva de su trabajo de tesis.

Esperando que el logro del mismo sea acorde con sus aspiraciones profesionales, reciba un cordial saludo.

ATENTAMENTE

"CONOCIMIENTO Y TECNOLOGIA AL SERVICIO DE MEXICO"



CENTRO NACIONAL DE
INVESTIGACIÓN Y
DESARROLLO
TECNOLÓGICO
SUBDIRECCIÓN
ACADÉMICA

DR. GERARDO VICENTE GUERRERO RAMÍREZ
SUBDIRECTOR ACADÉMICO

C.p. Lic. Guadalupe Garrido Rivera.- Jefa del Departamento de Servicios Escolares.
Expediente

GVGR/mcr

Dedicatoria

Esta tesis no podría estar dedicada para nadie más que para quien se la ha ganado a pulso, hace 21 años ella inició un proyecto educativo, que hoy ve una tapa más finalizada, un proyecto que para ella termina con este documento de tesis de maestría, esta tesis está dedicada única y exclusivamente a la mujer que ha dado todo para llegar hasta este momento, la mujer que me ha dado todo, que con paciencia me ha enseñado sus valores, la responsabilidad, la dedicación, el compromiso, la valentía, la perseverancia, la humildad, pero sobre todo su vida podría describirse como una obra de amor. Hoy quiero dedicar esta tesis a la mujer que hoy alcanza un grado más, a la mujer que todos los días se levantó para enviarme a la escuela, la mujer que todos los días me puso mi almuerzo, la mujer que no me dejó rendirme cuando sentí que ya no podía continuar, la mujer que veló mis noches de enfermedad, la mujer que dedica su vida a servir a los demás sin esperar nada a cambio, la mujer que todos los días entrega su vida por amor a mí. Esta tesis y el logro que con ella se alcanza están dedicados a mi mamá.

Agradecimientos

A mi mamá, la mejor mamá del mundo, la que me ha dado todo, y porque gracias a ella estoy donde estoy y soy lo que soy.

A mi abuela, por haber sido mi primera profesora de electrónica, te extraño mucho, te quiero mucho y desde el cielo espero que estés orgullosa de mí.

A mis primos, por ser mis compañeros de aventuras en la infancia, ahora que hemos crecido me da gusto ver que seguimos tan unidos como siempre. Gracias a Lili por ser siempre mi ejemplo a seguir, te quiero mucho hermanita.

A mis tíos y tías, por siempre estar ahí para mí, por permanecer unidos a pesar de la adversidad y las diferencias, por aceptar mi forma de ser y mis decisiones, por acompañarme en el camino.

A mi novia, por ser mi fuente de motivación e inspiración para soportar el día a día, gracias por tu paciencia y cariño a lo largo de estos años, te amo.

A mis compañeros y amigos, Diego Carbot, Moisés Ramos, Iris Jazmín, Marcos López, Luis Antonio Regalado, Juan Pablo Castillo, Abraham Jashiel, Juan Carlos Flores, Ricardo Valdivia, Gabriel Zúñiga, Audomaro Durán, Leonardo Carlos Orozco, Jesús Reyes, Susana Haydee, Didhier Montiel, Montserrat Alegría, Juan Joaquín, Adriana Méndez, Ricardo Schacht, Omar Arellano, Ángel Figueroa, Esteban Mota, Alan Cruz, Cinda Luz, Jesse Rumbo, Gloria Lilia Osorio, Felipe Torres, Betty López, Jarniel García, Eusebia Guerrero, Ivonne Guerrero, Oscar Gutiérrez, Adrián Velázquez, Saúl Beltrán, César Octavio, Daniel Robles, Patricia Vázquez, Angélica González, Jorge Mastache, Ernesto Neri, Genaro Ixmatlahua, Luis Canche, Jesús Namigtle y Paulina Gutiérrez.

A mis profesores, gracias especialmente al profesor Ing. J. Fidel Flores Buendía quien inculcó en mí el gusto por las ciencias, a mis profesores del Tecnológico de Zacatepec, M.C. Rosember Ovando, Ing. José Alfonso Santana, Dr. Oscar Sarmiento, M.C. Arturo Martínez Mata. Muy especialmente quiero agradecer al profesor Ing. Rigoberto Silva Martínez a quien recuerdo con mucho cariño.

A mis profesores de la maestría, Dr. Juan Reyes Reyes, Dr. Alejandro Rodríguez Palacios, Dr. Carlos Daniel García Beltrán, Dr. Manuel Adam Medina, Dr. Gerardo Vicente Guerrero Ramírez, Dr. Carlos Astorga Zaragoza, Dr. Luis Gerardo Vela Valdés, Dr. Ricardo Fabricio Escobar, Dr. Víctor Manuel Alvarado Martínez y Dra. María Guadalupe López López.

A mis asesores, por su paciencia y enseñanzas, la Dra. María Guadalupe López López y el Dr. Víctor Manuel Alvarado Martínez.

A mis revisores, el Dr. Gerardo Vicente Guerrero Ramírez, el Dr. Enrique Quintero-Mármol Márquez y el Dr. José Francisco Gómez Aguilar.

A la Lic. Lorena Ruíz Ramírez, por todo su gran apoyo, por sus palabras de aliento y sobre todo por brindarme su amistad.

A CENIDET, por darme la oportunidad de realizar mis estudios de maestría

A CONACYT, por el apoyo económico que permitió que pudiera estudiar el programa de maestría.

A Dios, porque a pesar de todas las razones dadas por la ciencia, no hay razón más grande que la que encuentro en Dios.

RESUMEN

En esta tesis se exploran la detección y el aislamiento de fallas (FDI) como una opción para garantizar la seguridad y la confiabilidad de procesos químicos industriales, se desarrolla un modelo en pseudo-Bond-Graph de un intercambiador de calor de tubos concéntricos con flujo a contracorriente, dicho equipo se dimensiona con base en algoritmos reportados de la literatura, basándose en las necesidades de enfriamiento que se requieren, el objetivo del equipo es enfriar aceite de oliva a una temperatura de salida deseada, haciendo uso de agua fría como líquido de enfriamiento, el agua circula por el tubo externo mientras que el aceite circula por el tubo interno. La temperatura de salida del aceite se controla manipulando una válvula de control de flujo a la entrada del tubo externo. Se dimensiona la válvula de control de flujo de agua con base en los requerimientos de flujo necesarios para controlar la temperatura de salida del aceite a la salida del tubo interno del intercambiador de calor. Se hace uso de un modelo dinámico de válvula de primer orden que también se modela a través de pseudo-Bond-Graph, se desarrollan los modelos en un esquema de simulación tanto en función-S como con la librería BGv2.1 para MATLAB Simulink. Se realizan fallas en un parámetro, en sensores, y en un actuador. Se exploran las metodologías tanto cuantitativas como cualitativas a través de enfoques como lo son modelo paralelo y árboles de fallas. Es posible a través del esquema FDI detectar y localizar la causa de hasta 6 fallas utilizando 3 sensores. El controlador es un controlador PID el cual no realiza ninguna reconfiguración o reacomodo ante alguna falla, ya que esto no se incluye en los objetivos de la tesis.

ABSTRACT

In this thesis are explored the fault detection and isolation (FDI) as an option to guarantee the safety and reliability of industrial chemical process, it is developed a pseudo-Bond-Graph model of a counter flow concentric tubes heat exchanger, this equipment is dimensioned based on algorithms reported in the literature, focusing on the required cooling needs, the objective of the equipment is to cool down olive oil to a desired output temperature, using cool water as cooling liquid, the water runs through the external tube while the oil runs through the internal tube. The output oil temperature is controlled by manipulating the control flow valve at the begging of the external tube. The water flow control valve is dimensioned based on the flow requirements needed to control the output oil temperature at the end of the internal tube of the heat exchanger. A valve first order dynamic model is used, and that is also modeled through pseudo-Bond-Graph, the models are developed in a simulation scheme using function-S as well as the BGv2.1 MATLAB Simulink library. Faults are induced in one parameter, three sensors, and one actuator. Here are explored the quantitative and qualitative methodologies by the use of reference parallel model and fault threes. It is possible throw the FDI scheme to detect and isolate up to 6 faults using 3 sensors. The controller is a PID controller which does not do any reconfiguration or accommodation task, given that it was planned that way since the begging of the thesis.

Contenido

Lista de Figuras.....	IV
Lista de Tablas	VII
1. Capítulo 1 - Introducción.....	1
1.1 Introducción	1
1.2 Planteamiento del problema	4
1.3 Justificación	4
1.4 Estado del Arte	5
1.5 Objetivos	8
1.5.1 Objetivo General.....	8
1.5.2 Objetivos Específicos.....	8
1.6 Marco Teórico	8
1.6.1 Diagnóstico de fallas	8
1.6.2 Intercambiador de calor	20
1.6.3 Bond Graph	22
2. Capítulo 2 – Modelo dinámico del intercambiador de calor.....	33
2.1 Descripción del proceso	33
2.1.1 Procedimiento para dimensionar el intercambiador de calor	33
2.1.2 Cálculo del coeficiente global de transferencia de calor	34
2.1.3 Definición de condición de operación nominal y parámetros del intercambiador de calor	39
2.2 Obtención del modelo del intercambiador de calor en ecuaciones diferenciales	44
2.2.1 Consideraciones de modelado	44
2.2.2 Balances de materia	45
2.2.3 Balances de energía	46
2.3 Modelado del intercambiador de calor por el método de Bond Graph	47

2.4	Simulaciones del modelo Bond Graph mediante la librería para MATLAB Simulink.....	52
3.	Capítulo 3 – Lazo de control del intercambiador de calor	61
3.1	Sistema de control.....	61
3.2	Descripción de la válvula de control.....	61
3.3	Dimensionamiento de la válvula de control.....	62
3.4	Modelo dinámico de la válvula de control.....	65
3.5	Sintonización del controlador.....	71
3.6	Simulación del proceso en lazo cerrado.....	72
4.	Capítulo 4 – Detección y aislamiento de fallas basado en el modelo Bond Graph del intercambiador de calor	79
4.1	Introducción.....	79
4.1.1	Fallas consideradas	80
4.2	Generación de residuos para la detección de fallas.....	82
4.2.1	Definición de los umbrales	83
4.2.2	Condiciones de simulación de las fallas	87
4.2.3	Método de construcción de la matriz de fallas.....	87
4.3	Matriz de fallas.....	89
4.3.1	Análisis de aislabilidad.....	91
4.4	Árboles de fallas	93
4.4.1	Método de construcción de los árboles de fallas.....	93
4.4.2	Método de selección del candidato de falla	101
5.	Capítulo 5 – Conclusiones, aportaciones y trabajos futuros.....	111
5.1	Conclusiones.....	111
5.2	Aportaciones	113
5.3	Trabajos futuros.....	114
	Bibliografía.....	115
6.	Apéndices.....	120
a)	Apéndice A – Guía para el uso de la librería BGv2.1 de MATLAB Simulink	120
b)	Apéndice B - Simulación de las fallas	124
	B.1 - Falla de atascamiento de la válvula en un punto superior al deseado.....	124

B.2 - Falla de atascamiento de la válvula en un punto inferior al deseado	126
B.3 - Falla en el sensor de flujo de aceite a la entrada (lectura superior a la real)....	128
B.4 - Falla en el sensor de flujo de aceite a la entrada (lectura inferior a la real)	130
B.5 - Falla en el sensor temperatura del agua a la entrada del intercambiador (lectura superior a la real).....	132
B.6 - Falla en el sensor temperatura del agua a la entrada del intercambiador (lectura inferior a la real)	134
B.7 - Falla en el sensor temperatura del aceite a la entrada del intercambiador (lectura superior a la real)	136
B.8 - Falla en el sensor temperatura del aceite a la entrada del intercambiador (lectura inferior a la real).....	138
B.9 - Falla de ensuciamiento en la pared del tubo interno del intercambiador de calor.	139
c) Apéndice C - Construcción de los árboles de fallas	141

Lista de Figuras

Figura 1.1 - Clasificación de las fallas	11
Figura 1.2 - Esquema de la metodología de FDI	16
Figura 1.3 - Generación de residuos mediante un modelo en paralelo	17
Figura 1.4 - Clasificación de los Intercambiadores de calor	21
Figura 1.5 - Enlaces de Bond Graph	24
Figura 1.6 - Representación de un enlace Bond Graph asociado a un elemento	25
Figura 1.7 - Vínculo en serie	28
Figura 1.8 - Vínculo en paralelo	28
Figura 1.9 - Causalidad. El elemento A aplica un esfuerzo en B, lo que implica que un flujo actúa de B hacia A.	29
Figura 1.10 - Causalidad estructural en un elemento transformador – colocada en los extremos derechos de los enlaces. ...	30
Figura 1.11 - Causalidad estructural en un elemento transformador – colocada en los extremos izquierdos de los enlaces. ...	30
Figura 2.1 - Transferencia de calor por conducción en un volumen de control. Coordenadas cilíndricas	35
Figura 2.2 - Representación del coeficiente global de transferencia de calor como una suma de resistencias térmicas en serie	37
Figura 2.3 - Diferencia de temperaturas (eje y) en el intercambiador de calor a lo largo del eje axial x, para configuración de flujo a contracorriente.	39
Figura 2.4 - Algoritmo de dimensionamiento del Intercambiador de calor	40
Figura 2.5 - Diagrama de un intercambiador de calor de longitud L operando a contracorriente, con válvula de control	41
Figura 2.6 - Vista transversal de un intercambiador de calor de tubos concéntricos	41
Figura 2.7 - Representación en Bond-Graph de la fuente de esfuerzo (temperatura a la entrada) de agua	47
Figura 2.8 - Representación en Bond-Graph de la capacitancia térmica del tubo externo	47
Figura 2.9 - Representación en Bond-Graph del flujo de energía debida al flujo de agua a la entrada del tubo externo	48
Figura 2.10 - Representación en Bond-Graph del flujo de energía debida al flujo de agua a la salida del tubo externo	48
Figura 2.11 - Representación en Bond-Graph de la fuente de esfuerzo (temperatura a la entrada) de aceite	48
Figura 2.12 - Representación en Bond-Graph de la capacitancia térmica del tubo interno	48
Figura 2.13 - Representación en Bond-Graph del flujo de energía debida al flujo de aceite a la entrada del tubo interno	49
Figura 2.14 - Representación en Bond-Graph del flujo de energía debida al flujo de agua a la salida del tubo externo	49
Figura 2.15 - Representación en Bond-Graph de la resistencia térmica en la pared del tubo interno	49
Figura 2.16 - Representación en Bond-Graph de la fuente de flujo de agua	50
Figura 2.17 - Representación en Bond-Graph de la fuente de flujo de aceite	51
Figura 2.18 - Modelo en Bond Graph del intercambiador de calor de flujo a contracorriente en lazo abierto	52
Figura 2.19 - Esquema de Simulink utilizando una función S para simular la dinámica del intercambiador de calor	53
Figura 2.20 – Dinámica del intercambiador de calor en lazo abierto ante perturbaciones en el flujo y en la temperatura de aceite. Simulación en Simulink	53
Figura 2.21 - Esquema de la simulación en la librería BGv2.1 de un intercambiador de calor de flujo a contracorriente.	54
Figura 2.22 - Dinámica del intercambiador de calor en lazo abierto ante perturbaciones en el flujo y en la temperatura de aceite. Simulación con la librería BGv2.1	54
Figura 2.23 - Respuesta de Toil ante un escalón en la temperatura de aceite a la entrada a diferentes condiciones de ensuciamiento	59
Figura 2.24 - Respuesta de Toil ante un escalón en la temperatura de agua a la entrada a diferentes condiciones de ensuciamiento	59
Figura 2.25 - Respuesta de Toil ante un escalón en flujo de aceite a la entrada a diferentes condiciones de ensuciamiento	60
Figura 3.1 - Esquema de control del proceso de intercambiador de calor	61
Figura 3.2 - Diferentes características de válvula	63
Figura 3.3 - Característica de flujo volumétrico de válvula y apertura de la válvula	65
Figura 3.4 - Respuesta dinámica de una válvula de control ante un escalón	69
Figura 3.5 - Modelo Bond-Graph causal de la válvula de control	70
Figura 3.6 - Modelo en Bond Graph del intercambiador de calor de flujo a contracorriente, con válvula de control y controlador	71
Figura 3.7 - Resultados de un escalón aplicado a la referencia de temperatura de aceite con un controlador sintonizado por (a) el método de ZN, (b) el método de CHR	72
Figura 3.8 - Esquemas de simulación en Simulink de a) Esquema General b) Modelo simulado del intercambiador de calor c) Modelo simulado de la válvula	73
Figura 3.9 - Respuesta del intercambiador de calor en lazo cerrado ante perturbaciones en las entradas	74
Figura 3.10 - Temperaturas de salida del intercambiador de calor a 4 meses de ensuciamiento	77
Figura 3.11 - Temperaturas de salida del intercambiador de calor a 6 meses de ensuciamiento	77
Figura 3.12 - Temperaturas de salida del intercambiador de calor a 12 meses de ensuciamiento	77

Figura 4.1 - Metodología de diagnóstico de fallas.....	79
Figura 4.2 - Esquema de simulación de fallas.....	81
Figura 4.3 - Esquema de simulación para generación de residuos desarrollado en Simulink.....	82
Figura 4.4 - Comparación de las señales de salida del intercambiador de calor ante una falla de atascamiento en la válvula de control.....	88
Figura 4.5 - Comparación de los residuos generados ante una falla de atascamiento en un punto superior al requerido en la válvula de control.....	88
Figura 4.6 - Residuos filtrados por el umbral, generados debido a una falla de atascamiento en un punto superior al requerido, en la válvula de control de flujo de agua.....	89
Figura 4.7 - Modelo en Bond Graph del intercambiador de calor.....	96
Figura 4.8 - Árboles de fallas para (a) Toil+ (b) Toil- (c) Tw+ (d) Tw- (e) Woil+ (f) Woil-.....	100
Figura 4.9 - Árboles de fallas para Toil- y Tw-.....	102
Figura 6.1 - Ventana de toolbox de Simulink, conteniendo la librería de simulación con los bloques de Bond-Graph BGv2.1.....	121
Figura A.6.2 - Combinación de n enlaces simples en un multienlace de dimensión n.....	123
Figura B.6.3 - Comparación de las señales de salida del intercambiador de calor ante una falla de atascamiento en un punto superior al requerido en la válvula de control.....	125
Figura B.6.4 - Comparación de los residuos generados ante una falla de atascamiento en un punto superior al requerido en la válvula de control.....	125
Figura B.6.5 - Residuos filtrados por el umbral, generados debido a una falla de atascamiento en un punto superior al requerido, en la válvula de control de flujo de agua.....	126
Figura B.6.6 - Comparación de las señales de salida del intercambiador de calor ante una falla de atascamiento en un punto inferior al requerido en la válvula de control.....	127
Figura B.6.7 - Comparación de los residuos generados ante una falla de atascamiento en un punto inferior al requerido en la válvula de control.....	127
Figura B.6.8 - Residuos filtrados por el umbral, generados debido a una falla de atascamiento en un punto inferior al requerido en la válvula de control de flujo de agua.....	128
Figura B.6.9 - Comparación de las señales de salida del intercambiador de calor ante una falla de lectura superior a la real en el sensor de flujo de aceite a la entrada del modelo de referencia.....	129
Figura B.6.10 - Comparación de los residuos generados ante una falla de lectura superior a la real en el sensor de flujo de aceite a la entrada del tubo interno del intercambiador de calor.....	129
Figura B.6.11 - Residuos filtrados por el umbral, generados debido a una falla de lectura superior a la real, en el sensor de flujo de aceite a la entrada del tubo interno del intercambiador de calor.....	130
Figura B.6.12 - Comparación de las señales de salida del intercambiador de calor ante una falla de lectura inferior a la real en el sensor de flujo de aceite a la entrada del modelo de referencia.....	131
Figura B.6.13 - Comparación de los residuos generados ante una falla de lectura inferior a la real en el sensor de flujo de aceite a la entrada del modelo de referencia.....	131
Figura B.6.14 - Residuos filtrados por el umbral, generados ante una falla de lectura inferior a la real, en el sensor de flujo de aceite a la entrada del tubo interno del intercambiador de calor.....	132
Figura B.6.15 - Comparación de las señales de salida del intercambiador de calor ante una falla de lectura superior a la real en el sensor de temperatura del agua a la entrada.....	133
Figura B.6.16 - Comparación de los residuos generados ante una falla de lectura superior a la real en el sensor de temperatura del agua a la entrada.....	133
Figura B.6.17 - Residuos filtrados por el umbral, generados ante una falla de lectura superior a la real, en el sensor de temperatura de agua a la entrada del tubo externo del intercambiador de calor.....	134
Figura B.6.18 - Comparación de las señales de salida del intercambiador de calor ante una falla de lectura inferior a la real en el sensor de temperatura del agua a la entrada.....	135
Figura B.6.19 - Comparación de los residuos generados ante una falla de lectura inferior a la real en el sensor de temperatura del agua a la entrada.....	135
Figura B.6.20 - Residuos filtrados por el umbral, generados debido a una falla de lectura inferior a la real, en el sensor de temperatura de agua a la entrada del tubo externo.....	136
Figura B.6.21 - Comparación de las señales de salida del intercambiador de calor ante una falla de lectura superior a la real en el sensor de temperatura del aceite a la entrada.....	136
Figura B.6.22 - Comparación de los residuos generados ante una falla de lectura superior a la real en el sensor de temperatura del aceite a la entrada.....	137
Figura B.6.23 - Residuos filtrados por el umbral, generados debido a una falla de lectura superior a la real, en el sensor de temperatura de aceite a la entrada del tubo interno.....	137
Figura B.6.24 - Comparación de las señales de salida del intercambiador de calor ante una falla de lectura inferior a la real en el sensor de temperatura del aceite a la entrada.....	138

<i>Figura B.6.25 - Comparación de los residuos generados ante una falla de lectura inferior a la real en el sensor de temperatura del aceite a la entrada.....</i>	<i>138</i>
<i>Figura B.6.26 - Residuos filtrados por el umbral, generados debido a una falla de lectura inferior a la real, en el sensor de temperatura de aceite a la entrada del tubo interno.</i>	<i>139</i>
<i>Figura B.6.27- Comparación de las señales de salida del intercambiador de calor ante una falla por ensuciamiento en la pared del tubo interno del intercambiador de calor.....</i>	<i>140</i>
<i>Figura B.6.28 - Comparación de las señales de salida del intercambiador de calor ante una falla por ensuciamiento en la pared del tubo interno del intercambiador de calor.....</i>	<i>140</i>
<i>Figura B.6.29 - Residuos filtrados por el umbral, generados debido a una falla de ensuciamiento en las paredes externa e interna del tubo interno.</i>	<i>141</i>
<i>Figura 6.30 - Diagrama de un sistema de dos tanques acoplados</i>	<i>142</i>
<i>Figura 6.31 - Árbol de fallas inicial para dos tanques</i>	<i>144</i>
<i>Figura 6.32 - Árbol de fallas final del sistema de dos tanques.....</i>	<i>144</i>

Lista de Tablas

Tabla 1-1 - Variables de potencia para varios tipos de sistemas.....	23
Tabla 1-2 - Funciones básicas de los elementos en Bond Graph.....	24
Tabla 1-3 - Representación Bond Graph de los elementos básicos con un puerto.....	25
Tabla 1-4 - Elementos con dos puertos en un gráfico de enlace.....	27
Tabla 1-5 - Causalidad en los gráficos de enlace.....	32
Tabla 2-1 - Variables de entrada del intercambiador de calor (con valores en condiciones nominales).....	40
Tabla 2-2 - Variables de estado (con valores en condiciones nominales).....	40
Tabla 2-3 - Parámetros del intercambiador de calor.....	41
Tabla 2-4 - Coeficiente global de transferencia de calor de acuerdo a los fluidos involucrados.....	42
Tabla 2-5 - Factores de ensuciamiento para algunos fluidos.....	43
Tabla 2-6 - Escalones en las temperaturas de entrada. Simulación en lazo abierto.....	55
Tabla 2-7 - Escalones en las entradas de flujo, perturbaciones en lazo abierto.....	56
Tabla 2-8 - Valores de temperatura a diversas condiciones de ensuciamiento.....	57
Tabla 3-1 - Variables del esquema de control.....	61
Tabla 3-2 - Tipos de velocidad de respuesta de válvulas de control.....	68
Tabla 3-3 - Parámetros del controlador calculados por los métodos de ZN y CHR.....	71
Tabla 3-4 - Tiempos de establecimiento para los métodos de sintonización utilizados.....	72
Tabla 3-5 - Límite de las perturbaciones en las variables de entrada.....	74
Tabla 3-6 - Sobrepaso del límite de las perturbaciones en las variables de entrada.....	75
Tabla 4-1 - Fallas y tipos de fallas consideradas en esta tesis.....	81
Tabla 4-2 - Límites de los umbrales para cada falla.....	85
Tabla 4-3- Matriz de fallas detectables, consideradas en este trabajo de tesis, considerando los residuos 1 y 2.....	90
Tabla 4-4 - Fallas detectables y localizables considerando los residuos 1 y 2.....	90
Tabla 4-5 - Matriz de fallas detectables, consideradas en este trabajo de tesis, considerando los residuos 1, 2 y 3.....	91
Tabla 4-6 - Fallas detectables y localizables considerando los residuos 1, 2 y 3.....	91
Tabla 4-7 - Antecedentes y consecuentes.....	94
Tabla 4-8 - Antecedentes y consecuentes del modelo BG del intercambiador de calor.....	96
Tabla 4-9 - Atascamiento de la válvula en un punto superior al requerido.....	104
Tabla 4-10 - Atascamiento de la válvula en un punto inferior al requerido.....	105
Tabla 4-11 - Falla en el sensor de flujo de aceite a la entrada (lectura mayor).....	106
Tabla 4-12 - Falla en el sensor de flujo de aceite a la entrada (lectura inferior).....	107
Tabla 4-13 - Falla en el sensor de temperatura de agua a la entrada (inferior).....	108
Tabla 4-14 - Falla de ensuciamiento de la pared del tubo (disminución en el coeficiente global de transferencia de calor).....	109
Tabla 6-1 - Antecedentes y consecuentes del sistema de dos tanques.....	143

1. Capítulo 1 - Introducción

1.1 Introducción

El presente trabajo de tesis está enmarcado en el área de control de procesos químicos. En la industria química, los procesos requieren cumplir con dos aspectos importantes: la seguridad y la confiabilidad; sin embargo, las soluciones provistas por la teoría del control clásico con relación a estos aspectos parecen haber quedado limitadas. En esta tesis se estudia y aplica la detección y el aislamiento de fallas (FDI, por sus siglas en inglés Fault Detection and Isolation) como opciones para asegurar la confiabilidad y la seguridad en procesos industriales.

Los esquemas de FDI son estrategias de seguridad aplicadas a sistemas modernos. Un esquema FDI permite detectar algún funcionamiento inadecuado (falla) en un sistema, determinar el tipo de falla y su ubicación. En el presente trabajo se desarrolla un esquema FDI basado en un modelo Bond-Graph (o gráfico de enlace) para una aplicación de procesos químicos.

El modelado energético con Bond-Graphs para sistemas multi-físicos se basa en la aplicación de leyes fundamentales de la física para representar el comportamiento ideal de los elementos de un sistema. Las relaciones que resultan de estas leyes son las *ecuaciones constitutivas de los elementos*, estas se combinan o relacionan mediante las *ecuaciones de equilibrio*, y el modelo se define en términos de *variables generalizadas*. Aunque es posible formular un modelo matemático, el enfoque Bond-Graph es básicamente una técnica de modelado gráfico, la cual permite obtener representaciones estructuradas de las conversiones y de los intercambios de energía en sistemas que involucran diferentes dominios energéticos. Es importante mencionar que, dada la naturaleza del proceso considerado en este trabajo, se usa una variante del Bond-Graph llamada pseudo Bond-Graph. Esta representación es usada especialmente para sistemas termodinámicos abiertos y para sistemas de procesos, aunque también

es posible representar este tipo de sistemas con “true Bond-Graph” como se hace para los otros tipos de sistemas. En un pseudo Bond-Graph, la selección de las variables de flujo y esfuerzo se hace de tal forma que el modelo sea más flexible, entre otras cosas porque se define en términos de variables medibles. Por otro lado, el producto de la variable de esfuerzo y de flujo no representa la potencia instantánea como en un “true Bond-Graph” o simplemente Bond-Graph.

En resumen, en este trabajo de tesis el propósito principal es desarrollar un esquema FDI basado en modelos pseudo Bond-Graphs para un proceso químico. El caso de estudio que se elige es un intercambiador de calor de tubos concéntricos con una configuración de flujo a contracorriente y una geometría recta. La operación que se realiza en el intercambiador es enfriar aceite caliente que circula por el tubo interno, usando agua de enfriamiento que circula por el tubo externo.

En esta tesis se realizan únicamente las tareas de detección y localización de fallas. Por otro lado, se establece un lazo de control, pero no hay reconfiguración o acomodamiento ante la existencia de alguna falla.

Para este trabajo se consideran fallas paramétricas, sensores y actuadores. La falla en parámetro representa el ensuciamiento de la pared del tubo interno del intercambiador de calor, provocado por el funcionamiento prolongado del equipo. Por su naturaleza, dicha falla se clasifica como de tipo progresiva y continua. El parámetro afectado es el coeficiente global de transferencia de calor U . Otro tipo de fallas consideradas son fallas en actuadores. El sistema estudiado tiene solo un actuador, por lo tanto, se consideran fallas debidas al atascamiento de la válvula de control de flujo de agua. Estas fallas se clasifican como súbitas y continuas. Para poder observar la falla, la válvula debe estar en operación. También se consideran fallas en sensores, en particular, fallas debidas a una mala calibración que, al igual que la del actuador, es súbita y continua. Es importante mencionar que el esquema de detección de fallas no puede localizar o distinguir las fallas cuando estas aparecen al mismo tiempo.

Con base en la información anterior se formula un modelo que permita diseñar un esquema FDI en el que se contemplen las fallas descritas. Se necesita un modelo de válvula para simular e identificar fallas en actuadores, también se requiere tener acceso a las variables de entrada del modelo del intercambiador de calor para simular e identificar fallas en sensores, además el modelo debe contener un parámetro que represente el ensuciamiento que modifica al coeficiente global de transferencia de calor, representando de esta manera el deterioro del funcionamiento del intercambiador de calor.

El documento de tesis está organizado de la siguiente manera: el primer capítulo inicia con una introducción al tema de tesis, incluye el planteamiento del problema, la justificación y los objetivos, así como una revisión del estado del arte y un marco teórico.

En el segundo capítulo se describe el proceso. Primero se listan las variables y parámetros del sistema. Después se presentan los balances de materia y energía, a partir de los cuales se obtiene un modelo en ecuaciones diferenciales, y del cual se deriva posteriormente un modelo pseudo Bond Graph. Este capítulo concluye con la simulación del modelo obtenido, usando la librería de simulación con gráficos Bond-Graph BGv2.1 para MATLAB/Simulink [1].

En el tercer capítulo se describe el desarrollo de un controlador para regular la temperatura de salida del aceite. La variable manipulada es el flujo del agua de enfriamiento circulando por el tubo externo. Se dimensiona y modela la válvula de control de flujo (actuador) con el fin de poder detectar fallas en el actuador. El capítulo concluye con la simulación del sistema en lazo cerrado.

En el cuarto capítulo se explica el esquema de detección de fallas propuesto. Se presentan las fallas consideradas para el sistema de estudio, se realizan algunas simulaciones, se analizan y discuten los resultados.

En el quinto capítulo se presentan las conclusiones para cada una de las etapas de esta tesis. Se destacan las aportaciones del trabajo y se plantean

trabajos futuros que pudieran tener como base el presente trabajo. Finalmente se concluye con algunos anexos que completan este documento y se listan las referencias usadas para desarrollo del mismo.

1.2 Planteamiento del problema

Con el paso del tiempo, los procesos químicos en las industrias son cada día más complejos, son mayores en tamaño, potencia, con mayor número de elementos, mayor número de interconexiones (debidas principalmente a una mayor automatización) e involucran diferentes manifestaciones de energía. La operación adecuada de estos procesos es importante, debido a que un mal funcionamiento puede llegar a ocasionar pérdidas económicas, desastres naturales, e incluso la pérdida de vidas humanas. El monitoreo automático de procesos es una herramienta útil para mejorar la seguridad del mismo. Sin embargo, un monitoreo automático requiere en muchos casos de modelos analíticos. Algunos procesos pueden llegar a ser difíciles de modelar debido principalmente a las diferentes formas de energía que interactúan.

El problema a resolver consiste en proponer un esquema de monitoreo automático para la detección e identificación de diferentes tipos de fallas en un proceso termo-hidráulico no lineal, de uso común en la industria química.

Una alternativa interesante es usar modelos Bond-Graph, porque este tipo de representaciones ofrece ventajas como la simplicidad para combinar o conectar elementos y ecuaciones de diferentes dominios energéticos. Además, tienen estructuras causales que pueden facilitar la localización de fallas.

1.3 Justificación

El interés de esta tesis es explorar la flexibilidad de los modelos Bond-Graph para desarrollar esquemas de detección y aislamiento de fallas en sistemas de procesos no lineales. Se pretende que este tipo de esquemas de FDI pudiera ser aplicado de forma relativamente fácil a diferentes procesos en los que se combinan sistemas térmicos y fluidicos, pudiendo incluir algunas no linealidades

que son características de este tipo de sistemas. Por el tipo de aplicación al cual se orienta este trabajo, se usan modelos pseudo Bond-Graph, además se usan elementos no lineales como resistencias moduladas.

Este proyecto puede considerarse como una primera etapa de trabajos futuros sobre control tolerante a fallas orientados a procesos químicos. Así también pudiera constituir un conocimiento base para una implementación experimental.

1.4 Estado del Arte

Existen varios trabajos sobre diagnóstico de fallas basados en modelos Bond Graph, las bases de este método de modelado se presentaron principalmente en los trabajos de Rosenberg y Karnopp [2], quienes dieron al método de Bond Graph la estructura que conocemos actualmente; sin embargo, los fundamentos fueron establecidos originalmente por Henri M. Paynter [3], a quien se le atribuye la creación del Bond-Graph.

Se han realizado trabajos de diagnóstico utilizando esta metodología tanto para procesos químicos, termodinámicos e hidráulicos (sobre todo para reactores químicos, tanques y condensadores) [4], [5], [6], [7], [8], [9], como para sistemas mecatrónicos [10], [11], [12]. La variación Pseudo Bond Graph ha sido empleada principalmente para procesos químicos [5], [6]; este concepto de Pseudo Bond Graph se genera de la necesidad de aplicar los modelos Bond Graph a procesos termodinámicos, térmicos y químicos. La representación en Pseudo Bond Graphs da más flexibilidad en el uso de las variables. En un modelo True Bond Graph, que es como suele llamarse para distinguirlo del Pseudo Bond Graph, el producto de las variables de esfuerzo y flujo debe dar como resultado la potencia instantánea. En sistemas térmicos, la variable de flujo debería ser la entropía para que, al multiplicarla por la temperatura, el resultado de potencia. En ocasiones es más intuitivo elegir como variable de flujo, el calor o flujo de calor; sin embargo, el resultado de la multiplicación de la variable de esfuerzo (temperatura) y de la

variable de flujo (calor), no es la potencia. Cuando se usan estas variables, al gráfico que resulta, se le llama Pseudo Bond Graph [13].

Recientemente suele utilizarse el enfoque híbrido para el modelado combinado de dinámicas en tiempo continuo y en tiempo discreto [14] [15], se conoce como HBG (Hybrid Bond Graph) y específicamente DHBG (Diagnostic Hybrid Bond Graph) para aplicaciones de diagnóstico [15].

Se han reportado algunos modelos Bond Graph para intercambiadores de calor [16], [17]. El modelo reportado en [16] es el modelo de un intercambiador de calor de tubos concéntricos y flujo a contracorriente, para el cual se definieron como principales restricciones de modelado, pérdidas hidráulicas nulas en ambos tubos y aislamiento perfecto. La temperatura de salida del fluido de interés se calcula como la media logarítmica. Estas consideraciones conducen a un modelo de parámetros concentrados, con parámetros invariantes en el tiempo del cual se derivó un modelo Bond-Graph. Con algunas diferencias en la definición de los parámetros, el modelo reportado en [16] tiene una estructura matemática similar al desarrollado en esta tesis. Por lo tanto, se consideró el mismo procedimiento para construir el modelo Bond-Graph.

Debido a que en la práctica la temperatura presenta variaciones espaciales, un modelo más exacto es un modelo de parámetros distribuidos, sin embargo, este tipo de modelos no son adecuados para aplicaciones de control. Otra forma de modelar este tipo de intercambiadores de calor consiste en dividir la longitud del intercambiador de calor en varias secciones llamadas celdas, consideradas cada una de ellas como pequeños intercambiadores de calor, y en cada celda la temperatura se considera uniforme en toda su longitud [18].

En la parte de detección y aislamiento de fallas se utilizan como referencias de apoyo algunos trabajos para procesos químicos. Entre estos, algunos trabajos sobre reactores químicos, como los reportados por Bouamama, Samantaray [4], [5], [6]. La idea general es utilizar la causalidad del sistema para encontrar las

causas de la falla por medio de árboles de falla [19], [8], [20], [21] y otros conceptos como ARR's (Relaciones de redundancia analítica) [19], [22], [10], [8], evaluación de residuos [23], [6], observadores [19], [24] y estimación de parámetros [25], [26], todos estos desde una perspectiva Bond Graph.

En este trabajo de tesis se aplican algunas de estas técnicas de detección de fallas, obteniendo información de la estructura gráfica y la causalidad del sistema para detectar fallas en actuadores [12]. Sin embargo, también se usan otros tipos de métodos de FDI como la generación de residuos basado en modelo paralelo, es cual es explicado con detalle en la sección 4.2.

Para algunos trabajos sobre diagnóstico de fallas en procesos químicos y sistemas térmicos se han usado enfoques de multi-modelos [27], filtros de Kalman [28], modelos bilineales. Por ejemplo, se reportó un trabajo con modelos bilineales para un proceso de tres tanques [29]. También se han utilizado enfoques de estimación de parámetros con algoritmos recursivos como en [21] y en [30]. En este último trabajo, además del método de diagnóstico de fallas, se desarrolló un toolbox de FDI basado en modelo, para el ambiente MATLAB/Simulink. Los casos de estudios fueron un sistema de tres tanques y un intercambiador de calor de flujo a contracorriente.

Algunos trabajos sobre FDI en procesos han sido desarrollados para aplicaciones como procesos térmicos [31], [9], [17], sistemas de dos tanques en cascada, un tanque encaquetado [19], y para intercambiadores de calor [17], [16], [32]. En estos trabajos se siguió el enfoque de árboles de fallas; sin embargo, en [31] se exploraron diversas formas de FDI basados en modelos Bond Graph, y se emplearon tanto enfoques cualitativos como cuantitativos.

1.5 Objetivos

1.5.1 Objetivo General

Desarrollar un esquema de detección y aislamiento de fallas basado en modelos Bond-Graph para algunos sensores, actuadores y parámetros de un intercambiador de calor de tubos concéntricos con flujo a contra corriente.

1.5.2 Objetivos Específicos

- 1.- Desarrollar un modelo Bond-Graph para simular la dinámica de un intercambiador de calor en lazo cerrado con un actuador.
- 2.- Desarrollar un algoritmo de detección y localización de fallas basado en modelo.
- 3.- Construir un esquema de detección y aislamiento de fallas usando la librería BG V2.1 para MATLAB Simulink, dedicada a la técnica de modelado con Bond Graphs.
- 4.- Probar en simulación el esquema FDI desarrollado.

1.6 Marco Teórico

1.6.1 Diagnóstico de fallas

El diagnóstico de fallas se ha desarrollado en muchos procesos industriales como parte indispensable de los sistemas de control para poder asegurar la confiabilidad y disponibilidad del proceso, así como la seguridad en la operación de la planta y de quienes ahí trabajan; evitando accidentes y daños. El diagnóstico de fallas permite conocer la ubicación, duración, tamaño y tipo de falla, basándose en los síntomas que presenta el sistema. Algunos de los beneficios y características de los sistemas de diagnóstico de fallas son:

Beneficios de un sistema FDI:

- a) Hacen posible detectar fallas abruptas de manera oportuna (antes de que llegue a ser una avería).

- b) Hacen posible detectar fallas no solo en los parámetros del proceso sino también, en actuadores y sensores.
- c) Permiten detectar fallas aun cuando el sistema se encuentre controlado (en lazo cerrado).
- d) Facilitan la supervisión de procesos aún en estado transitorio.

Características que se buscan al diseñar un sistema FDI:

- e) Que el sistema FDI proporcione un resultado de diagnóstico detallado, mostrando claramente la ubicación, lugar y tamaño de la falla.
- f) Que los resultados se obtengan en un tiempo corto (con relación a la dinámica del sistema).
- g) Que el sistema no sea caro en implementación y que sus costos de operación sean bajos.
- h) Que el diagnóstico sea reproducible y objetivo.

1.6.1.1 Definición y clasificación de las fallas

Desde los primeros trabajos de diagnóstico y control tolerante a fallas existía polémica sobre la definición de los conceptos básicos en este ámbito. A lo largo de las últimas décadas, los investigadores han trabajado para establecer un conjunto de términos y definiciones para los conceptos relacionados con esta especialidad del control automático.

Fue hasta 1993 cuando se establecieron ciertas nomenclaturas y definiciones que dieron uniformidad a la terminología usada en el campo de detección y diagnóstico de fallas. Se presentan a continuación algunas definiciones sugeridas por el Comité Técnico de SAFEPROCESS en 1993 en Baden-Baden, Alemania (y refrendadas en Hull, Reino Unido en 1997):

- **Falla:** variación inesperada, anormal, o fuera de rango de las propiedades características de un sistema, pero sin llegar a una pérdida total, o casi total, del funcionamiento de dicho elemento (*avería*).

- **Diagnóstico de fallas:** determinación de la existencia, localización, instante de aparición, duración, tamaño y tipo de falla.
- **Confiabilidad:** habilidad de un sistema para realizar una función requerida bajo condiciones establecidas a su alcance durante un periodo de tiempo dado.
- **Disponibilidad:** probabilidad de que un sistema o equipamiento operará satisfactoria y efectivamente en cada momento que se le requiera durante cierto tiempo. Se refiere a este término en porcentajes cercanos a 100%
- **Modelo de diagnóstico:** un modelo matemático diseñado para propósito de diagnóstico, ya sea dinámico o estático, que relaciona variables de entrada (síntomas) a variables de salida (fallas).
- **Residuo:** indicador de falla, basado en las ecuaciones del modelo y usado para propósitos de reconocimiento de falla.
- **Síntoma de falla:** cambio en el comportamiento normal de una cantidad observable, que indica un fenómeno no deseado. Corresponde a un residuo evaluado.
- **Monitoreo:** una tarea en tiempo real y continuo para determinar las condiciones de un sistema físico, la cual se realiza por medio de la grabación de información reconocida; indicando las anomalías en el comportamiento del sistema a través de comparaciones con valores de referencia.
- **Supervisión:** monitorear un sistema físico y tomar acciones apropiadas para mantener la operación normal de éste, con la intención de evitar operaciones en casos con fallas.

Las fallas pueden clasificarse de diversas formas. Por la ubicación de la falla se distinguen entre fallas aditivas y multiplicativas (**Figura 1.1 (a)** y **(d)**). Las fallas aditivas son desviaciones en los estados del sistema y corresponden a fallas en sensores y actuadores. Las fallas multiplicativas son desviaciones de los parámetros del sistema. Por su comportamiento con respecto al tiempo, las fallas se clasifican como progresivas (incipientes) o súbitas (abruptas) (**Figura 1.1 (b)** y

(e)), en las fallas súbitas, el residuo cambia de valor repentinamente, mientras que en las fallas progresivas el residuo cambia de valor gradualmente. También pueden clasificarse como fallas intermitentes y fallas no intermitentes (**Figura 1.1 (c) y (f)**), las intermitentes se presentan por lapsos de tiempo delimitados y son repetitivas, mientras que las fallas no intermitentes se presentan continuamente.

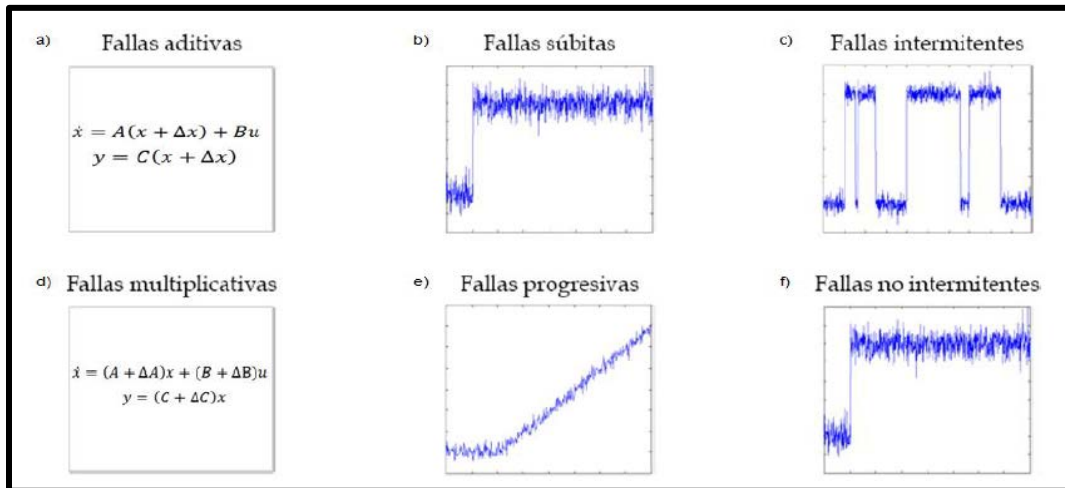


Figura 1.1 - Clasificación de las fallas

1.6.1.2 Definición y clasificación de los esquemas de diagnóstico

Dentro del concepto general de diagnóstico de fallas presentado en la sección anterior, existen tres tareas o actividades fundamentales del diagnóstico de fallas, cuya correcta definición ayudará a tener más claro el panorama del objetivo esencial de un esquema de diagnóstico de fallas; dichas tareas se definen a continuación:

- **Detección de fallas:** Determinar la existencia o ausencia de una falla.
- **Aislamiento fallas:** Localizar el componente en el cual se ha producido la falla.
- **Identificación y estimación de la falla:** Reconocer el tipo de falla, el instante de aparición de la misma y estimar su magnitud.

El diagnóstico de fallas se puede abordar desde diferentes enfoques, principalmente:

- Enfoques libres de modelo (redundancia física).
- Enfoques basados en modelo (redundancia analítica).

La detección y el aislamiento de fallas (FDI por sus siglas en inglés fault detection and isolation), basados en modelos se efectúan a través de la comparación continua del comportamiento de la planta con el esperado obtenido mediante un modelo de la planta. Cualquier método de FDI basado en modelo se descompone en tres etapas:

1. **Generación de residuos.** Consiste en comparar los valores de salida del sistema estudiado con los valores de salida del modelo matemático; el cálculo de la diferencia entre estos valores se conoce como residuo. En el caso ideal, cuando no hay falla el residuo es cero y en presencia de falla el residuo toma un valor superior a cero. En la práctica, el comportamiento de la planta y del modelo no son idénticos aun sin fallas, pero si el modelo es adecuado, el residuo es muy pequeño y en el caso sin falla, toma un valor mínimo.
2. **La evaluación de residuos.** En este paso se obtiene información de los residuos. En particular, se determina si los residuos sobrepasan los umbrales definidos para el sistema. La Real Academia Española define el término umbral como “el valor mínimo de una magnitud a partir de la cual se produce un efecto determinado”. Los umbrales son una referencia para decidir sobre la existencia o no de una falla. El problema de la evaluación consiste entonces en definir los umbrales con el fin de detectar adecuadamente la presencia de fallas y evitar falsas alarmas debidas a la precisión de sensores, ruido, disturbios, etc.
3. **La decisión.** Consiste en comparar el vector de síntomas con el conjunto de firmas de falla, definidas con base en el conocimiento previo de los residuos que se genera con cada falla, y establecidas dentro de una tabla de firmas de referencia, llamada matriz de fallas. La decisión permite identificar las fallas, es decir localizar la causa de la anomalía en el sistema.

La detección de fallas se refiere a la determinación de las fallas presentes en el sistema, así como el instante en que éstas son detectadas. La detección se hace por alguno de los métodos siguientes:

- Verificación de valores límite o monitoreo de señales, que consiste en comparar las señales medidas con respecto a umbrales, intervalos y señales de valor constante.
- Métodos basados en señales, los cuales procesan señales periódicas o estocásticas mediante el uso de funciones de correlación, análisis de Fourier, wavelets (pulsos de valor fijo basados en series de Fourier), etc.
- Métodos basados en modelos analíticos de un proceso o sistema, que se apoyan en señales de entrada y salida del proceso y un modelo matemático del proceso, con las comparaciones de señales se obtienen varios datos analíticos para la formulación de hipótesis de fallas.

1.6.1.3 Detección y aislamiento de fallas basados en modelo

Los esquemas de FDI dependen del tipo de conocimiento que se tenga para describir el proceso. Cada sistema o proceso tiene sus respectivas dificultades. Los diversos métodos de detección y diagnóstico de fallas se pueden clasificar en métodos de modelo cuantitativo, métodos de modelo cualitativo y métodos estadísticos. El enfoque cuantitativo se basa en técnicas avanzadas de procesamiento de información que implican la estimación de estados y parámetros, así como el uso de filtros adaptables. El enfoque cualitativo hace uso del análisis causal, lo cual asocia fallas en los componentes del proceso expresadas en forma cualitativa con desviaciones en variables medidas.

La ventaja de los métodos basados en modelos analíticos sobre los métodos de verificación de valores límite y los métodos basados en señales es que permiten detectar tanto fallas en actuadores, sensores o parámetros del proceso por medio de la medición de las variables de entrada y salida disponibles; sin embargo, debe considerarse el tipo de modelo que se necesita o que se

desea, ya sea un modelo dinámico, estático, lineal o no lineal. Algunos de los métodos basados en modelos analíticos son:

- Estimación de parámetros
- Estimación de estados: Observadores dedicados, filtros de detección de fallas, ambos para procesos de múltiples salidas
- Ecuaciones de paridad

Cada método presenta características y propiedades distintivas:

- ***Estimación de parámetros***

- La estructura del modelo debe ser bien conocida.
- Es adecuado para fallas multiplicativas y aditivas en la señal de entrada y salida.
- Varios cambios en los parámetros son detectables.
- Cambios pequeños son detectables, los cuales incluyen la detección de fallas que ocurren lenta y rápidamente.
- Diagnóstico de fallas de coeficientes físicos.
- Pueden tenerse aplicaciones en línea si se considera un proceso relativamente lento.

- ***Estimación de estados***

- Requiere de un buen conocimiento de la estructura y los parámetros del modelo.
- Se considera adecuado para fallas aditivas.
- Son necesarias múltiples señales de salida.
- Es capaz de tener una reacción rápida en la detección ante fallas repentinas.
- Aplicación en línea para procesos rápidos, sin el uso de muchos observadores.
- No requiere cambios en las señales de entrada para detectar fallas aditivas.

- Principalmente sólo detecta fallas relativamente grandes.
- ***Ecuaciones de paridad***
 - La estructura del modelo y los parámetros deben ser bien conocidos y ajustarse muy bien al proceso.
 - Especialmente adecuado para fallas aditivas.
 - Se logra una reacción rápida ante fallas repentinas.
 - Es posible su aplicación en línea siempre y cuando no se trate de procesos rápidos.
 - No requiere cambios en la señal de entrada para poder detectar fallas aditivas, pero entonces algunos cambios en los parámetros no son detectados.
 - Puede detectar fallas tanto de grande como de pequeña magnitud.

En general, se puede decir que los métodos de detección y aislamiento de fallas requieren información representativa del sistema, dicha información puede ser un modelo analítico, o datos estadísticos y/o de operación. En esta tesis se considera un modelo analítico para el esquema FDI; el método de detección y aislamiento de fallas usado en el presente trabajo es una generalización de métodos tanto cualitativos como cuantitativos, lo cual se explicará en el

1.6.1.4 Teoría de FDI con Bond Graph

El método de modelado con Bond-Graphs ha sido utilizado por varios investigadores para definir relaciones causales que permiten modelar, simular, controlar y aplicar FDI para una variedad de sistemas físicos de diferente naturaleza.

El sistema de diagnóstico necesita un modelo de diagnóstico. La estructura general del sistema de diagnóstico se presenta en la **Figura 1.2**. Este es un esquema sugerido por Isermann [33].

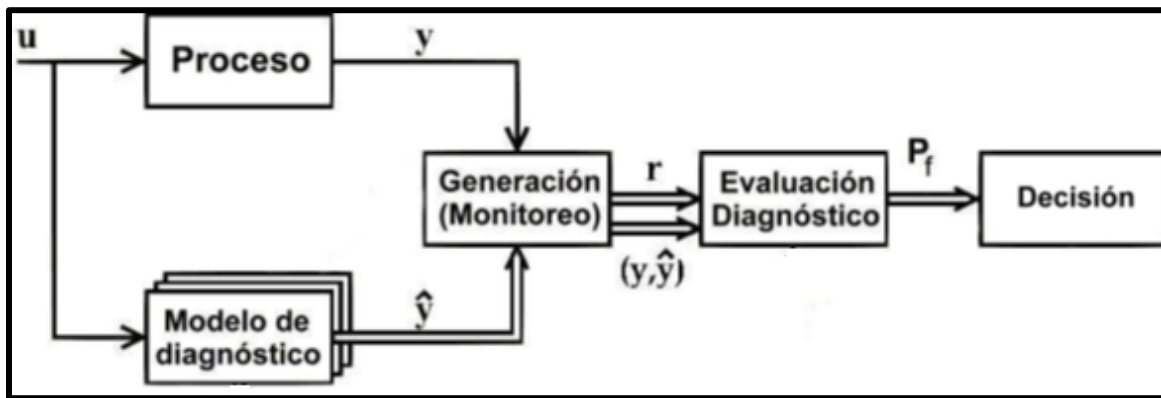


Figura 1.2 - Esquema de la metodología de FDI

El sistema general de FDI funciona de la siguiente manera: El módulo de generación monitorea las señales de salida del proceso. La salida de este módulo son los residuos r que se generan ante la presencia de un cambio con respecto a la operación normal del proceso. Los residuos r son evaluados en el módulo de evaluación para generar un primer conjunto de hipótesis de falla, P_f , cuyo comportamiento se compara con la salida del proceso. Entonces el módulo de aislamiento trata de determinar la causa de la falla, mediante la comparación de la firma de falla con los árboles de falla; es decir, comparando las firmas obtenidas del gráfico temporal con los valores cualitativos de las fallas propagadas en los árboles de falla [31].

Ante una falla, el módulo de evaluación realiza lo siguiente:

- Del *residuo generado* se hace la evaluación según el ajuste del módulo de monitoreo. Si el residuo es diferente de cero si hay falla, mientras que, si es cero o un valor inferior al umbral, no es falla.
- Las señales de salida y y \hat{y} se comparan. A partir de las señales de salida del proceso, los módulos de evaluación y de diagnóstico comparan este comportamiento (síntomas de falla) con los *árboles de fallas* para formar el conjunto de candidatos de falla o *la hipótesis de falla*
- Los parámetros que forman el conjunto de *hipótesis de falla* se comparan para todos los árboles de fallas con el fin de determinar el causante de falla común en los árboles y se genera la decisión en el sistema de FDI [31].

Como ya se mencionó en la sección 1.6.1.2, la primera etapa en un sistema de diagnóstico es la detección de la falla. Para poder realizar esto se pueden utilizar varios métodos, entre los que destacan aquellos basados en el modelo. El uso de un *modelo en paralelo* permite establecer una *ecuación de paridad* que se iguala a cero (o cercano a cero, dependiendo de los umbrales definidos). Por otro lado, se define un *residuo*, que si es distinto de cero (en el caso utópico) indica que hay una operación anormal del sistema, y por tanto, que hay una falla.

El modelo en paralelo (también llamado modelo de simulación o de referencia) reproduce el comportamiento del sistema de interés, utilizando las mismas entradas del sistema al que iguala en comportamiento. Como el comportamiento es igual o muy aproximado, es fácil deducir que una diferencia de las salidas entre cada modelo debe ser igual a cero o inferior a un umbral, cuando no hay falla. Aunque como se mencionó antes utópicamente los residuos deberían ser cero, en la realidad esto no es así ya que siempre existen factores que provocarán que la diferencia entre las salidas no sea igual a cero, de ello se hablará con más detalle en el Capítulo 4.

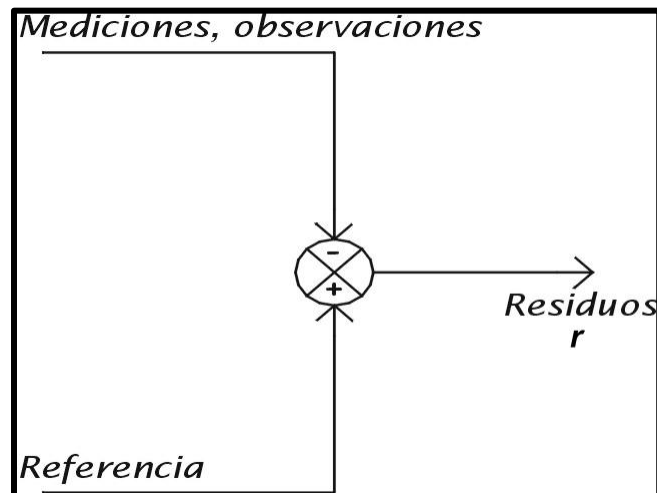


Figura 1.3 - Generación de residuos mediante un modelo en paralelo

La **Figura 1.3** muestra la relación entre las salidas de los modelos de la planta y del modelo en paralelo o de referencia. La especificación de los valores límites o umbrales puede realizarse basándose en el error del modelo con

respecto a la planta real, la precisión de los sensores, la variación de las salidas con respecto a las entradas, etc. [34].

Una vez que se ha detectado la presencia de una falla, se hace la evaluación de los residuos, analizando si la falla es cualitativamente positiva o negativa y el establecimiento de su origen probable mediante los árboles de fallas. Pero antes, es necesario ubicar en el contexto energético causal al sistema tratado, esto se realiza mediante el modelo Bond-Graph del sistema [34].

Se usan valores cualitativos para tomar decisiones con base en modelos Bond-Graph debido a que el análisis que se hace para tomar estas decisiones está fundamentado en el seguimiento de la causalidad del sistema. El razonamiento cualitativo requiere descripciones cualitativas de los parámetros, cuyos valores deben ser simbólicos y no numéricos. Las relaciones de causalidad son importantes en el sentido de diagnóstico porque indican la forma en que la causa produce el efecto, estas interacciones causales son locales debido a que existen sólo entre parámetros y variables de estado que son comunes en una parte del modelo [34].

Las mediciones cualitativas se hacen de la siguiente forma: para cada variable y parámetro se selecciona un intervalo que representa el rango de operación del sistema. Los límites de estos intervalos determinan la continuidad del sistema en su operación, y estos límites establecen tres regiones que indican el comportamiento cualitativo del sistema. Las regiones establecen los valores cualitativos que son términos simbólicos limitados a tres tipos:

Bajo (menos) [-]

Normal [0]

Alto (más) [+]

El siguiente paso en el método de FDI es la elaboración de árboles de fallas, los cuales permiten establecer un conjunto de hipótesis de falla P_f . El uso de árboles para describir el comportamiento de un sistema ha sido empleado para

describir relaciones topológicas que se establecen a través del conocimiento heurístico de las relaciones entre componentes o directamente a través de modelo matemático del sistema. En el caso de modelos Bond-Graph, la información se obtiene de las relaciones estructurales y causales del Bond Graph.

Formalmente, el número de árboles de fallas T_f , es:

$$T_f = 2n$$

donde n es el número de variables medidas. El número dos proviene del número de valores cualitativos distintos de cero que se pueden tener: [-] y [+]. Cuando se ha establecido la presencia de una falla, se indaga de donde proviene. El primer paso es establecer cuáles son los árboles de fallas que tienen el mismo valor que cualitativo y entonces se sabe que entre estos árboles está la causa de falla y los demás se eliminan porque ya no dan más información.

El árbol de fallas delimita las posibles fallas que ocurren cuando hay un cambio en el comportamiento del sistema (modelo de referencia) con relación al comportamiento de la planta. Con ello se genera un primer conjunto de hipótesis de falla P_f , posteriormente se elige un candidato de falla entre el conjunto de candidatos de falla o hipótesis de falla. La decisión final de cuál es la falla se hace observando las firmas de falla o valores cualitativos de los árboles de falla que contienen las variables medidas u observadas.

La intención de usar ambos métodos es que la tabla de referencia de fallas o matriz de referencia de fallas sirve para realizar un primer análisis de las fallas que al final se considerarán como localizables, desde la tabla de referencia de fallas podríamos hacer una localización sin embargo con los árboles de fallas se hace un rastreo de la falla haciendo una propagación de los residuos hacia atrás gracias a la propiedad estructural del modelo Bond-Graph que permite conocer las relaciones causa efecto de cada uno de los elementos en el modelo y saber cómo se propaga la falla hasta la causa raíz.

1.6.2 Intercambiador de calor

El diseño y la operación adecuados de los intercambiadores de calor son de gran importancia ante la necesidad de ahorrar energía y disponer de equipos óptimos no sólo con relación a su eficiencia térmica y rendimiento económico de la instalación, sino también en función de otros factores como la seguridad y continuidad de la operación del sistema.

Los intercambiadores de calor son importantes y ampliamente utilizados en la industria. En la actualidad existen normas ideadas y aceptadas por diferentes asociaciones ingenieriles; las cuales, especifican con detalle los materiales, métodos de construcción, técnicas de diseño y sus dimensiones.

1.6.2.1 Tipos de intercambiadores de calor

Los intercambiadores de calor son equipos que propician el intercambio de energía térmica entre dos o más fluidos a diferentes temperaturas. Los intercambiadores de calor se utilizan en una amplia variedad de aplicaciones como: procesos químicos, industria alimenticia, ingeniería ambiental, industria manufacturera y además diversas aplicaciones de tecnología espacial. Estos equipos se pueden clasificar por diversos criterios, tales como: **Figura 1.4 (a) y (b)** por el objetivo del proceso, ya sea recuperación o regeneración; por la geometría de construcción como tubos, planos y superficies extendidas (**Figura 1.4 (c), (d) y (e)**); por la dirección de los flujos como flujo paralelo, flujo a contracorriente y flujo cruzado (**Figura 1.4 (f), (g) y (h)**); por el mecanismo de transferencia de calor, ya sea de una fase (monofásico) o de dos fases (bifásico) (**Figura 1.4 (i), (j) y (k)**); y finalmente por el tipo de proceso de transferencia, ya sea de contacto directo o indirecto (**Figura 1.4 (l) y (m)**).

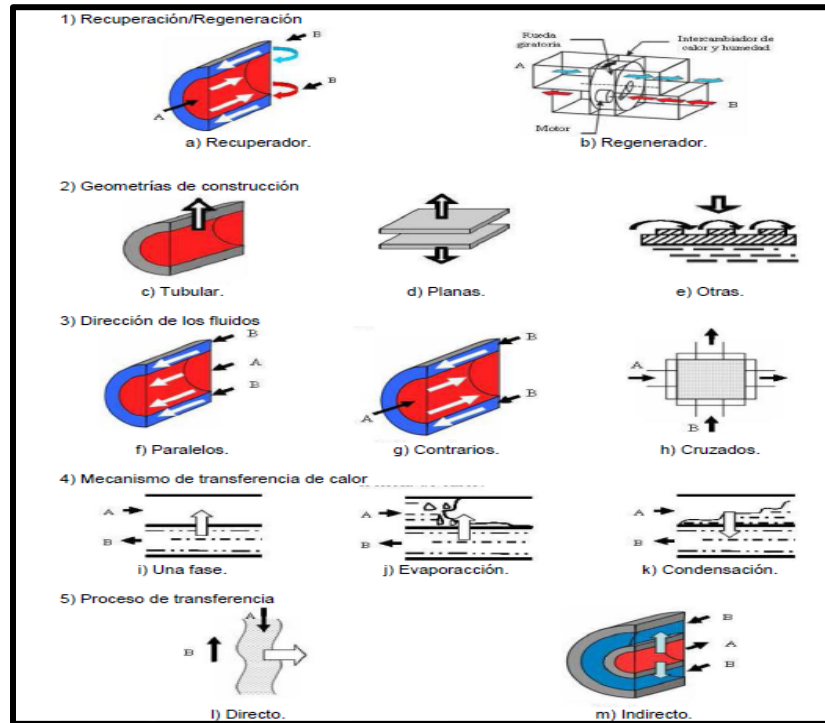


Figura 1.4 - Clasificación de los Intercambiadores de calor.

1.6.2.2 Intercambiador de calor de tubos concéntricos

El intercambiador de calor más básico se compone de un tubo dentro de otro tubo; circulando el fluido caliente o el frío a través del espacio anular, mientras que el otro fluido circula por la tubería interior. La dirección del flujo determina el tipo de configuración, normalmente el arreglo puede ser tanto en flujo a contracorriente como en flujo paralelo.

En un intercambiador de calor de tubos concéntricos, las temperaturas del fluido del lado caliente T_{hot} y del fluido del lado frío T_{cold} son variables de un punto a otro a lo largo de los tubos, a medida que el calor va pasando del fluido más caliente al más frío. La velocidad de intercambio térmico entre los fluidos también variará a lo largo del intercambiador, porque su valor depende, en cada sección, de la diferencia de temperaturas entre los fluidos caliente y frío. En un flujo paralelo, la temperatura final del fluido más frío nunca puede llegar a ser igual a la temperatura de salida del fluido más caliente. Sin embargo, en un flujo a contracorriente, la temperatura final del fluido más frío (que es el que se calienta) puede superar la temperatura de salida del fluido más caliente (que se enfría),

puesto que existe un gradiente de temperaturas favorable a todo lo largo del intercambiador de calor.

1.6.3 Bond Graph

El modelado con gráficos de enlace está basado en los conceptos de conservación de energía, la entropía positiva y la continuidad de potencia. Se trata de una metodología particularmente concebida para modelar sistemas dinámicos multidisciplinares en ingeniería, es decir, sistemas en los cuales, componentes de diferentes disciplinas interactúan intercambiando energía de diferente tipo.

1.6.3.1 Definición del Bond Graph

Es un modelado estructurado de sistemas dinámicos, con notación unificada para diferentes tipos de sistemas. Los gráficos de enlace mapean el flujo de energía de una parte del sistema a otra.

1.6.3.2 Variables y elementos usados en Bond Graph

Independientemente del tipo de sistema, dos componentes son modelados por el mismo elemento de “gráfico de enlace” si el elemento tiene el mismo tipo de función. Por ello, en un gráfico de enlace es posible generalizar las **variables** en un primer nivel, en dos tipos:

1. Variables de potencia

2. Variables de acumulación de energía

Cuando la potencia viaja a través de dos elementos o subsistemas dentro de un sistema, las dos variables que pasan a través de estos se conocen como **variables de potencia (Tabla 1-1)**:

- a) Variables de esfuerzo, $e(t)$
- b) Variables de flujo, $f(t)$

El producto de estas dos variables es igual a la *potencia*, P : $P = e(t) * f(t)$

Las **variables de acumulación de energía** son:

- a) Variables de acumulación de esfuerzo, $p(t)$
- b) Variables de acumulación de flujo, $q(t)$

Y la relación entre las variables se define como:

$$p(t) = \int e(t) * dt \quad y \quad q(t) = \int f(t) * dt$$

En los sistemas termodinámicos, la potencia es el flujo de calor, el cual tiene unidades de energía sobre tiempo ($[J/s]$); pero la potencia se define también como el producto entre la temperatura y la entropía, de acuerdo con la ecuación de Carnot:

$$Q = T\dot{S}$$

Donde Q es el flujo de calor, T es la temperatura y \dot{S} es el flujo de entropía. En algunos Bond Graphs, el producto del esfuerzo y el flujo no representa potencia, por lo tanto, los diagramas que se construyen con estos sistemas se conocen como pseudo Bond Graph.

Los modelos Bond Graph de los sistemas térmicos se construyen como Bond Graph reales (true Bond Graph) cuando se relacionan las variables temperatura-flujo de entropía, y como pseudo Bond Graphs cuando se relacionan las variables temperatura y flujo de calor o flujo de entalpía. Por otro lado, los modelos Bond Graph de los sistemas químicos se construyen como pseudo Bond Graph.

Tabla 1-1 - Variables de potencia para varios tipos de sistemas.

Tipo de sistema	Variables de potencia	
	<i>e (esfuerzo)</i>	<i>f (flujo)</i>
Eléctrico	Voltaje	Corriente
Mecánico traslacional	Fuerza	Velocidad
Mecánico rotacional	Torque	Velocidad angular
Hidráulico	Presión	Caudal
Térmico	Temperatura	Flujo de entropía
Térmico* (<i>pseudo Bond Graph</i>)	Temperatura	Flujo de entalpía o de calor
Químico	Potencial químico	Flujo molar

* En este caso el producto de la variable de esfuerzo y de la variable de flujo no representa potencia, por lo tanto el/los diagrama(s) que se construye(n) con los sistemas térmicos se conocen como pseudo Bond Graph.

Los **enlaces** (vínculos, uniones o puertos de potencia) representan una señal bilateral de flujo de un par de variables: las variables de flujo y las variables de esfuerzo (o variables de potencia). Indican transporte de potencia y se representan con una flecha. La dirección indica el flujo de potencia cuando es positiva (**Figura 1.5**):

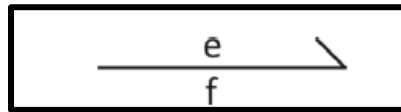


Figura 1.5 - Enlaces de Bond Graph

Este símbolo se llama señal de enlace. Por convención, las variables de esfuerzo se escriben arriba o a la izquierda del enlace, y las variables de flujo se escriben abajo o a la derecha del enlace. Los **elementos, componentes** o **nodos** representan funciones o tareas básicas que pueden clasificarse en cinco grupos (Tabla 1-2).

Tabla 1-2 - Funciones básicas de los elementos en Bond Graph

Funciones o tareas básicas	Elementos	Símbolo
Disipación	Resistivos	R
Almacenamiento	Capacitivos/inductivos	C / I
Abastecimiento	Fuentes	S_e / S_f
Transformación	Transformadores/giradores	TF / GY
Distribución	Enlaces	

Los **puertos** son los lugares en los cuales los subsistemas pueden ser interconectados. Son lugares a través de los cuales la potencia puede fluir entre los elementos o entre los subsistemas. Los elementos básicos que conforman un gráfico de enlace se conocen como **elementos con un puerto** o **elementos monopuerto**.

Encontramos tres elementos con un puerto. Una forma de entender las diferencias entre estos elementos es considerar que tipo de energía/potencia se maneja. En un sistema mecánico, por ejemplo, la energía puede fluir en tres formas: energía potencial, energía cinética y energía disipativa. De forma similar, en un sistema eléctrico, la energía fluye como energía eléctrica, magnética o como energía disipativa. La naturaleza de la energía potencial de un sistema mecánico es similar a la naturaleza de la energía eléctrica en un sistema eléctrico. Así como la energía cinética es similar a la energía magnética, y la energía disipativa es similar en ambos tipos de sistemas.

Los elementos de un puerto representan funciones de transformación irreversible, almacenamiento y abastecimiento. La representación bond-graph de los elementos de sistemas de diferente tipo se hace con un mismo tipo de gráfico, solo se distinguen cuando el gráfico incorpora las diferentes variables y parámetros que caracterizan cada tipo de sistema. El elemento resistivo es un dispositivo de disipación de potencia, es decir la potencia que recibe el elemento se escapa del sistema a los alrededores, frecuentemente en forma de calor. Estos elementos no pueden almacenar energía. En algunos casos los elementos de resistencia pueden estar representados por relaciones no lineales. Para identificar el elemento asociado a las variables de flujo y de esfuerzo, al enlace de la **Figura 1.5** se agrega el símbolo del elemento y el parámetro que lo caracteriza, (**Figura 1.6**)

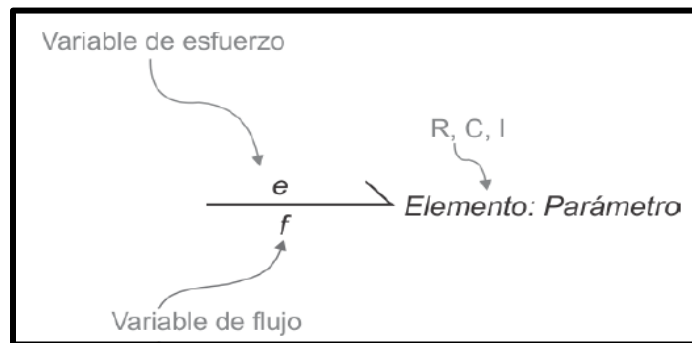


Figura 1.6 - Representación de un enlace Bond Graph asociado a un elemento

Las representaciones Bond Graph para elementos básicos monopuerto se muestran en la **Tabla 1-3**.

Tabla 1-3 - Representación Bond Graph de los elementos básicos con un puerto

Función	Sistemas eléctricos y electrónicos	Sistemas mecánicos	Sistemas mecánicos rotacionales	Sistemas hidráulicos
Disipadores				
	$\frac{V}{i} \rightarrow R:R$	$\frac{F}{v} \rightarrow R:B$	$\frac{T_0}{\omega} \rightarrow R:B_0$	$\frac{P}{\dot{Q}} \rightarrow R:R_H$

Almacenadores				
	$\frac{V}{i} \searrow C:C$	$\frac{F}{v} \searrow C:1/k$	$\frac{T_\theta}{\omega} \searrow C:1/K_\theta$	$\frac{P}{\dot{Q}} \searrow C:C_H$
	$\frac{V}{i} \searrow I:L$	$\frac{F}{v} \searrow I:M$	$\frac{T_\theta}{\omega} \searrow I:J$	$\frac{P}{\dot{Q}} \searrow I:L_H$
Fuentes				
	$V:Se \frac{V}{i} \searrow$	$F:Se \frac{F}{v} \searrow$	$T:Se \frac{T}{\omega} \searrow$	$P:Se \frac{P}{\dot{Q}} \searrow$
	$i:S_f \frac{V}{i} \searrow$	$v:S_f \frac{F}{v} \searrow$	$\omega:S_f \frac{T}{\omega} \searrow$	$\dot{Q}:S_f \frac{P}{\dot{Q}} \searrow$

Los elementos **acopladores-conversores** representan la función de transformación reversible. Se trata de **elementos con dos puertos**. Estos elementos reciben potencia de una parte del sistema a través de uno de sus puertos y transfieren potencia a otra parte del sistema a través del otro puerto (**Tabla 1-4**).

Tabla 1-4 - Elementos con dos puertos en un gráfico de enlace.

Elemento		Símbolo	Ecuaciones	Expansión en diagramas de bloques
Transformadores	Ejemplo: Palanca mecánica Engranajes Pistón		$e_1 = Ne_2$ $f_2 = Nf_1$	

Los elementos que modelan la distribución instantánea de la energía entre los elementos básicos se conocen como **elementos multipuerto**. Estos son los **vínculos** o uniones y representan la distribución de potencia a través de un sistema físico. Admiten varios enlaces adyacentes y representan funciones de distribución.

a) Vínculos en serie o enlaces de flujo común.

Representa una conexión en serie, por lo tanto, la variable de flujo es la misma para todos los enlaces de unión. En este caso deben satisfacerse las siguientes relaciones para el esfuerzo y el flujo:

$$f_1(t) = f_2(t) = f_3(t) \dots$$

$$e_1(t) + e_2(t) + e_3(t) + \dots = 0$$

En un gráfico de enlace se representa con N enlaces unidos en una “s” o un “1”:

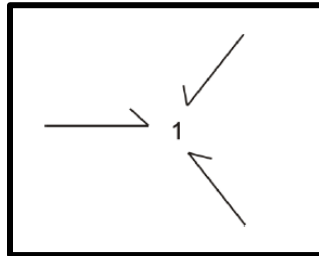


Figura 1.7 - Vínculo en serie

Los enlaces asociados a un elemento representan a las ecuaciones constitutivas de los elementos, mientras que los vínculos son equivalentes a las ecuaciones de equilibrio de los sistemas.

b) Vínculos en paralelo o enlaces de esfuerzo común.

Representa una conexión en paralelo, por lo tanto la variable de esfuerzo es la misma para todos los enlaces de unión. En este caso deben satisfacerse las siguientes relaciones para el esfuerzo y el flujo:

$$e_1(t) = e_2(t) = e_3(t) \dots$$

$$f_1(t) + f_2(t) + f_3(t) + \dots = 0$$

En un gráfico de enlace se representa con N enlaces que se unen mediante “p” o un “0”:

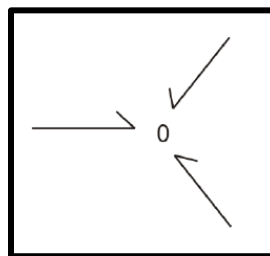


Figura 1.8 - Vínculo en paralelo

La **causalidad**, es el proceso de asignar entradas y salidas en los componentes o subsistemas. Sin embargo es importante notar que no está dada por la física, más bien se refiere a las fuentes, y más específicamente a la relación entre la causa y el efecto. Esta relación se representa en un Bond Graph como una línea o barra vertical en alguno de los extremos del enlace. Por convención, el

lado de la barra indica donde actúa el esfuerzo y el lado contrario a la barra indica donde actúa el flujo (**Figura 1.9**).

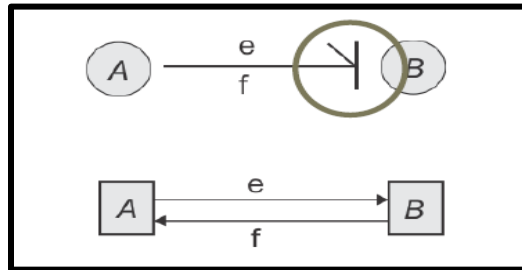
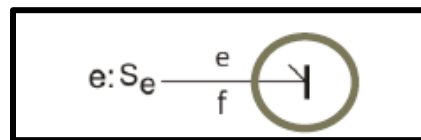
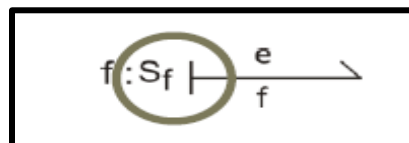


Figura 1.9 - Causalidad. El elemento A aplica un esfuerzo en B, lo que implica que un flujo actúa de B hacia A.

En este sentido, en primer lugar se definen las causalidades de las fuentes: una fuente de esfuerzo alimenta esfuerzo al sistema, por lo tanto la barra está colocada en el lado del sistema (alejada del elemento):



Una fuente de flujo alimenta un flujo asociado a un esfuerzo proveniente del sistema, por lo tanto la barra está colocada en el lado de la fuente (pegada al elemento):



A esta definición de causalidades se le conoce como **causalidad necesaria** porque siempre debe respetarse y siempre es la primera causalidad que se define en un modelo Bond-Graph.

La **Tabla 1-5** muestra este tipo de causalidad y la causalidad de otros elementos. Los elementos de dos puertos y los multipuertos tienen una **causalidad estructural**: En un transformador, la barra de causalidad apunta hacia donde hay una transformación de esfuerzo, es decir, si es el esfuerzo que sale del elemento transformador, habría una relación $e_2 = (1/T)e_1$, donde $1/T$ es un coeficiente de proporcionalidad y la causalidad está en el extremo contrario al elemento:

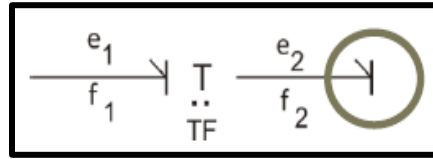


Figura 1.10 - Causalidad estructural en un elemento transformador – colocada en los extremos derechos de los enlaces.

Cuando hay una transformación de flujo, la causalidad va en sentido inverso (pegada al elemento), la salida del elemento es f_2 y la relación es: $f_2 = T f_1$.

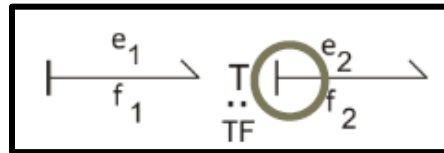


Figura 1.11 - Causalidad estructural en un elemento transformador – colocada en los extremos izquierdos de los enlaces.

Por otro lado, debe notarse que para un elemento transformador siempre hay una causalidad pegada al elemento y otra alejada del elemento, contrario a lo que sucede en un girador: ambas causalidades están pegadas al elemento o ambas causalidades están alejadas del elemento (ver **Tabla 1-5**).

Los vínculos en serie tienen todas las causalidades orientadas al vínculo, menos una, lo que representa el equilibrio de esfuerzos. Los vínculos en paralelo tienen todas las causalidades orientadas al elemento, excepto una, lo que indica el equilibrio de flujos. Entonces se llama causalidad estructural porque corresponde a forma de las ecuaciones de los elementos (la cual describe la relación causa-efecto en los mismos).

Los elementos monopuerto tienen una **causalidad preferencial**. Es correcto colocar la causalidad en cualquiera de los extremos del enlace, se elige por conveniencia la causalidad integral sobre la causalidad diferencial. Como puede observarse cuando el esfuerzo es una salida, este es una función de la integral del flujo y cuando es una entrada, el flujo es una función de la integral del esfuerzo. Una causalidad diferencial respeta las relaciones en donde las variables son funciones de una derivada.

La causalidad preferida para los elementos dinámicos es la causalidad integral, pero si al definirla de esta forma, las reglas de causalidad en los transformadores, giradores y vínculos no se cumplen, debe elegirse la causalidad diferencial. Finalmente, los enlaces asociados con las resistencias tienen **causalidad arbitraria**, es decir, esta se define al último, de manera que las reglas anteriores se respeten.

Algoritmo de causalidad

- i. Elegir una fuente y marcar su causalidad.
- ii. Algunos enlaces adyacentes tienen solo una posible causalidad. Verificar las reglas de causalidad de transformadores y giradores, en caso de que el sistema contenga estos elementos. Marcar la causalidad de estos enlaces.
- iii. Repetir pasos i y ii para todas las fuentes
- iv. Elegir un elemento dinámico y marcar su causalidad
- v. Marcar causalidades fijas (análogo al paso 2)
- vi. Repetir iv y v para todos los elementos I y C
- vii. Escoger un elemento R que no tenga causalidad y marcarla una arbitraria.
- viii. Marcar causalidades fijas (análogo al paso 2)
- ix. Repetir vii y viii para todos los elementos R .

Tabla 1-5 - Causalidad en los gráficos de enlace.

Tipo de causalidad	Elemento	Símbolo
Necesaria	Fuente de esfuerzo	$e: S_e \begin{array}{c} \xrightarrow{e} \\ \xleftarrow{f} \end{array}$
	Fuente de flujo	$f: S_f \begin{array}{c} \xrightarrow{e} \\ \xleftarrow{f} \end{array}$
Estructural	Transformador	$\begin{array}{c} \xrightarrow{e_1} \\ \xleftarrow{f_1} \end{array} \begin{array}{c} T \\ \vdots \\ TF \end{array} \begin{array}{c} \xrightarrow{e_2} \\ \xleftarrow{f_2} \end{array}$
	Girador	$\begin{array}{c} \xrightarrow{e_1} \\ \xleftarrow{f_1} \end{array} \begin{array}{c} G \\ \vdots \\ GY \end{array} \begin{array}{c} \xrightarrow{e_2} \\ \xleftarrow{f_2} \end{array}$
	Vínculos en serie	$\begin{array}{c} \xrightarrow{e_1} \\ \xleftarrow{f_1} \end{array} \begin{array}{c} 1 \\ \vdots \\ 1 \end{array} \begin{array}{c} \xrightarrow{e_2} \\ \xleftarrow{f_2} \end{array}$
	Vínculos en paralelo	$\begin{array}{c} \xrightarrow{e_1} \\ \xleftarrow{f_1} \end{array} \begin{array}{c} 0 \\ \vdots \\ 0 \end{array} \begin{array}{c} \xrightarrow{e_2} \\ \xleftarrow{f_2} \end{array}$
	Capacitor	$C:C \begin{array}{c} \xleftarrow{e} \\ \xrightarrow{f} \end{array}$
Preferencial	Inductor	$I:I \begin{array}{c} \xleftarrow{e} \\ \xrightarrow{f} \end{array}$
Arbitraria	Resistencia	$R:R \begin{array}{c} \xleftarrow{e} \\ \xrightarrow{f} \end{array}$

2. Capítulo 2 – Modelo dinámico del intercambiador de calor

2.1 Descripción del proceso

El caso de estudio es un intercambiador de calor de tubos concéntricos con una configuración de flujo a contra corriente, es decir los fluidos circulan por los tubos interno y externo en dirección opuesta. Se considera que por el tubo interno circula aceite caliente que se desea enfriar, y que el tubo externo transporta agua que se usa como fluido de enfriamiento. El proceso de enfriamiento de aceite se realiza por transferencia de calor; es decir, el aceite caliente sede energía calorífica a través de las paredes del tubo interno hacía el agua fría. La temperatura de salida del aceite se controla a una referencia dada, manipulando el flujo del agua de enfriamiento.

2.1.1 Procedimiento para dimensionar el intercambiador de calor

Problema: enfriar un flujo de aceite caliente de 0.3 kg/s , de una temperatura de entrada de $200 \text{ }^\circ\text{C}$ a una temperatura de salida de $150 \text{ }^\circ\text{C}$, usando agua de enfriamiento a $10 \text{ }^\circ\text{C}$.

Se usa un intercambiador de calor de tubos concéntricos con flujo a contracorriente. Por el tubo interno circula el aceite y por el tubo externo circula el agua de enfriamiento. Para dimensionar el intercambiador de calor de manera que sea posible enfriar el aceite de 200 a $150 \text{ }^\circ\text{C}$ se sigue el algoritmo que se muestra en la sección 2.1.3. Este algoritmo es una adaptación de los algoritmos que comúnmente se usan para diseño de intercambiadores de calor de tubos y coraza [35], [36]. Este algoritmo permite obtener el área de transferencia de calor, los diámetros interno y externo de los tubos y la longitud de los mismos. También se determina el valor del coeficiente global de transferencia de calor, el cual es función del número de Reynolds y del Número de Nusselt. Finalmente se determinan el flujo de agua de enfriamiento requerido y la temperatura de salida.

Los flujos y las temperaturas determinadas con este algoritmo corresponden a las condiciones nominales de operación del intercambiador de calor.

Algunos otros parámetros del modelo, como son las propiedades físicas y térmicas tanto de los fluidos como del material de las paredes del tubo se obtuvieron de tablas reportadas en [37], [38], [39]. Las correlaciones que se usaron para el cálculo del coeficiente global de transferencia de calor son correlaciones empíricas obtenidas de mediciones experimentales reportadas en [40].

Las temperaturas de los fluidos varían con la dirección axial x y con la dirección radial. Los perfiles de temperatura pueden ser calculados a partir de un sistema de ecuaciones diferenciales parciales, lo cual no es práctico para aplicaciones de control. Para incluir el efecto del cambio de la temperatura en la dirección axial x , se usa el método de la media logarítmica para calcular la diferencia de temperatura entre la temperatura del fluido caliente y del fluido frío (LMTD por sus siglas en inglés). Esta media se determina dependiendo de la configuración de flujo [41]. Para el caso del flujo a contra corriente, la LMTD se define como se indica en (1) y se representa como se muestra en la **Figura 2.3**.

$$\Delta T = \frac{(T_{oil}^i - T_{water}) - (T_{oil} - T_{water}^i)}{\ln(T_{oil}^i - T_{water}) - \ln(T_{oil} - T_{water}^i)} \quad (1)$$

2.1.2 Cálculo del coeficiente global de transferencia de calor

En el intercambiador de calor ocurren dos tipos de mecanismos de transferencia de calor: conducción y convección. Estos fenómenos de transferencia de calor se pueden considerar como fenómenos de disipación de calor y por lo tanto pueden ser representados por elementos resistivos caracterizados por los coeficientes de transferencia de calor correspondientes a cada tipo de mecanismo. Si se engloban todos los mecanismos de transferencia de calor que se llevan a cabo en un intercambiador de calor, se obtiene una resistencia térmica global. El inverso de

esta resistencia es el coeficiente global de transferencia de calor U , el cual se define en términos del coeficiente de conducción de las paredes del intercambiador de calor k y de los coeficientes de transferencia de calor por convección h_{oil} y h_{water} .

Enseguida se obtienen las ecuaciones de estos elementos de transferencias de calor, caracterizados por las resistencias térmicas de conducción y de convección.

En primer lugar, el coeficiente de transferencia de calor por conducción o conductividad térmica es k . La resistencia térmica para el mecanismo de transferencia de calor por conducción está definida como sigue: Consideremos un volumen de control formado por un tubo cilíndrico con un espesor de pared. En coordenadas cilíndricas **Figura 2.1**.

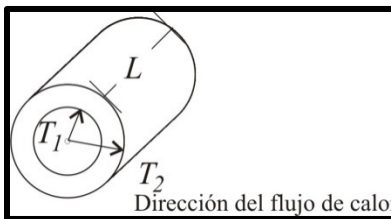


Figura 2.1 - Transferencia de calor por conducción en un volumen de control. Coordenadas cilíndricas.

El flux calórico es directamente proporcional al potencial térmico (diferencia de temperaturas) e inversamente proporcional a la resistencia del medio como se muestra en (2):

$$\frac{Q}{A} = \text{flux calórico} = \frac{\text{Potencial térmico}}{\text{Resistencia del medio}} = -k \frac{dT}{dx} \quad (2)$$

Este concepto conduce a la Ley de Fourier que rige la transferencia de calor por conducción:

$$Q = -kA \frac{dT}{dx}$$

dónde: Q = Flujo de calor
 k = Conductividad térmica (constante de proporcionalidad)
 A = Área transversal, normal al flujo de calor
 dT/dx = Gradiente de temperatura con respecto a la posición x

Aplicando la ley de Fourier al volumen de control en coordenadas cilíndricas:

$$Qdr = -kAdT \quad (3)$$

$$A = 2\pi rL \quad (4)$$

$$Q_{1-2} \int_{r_1}^{r_2} \frac{1}{r} dr = -2\pi kL(T_2 - T_1) \quad (5)$$

$$Q_{1-2} = \frac{2\pi kL}{\ln(r_1/r_2)}(T_2 - T_1) \quad (6)$$

La resistencia térmica para el mecanismo de transferencia por conducción es:

$$R_{material} = \frac{1}{2\pi kL/\ln(r_2/r_1)} \quad (7)$$

Por otro lado, el coeficiente de transferencia de calor por convección es h . La resistencia térmica para el mecanismo de transferencia de calor por convección está definida como sigue: El efecto global de la convección se determina por la ley de enfriamiento de Newton. Newton observó la circulación de fluidos en un sistema de tubos concéntricos donde el fluido circula a contracorriente. En regímenes de circulación laminar y turbulento, Newton midió cantidad de calor transferido ΔQ , el gradiente de temperatura ΔT , y obtuvo experimentalmente la resistencia al flujo de calor:

$$Resistencia\ del\ medio = \frac{potencial\ térmico}{calor\ transferido} = \frac{\Delta T}{\Delta Q} \quad \frac{dQ}{dT} = hA \quad (8)$$

Ley de enfriamiento de Newton: $Q = hA(T_2 - T_1)$

De acuerdo con la definición de resistencia térmica de (8):

La resistencia térmica para el mecanismo de transferencia por convección se define en (9) como:

$$R_{conv} = \frac{1}{hA} \quad (9)$$

Q = Flujo de calor

h = Conductividad térmica (constante de proporcionalidad)¹

A = Área transversal, normal al flujo de calor

T = Temperatura

La transferencia de calor por convección se lleva a cabo entre las paredes del intercambiador de calor y los fluidos. Entonces, para modelar el fenómeno de transferencia de calor en el sistema, se considera un arreglo en serie de 3 resistencias térmicas: dos resistencias por convección R_{oil} y R_{water} , y una por conducción $R_{material}$ [42] (**Figura 2.2**).

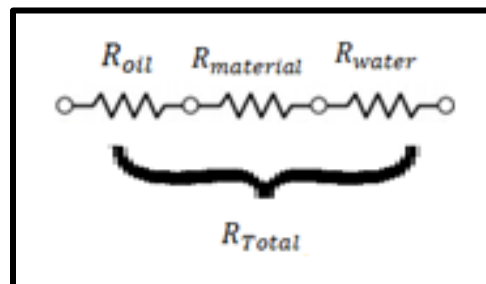


Figura 2.2 - Representación del coeficiente global de transferencia de calor como una suma de resistencias térmicas en serie

dónde:

$$R_{Total} = R_{oil} + R_{material} + R_{water} = 1/U \quad (10)$$

$$R_{oil} = \frac{1}{A_i h_{oil}} \quad (11)$$

$$R_{material} = A_0 \ln(r_0/r_i) / 2\pi L k \quad (12)$$

¹ h también depende de la temperatura. Sin embargo, para consideraciones prácticas puede ser considerada como una constante. Su determinación resulta muy difícil ya que depende de las siguientes variables: velocidad de circulación del fluido, densidad del fluido, calor específico de las sustancias, diámetro equivalente, viscosidad del fluido y conductividad térmica.

$$R_{water} = \frac{1}{A_0 h_{owater}} \quad (13)$$

$$1/U = 1/h_{oil} + A_0 \ln(r_0/r_i)/2\pi Lk + 1/h_{water} * A_i/A_0 \quad (14)$$

$$U = \frac{1}{\frac{1}{h_{oil}} + \frac{A_0 \ln(r_0/r_i)}{2\pi Lk} + \frac{A_i}{h_{water} A_0}} \quad (15)$$

Como puede apreciarse en (15), el coeficiente global de transferencia de calor depende de los coeficientes convectivos de ambos fluidos (16) y (17), los cuales se calculan en función de números adimensionales como el número de Reynolds (18) y (19), número de Prandtl (20) y (21) y número de Nusselt (22) y (23). Se usa la correlación de Whitaker para bajos números de Reynolds [40].

$$h_{water} = Nu \frac{k_{water}}{D_{water}} \dots\dots (16)$$

$$h_{oil} = Nu \frac{k_{oil}}{D_{oil}} \dots\dots (17)$$

$$Re_{water} = \frac{v_{swater} * D_{water}}{\nu_{water}} \dots\dots (18)$$

$$Re_{oil} = \frac{v_{soil} * D_{oil}}{\nu_{oil}} \dots\dots (19)$$

$$Pr_{water} = \frac{C_{water} \mu_{water}}{k_w} \dots\dots (20)$$

$$Pr_{oil} = \frac{C_{oil} \mu_{oil}}{k_{oil}} \dots\dots (21)$$

$$Nu_{water} = (0.4 Re_{water}^{1/2} + 0.06 Re_{water}^{2/3}) Pr_{water}^{0.4} \dots\dots (22)$$

$$Nu_{oil} = (0.4 Re_{oil}^{1/2} + 0.06 Re_{oil}^{2/3}) Pr_{water}^{0.4} \left(\frac{\mu_{oil}}{\mu} \right)^{1/4} \dots\dots (23)$$

$$0.1 < Re < 10^5$$

Para las condiciones de operación del intercambiador de calor, los valores de los números adimensionales son:

$$Re_{water} = 1789 \quad Re_{oil} = 40.79$$

$$Pr_{water} = 9.47 \quad Pr_{oil} = 749$$

$$Nu_{water} = 63.32 \quad Nu_{oil} = 138.37$$

2.1.3 Definición de condición de operación nominal y parámetros del intercambiador de calor

El intercambiador de calor opera en una configuración a contracorriente. La diferencia de temperatura a lo largo del intercambiador de calor se muestra en la **Figura 2.3**. Siendo el aceite un líquido con alto grado de viscosidad, se requiere una gran área de transferencia de calor para poder cambiar de manera importante la temperatura del aceite; por lo tanto, con el tipo de intercambiador que se estudia el objetivo es generar un cambio de 50°C . Por otro lado, es necesario que el agua de enfriamiento esté a una temperatura baja, de tal forma que el intercambio de calor se realice con mayor facilidad y que sea posible disminuir la temperatura del aceite. Las temperaturas de las corrientes de entrada son disturbios, sin embargo, el límite superior está dado por la temperatura de ebullición del aceite: para el aceite de olivo virgen es de 215°C , para el aceite de olivo refinado es 225°C y para el aceite de olivo extra ligero es 242°C . Considerando el punto de ebullición del aceite de olivo virgen, esta temperatura no puede ir más allá de 15°C .

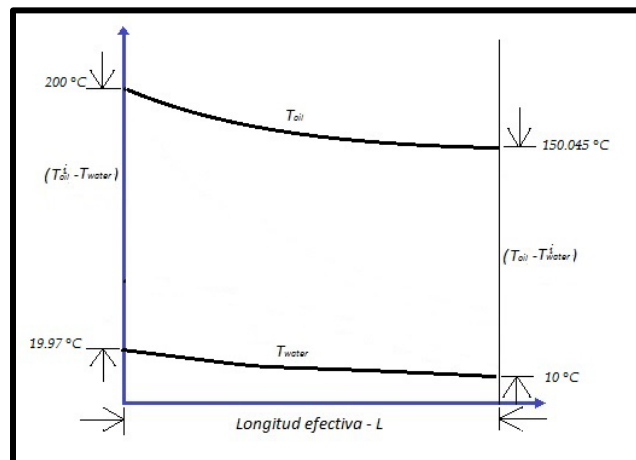


Figura 2.3 - Diferencia de temperaturas (eje y) en el intercambiador de calor a lo largo del eje axial x, para configuración de flujo a contracorriente.

El algoritmo de diseño del intercambiador de calor se presenta en la **Figura 2.4**. Las variables y parámetros del intercambiador en condiciones nominales que fueron calculadas se establecen en la **Tabla 2-1** (variables de entrada), **Tabla 2-2** (variables de estado) y **Tabla 2-3** (parámetros). En la **Figura 2.5** y **Figura 2.6** se muestra el diagrama del proceso con sus variables y parámetros.

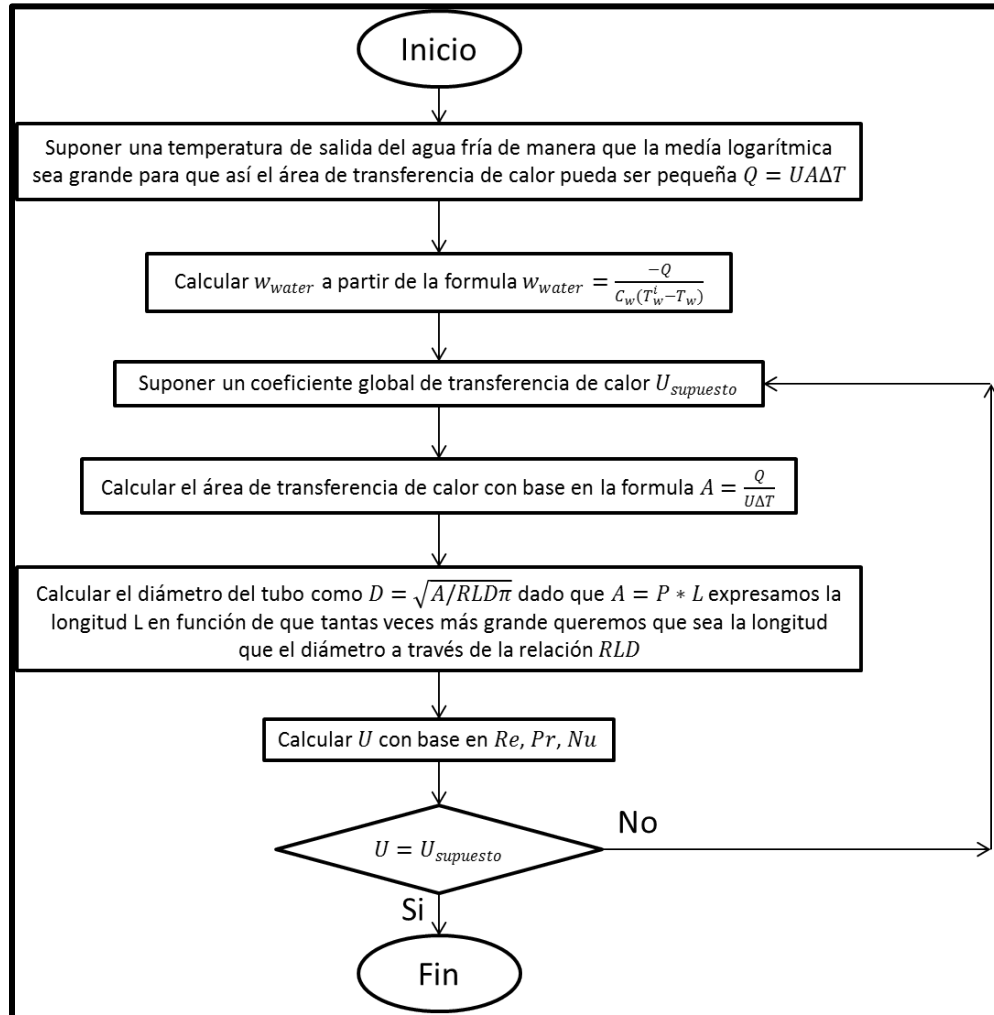


Figura 2.4 - Algoritmo de dimensionamiento del Intercambiador de calor

Tabla 2-1 - Variables de entrada del intercambiador de calor (con valores en condiciones nominales)

Variable	Descripción y unidades	Cond. nominal
T_{water}^i	Temperatura de entrada del agua en el tubo interno [°C]	10
T_{oil}^i	Temperatura de entrada del aceite en el tubo externo [°C]	200
w_{water}	Flujo másico de agua [kg/s]	0.5725
w_{oil}	Flujo másico de aceite [kg/s]	0.3

Tabla 2-2 - Variables de estado (con valores en condiciones nominales)

Variable	Descripción y unidades	Cond. nominal
T_{water}	Temperatura de salida del agua en el tubo externo [°C]	19.97
T_{oil}	Temperatura de salida del aceite en el tubo interno [°C]	150.045

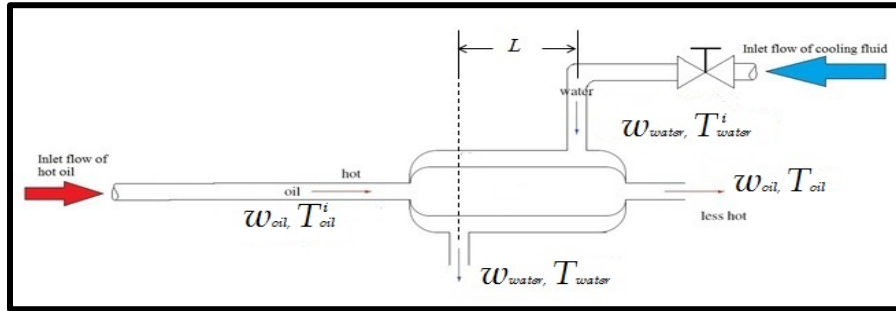


Figura 2.5 - Diagrama de un intercambiador de calor de longitud L operando a contracorriente, con válvula de control.

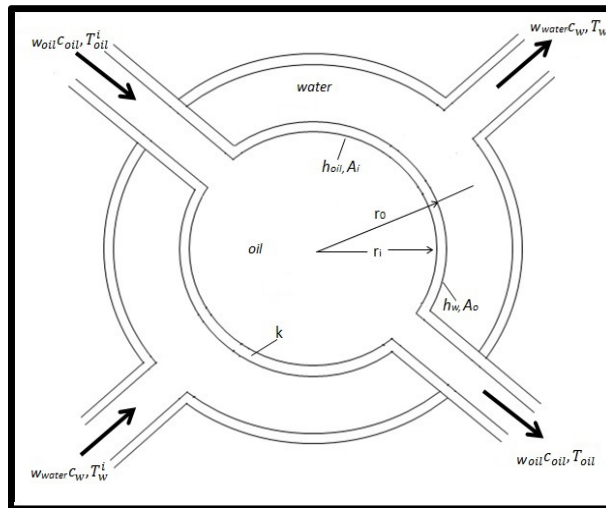


Figura 2.6 - Vista transversal de un intercambiador de calor de tubos concéntricos

Tabla 2-3 - Parámetros del intercambiador de calor

Variable	Descripción y unidades	Valor
Propiedades físicas y térmicas		
C_{water}	Calor específico del agua [J/(kgK)]	4200
C_{oil}	Calor específico del aceite [J/(kgK)]	1600
μ_{water}	Viscosidad dinámica del agua [(N-s)/m]	0.001
μ_{oil}	Viscosidad dinámica del aceite [(N-s)/m]	0.081
k_{water}	Conductividad térmica del agua [J/(s m K)]	0.58
k_{oil}	Conductividad térmica del aceite [J/(s m K)]	0.1729
k	Conductividad térmica de la pared del tubo interno [J/(s m K)]	85
U	Coefficiente global de transferencia de calor [J/(s m K)]	142.7
Dimensiones del intercambiador		
r_o	Radio externo del tubo interno [m]	0.0587
r_i	Radio interno del tubo interno [m]	0.0580
r_{ext}	Radio interno del tubo externo [m]	0.098
A_i	Área interna de la pared del tubo interno [m ²]	1.0566
A_o	Área externa de la pared del tubo interno [m ²]	1.0703
A	Área efectiva de transferencia de calor [m ²]	1.0566
L	Longitud efectiva del intercambiador de calor [m]	2.8997

En las condiciones nominales de operación, el coeficiente global de transferencia de calor U fue calculado siguiendo el procedimiento de la sección 2.1.2. y en las condiciones nominales de operación, tiene un valor de 142.7 (**Tabla 2-3**) con el de la **Tabla 2-4** obtenida de [43], claramente se puede constatar que el valor de U está en el rango adecuado con respecto a las sustancias usadas (agua y aceite {sustancias orgánicas pesadas}), por lo que se verifica la valides del cálculo del coeficiente global de transferencia de calor, el cual depende de las correlaciones empíricas antes mencionadas y el algoritmo de diseño del intercambiador de calor, los cuales están basados en datos empíricos de sistemas reales.

Tabla 2-4 - Coeficiente global de transferencia de calor de acuerdo a los fluidos involucrados

Fluido caliente	Fluido frío	Coeficiente U W/m^2K
Agua	Agua	1420-2840
Metanol		
Amoníaco		
Soluciones Acuosas		
Sustancias orgánicas ligeras		426-851
Sustancias orgánicas medias		283-710
Sustancias orgánicas pesadas		28-426

El coeficiente global de transferencia de calor U no se considera constante como en otros trabajos, esto debido a que se utiliza una U global que depende de las variables del proceso, como en este caso que depende de los flujos en los tubos, además de que se requiere agregar un parámetro que represente la resistencia debida al ensuciamiento, y como se mencionó anteriormente el cálculo de U tenga valides ante la falta de datos experimentales, pueda compararse con valores empíricos que si son obtenidos a partir de datos experimentales.

La predicción del ensuciamiento es muy difícil debido a que su efecto neto es el resultado de muchos fenómenos que no actúan individualmente, y por la complicación adicional de su dependencia con el tiempo. A fin de considerar el efecto del ensuciamiento en el diseño del intercambiador, se modifica la ecuación

(15) incluyendo una resistencia R_D debido al ensuciamiento causado por cada fluido y obtenemos la ecuación (24).

$$U = \frac{1}{\frac{1}{h_{oil}} + \frac{A_0 \ln(r_o/r_i)}{2\pi Lk} + \frac{A_i}{h_{water} A_0} + R_D} \quad (24)$$

Dónde:

$$R_D = R_i + R_o \quad (25)$$

R_i : es la resistencia debida al ensuciamiento en la parte interna del tubo interno

R_o : es la resistencia debida al ensuciamiento en la parte externa del tubo interno

Los factores de ensuciamiento se usan como una resistencia adicional que modifica el funcionamiento del intercambiador de calor y de esta manera se puede simular el deterioro del mismo. En la **Tabla 2-5** se encuentran algunos valores de resistencias de ensuciamiento reportados por (TEMA) que es la asociación de fabricantes de intercambiadores de calor [43]. Se consideraron las resistencias para los fluidos que circulan por los tubos interno y externo. La suma de las dos resistencias es la resistencia R_D , la cual determina el ensuciamiento del intercambiador de calor en un año. Este factor típicamente es considerado para planificar el mantenimiento del equipo. Después de un año, el valor de la resistencia es mayor que R_D , y por tanto el calor que se intercambia es menor al de diseño, pero esta disminución es gradual.

Tabla 2-5 - Factores de ensuciamiento para algunos fluidos

Fluidos Industriales	Resistencias [$m^2 K/W$]
Sales fundidas	0.000088
Refrigerantes	0.000176
Amoníaco	0.000176
Amoníaco(con aceite); Soluciones de cloruro de calcio y sodio	0.000528
CO_2 líquido	0.000176
Cloro líquido, Soluciones de metanol, Etanol o Etilenglicol, Soluciones Causticas.	0.000352
Aceites Vegetales	0.000528
Agua de enfriamiento de chaquetas	0.000352

De la **Tabla 2-5** se eligen los valores de factor de ensuciamiento de aceite vegetal para el ensuciamiento de la parte interna del tubo interno R_i y agua de enfriamiento de chaquetas para el ensuciamiento de la parte externa del tubo interno R_o . De tal manera que:

$$R_D = 0.000528 + 0.000352 = 0.00088 \text{ m}^2\text{K/W} \quad (26)$$

2.2 Obtención del modelo del intercambiador de calor en ecuaciones diferenciales

Para desarrollar el modelo matemático del sistema es importante tener en cuenta cuál es el uso que se le va a dar. En este caso se necesita un modelo que sea útil para desarrollar un esquema FDI. En primer lugar, es importante tener acceso a las variables y parámetros en los cuales se desean analizar las fallas. En segundo lugar, el modelo debe incluir la dinámica de los actuadores para facilitar el análisis de fallas en actuadores. Además, para poder analizar fallas paramétricas, el modelo debe permitir simular la degradación del sistema, modificando de una manera realista algún parámetro del modelo. El modelo del intercambiador de calor se obtiene a partir de las leyes de la conservación de la materia y energía.

2.2.1 Consideraciones de modelado

Las ecuaciones dinámicas del intercambiador de calor se desarrollan con base en las siguientes consideraciones:

1. Se asume una configuración de flujos a contracorriente.
2. La temperatura de salida se calcula en función de la media logarítmica para una configuración a contracorriente.
3. No hay acumulación de masa.
4. Las propiedades físicas son constantes y uniformes en el volumen de control.
5. El calor transferido del fluido caliente al fluido frío se estima en función del coeficiente global de transferencia de calor U .

6. El inverso de U es la resistencia térmica global que se calcula como un arreglo en serie de las resistencias que representan la oposición a la transferencia de calor por conducción y por convección. Por lo tanto, la resistencia térmica depende de los coeficientes de transferencia de calor por conducción y por convección.
7. Los coeficientes k , h_{water} y h_{oil} no son constantes, sino que dependen de Re y Pr , por lo tanto, varían con el flujo de alimentación al intercambiador de calor.

Las suposiciones de modelado conducen a un modelo matemático del intercambiador de calor con las siguientes características: es un modelo dinámico, de parámetros concentrados, no lineal, con algunos parámetros variantes en el tiempo.

2.2.2 Balances de materia

El modelo del intercambiador de calor es un sistema de dos ecuaciones diferenciales ordinarias, no lineales con cuatro entradas: w_{water}^o , w_{oil}^o , T_{water}^i , y T_{oil}^i y dos estados: T_{water} y T_{oil} . Para su desarrollo se establecen un balance de materia y un balance de energía por cada corriente: la corriente de agua que pasa a través del tubo externo y la corriente de aceite que pasa a través del tubo interno.

Balance de materia en el tubo externo

$$\left[\begin{array}{l} \text{velocidad de cambio de} \\ \text{la masa de agua dentro} \\ \text{del tubo externo} \end{array} \right] = \left[\begin{array}{l} \text{Flujo másico de agua} \\ \text{entrando al tubo externo} \end{array} \right] - \left[\begin{array}{l} \text{Flujo másico de agua} \\ \text{saliendo del tubo externo} \end{array} \right] + \left[\begin{array}{l} \text{Velocidad de formación de} \\ \text{masa dentro del tubo externo} \end{array} \right]$$

$$w_{water}^i = w_{water}^o = w_{water} \quad (27)$$

Balance de materia en el tubo interno

$$\left[\begin{array}{l} \text{velocidad de cambio de} \\ \text{la masa de agua dentro} \\ \text{del tubo interno} \end{array} \right] = \left[\begin{array}{l} \text{Flujo másico de agua} \\ \text{entrando al tubo interno} \end{array} \right] - \left[\begin{array}{l} \text{Flujo másico de agua} \\ \text{saliendo del tubo interno} \end{array} \right] + \left[\begin{array}{l} \text{Velocidad de formación de} \\ \text{masa dentro del tubo interno} \end{array} \right]$$

$$w_{oil}^i = w_{oil}^o = w_{oil} \quad (28)$$

2.2.3 Balances de energía

Balance de energía en el tubo externo

$$\left[\begin{array}{l} \text{velocidad de cambio de} \\ \text{energía interna, cinética y} \\ \text{potencial dentro del tubo externo} \end{array} \right] = \left[\begin{array}{l} \text{Flujo de energía interna,} \\ \text{cinética y potencial entrando} \\ \text{al tubo externo por} \\ \text{convección y/o difusión} \end{array} \right] + \left[\begin{array}{l} \text{calor cedido al tubo externo} \\ \text{por conducción} \\ \text{convección y/o radiación} \end{array} \right] - \left[\begin{array}{l} \text{Flujo de energía interna,} \\ \text{cinética y potencial saliendo} \\ \text{del tubo externo por convección} \\ \text{y/o difusión} \end{array} \right]$$

$$c_{water}m_{water} \frac{dT_{water}}{dt} = c_{water}W_{water}T_{water}^i + UA\Delta T - c_{water}W_{water}T_{water} \quad (29)$$

Balance de energía en el tubo interno

$$\left[\begin{array}{l} \text{velocidad de cambio de} \\ \text{energía interna, cinética y} \\ \text{potencial dentro del tubo externo} \end{array} \right] = \left[\begin{array}{l} \text{Flujo de energía interna,} \\ \text{cinética y potencial entrando} \\ \text{al tubo externo por} \\ \text{convección y/o difusión} \end{array} \right] + \left[\begin{array}{l} \text{calor cedido al tubo externo} \\ \text{por conducción} \\ \text{convección y/o radiación} \end{array} \right] - \left[\begin{array}{l} \text{Flujo de energía interna,} \\ \text{cinética y potencial saliendo} \\ \text{del tubo externo por convección} \\ \text{y/o difusión} \end{array} \right]$$

$$c_{oil}m_{oil} \frac{dT_{oil}}{dt} = c_{oil}W_{oil}T_{oil}^i - UA\Delta T - c_{oil}W_{oil}T_{oil} \quad (30)$$

El modelo del intercambiador de calor de tubos concéntricos está dado por el sistema de dos ecuaciones diferenciales (31)

$$\left. \begin{array}{l} \frac{dT_{water}}{dt} = \frac{W_{water}}{m_{water}} T_{water}^i + \frac{UA}{c_{water}m_{water}} \Delta T(T_{water}^i, T_{water}, T_{oil}^i, T_{oil}) - \frac{W_{water}}{m_{water}} T_{water} \\ \frac{dT_{oil}}{dt} = \frac{W_{oil}}{m_{oil}} T_{oil}^i - \frac{UA}{c_{oil}m_{oil}} \Delta T(T_{water}^i, T_{water}, T_{oil}^i, T_{oil}) - \frac{W_{oil}}{m_{oil}} T_{oil} \end{array} \right\} \quad (31)$$

donde ΔT está definido en (1) y U en (15).

El modelo que resulta tiene la estructura matemática que comúnmente se usa para el diseño, la simulación y el control de este tipo de sistemas [44] [45] [46]. Los modelos encontrados en estas referencias derivan siempre de la aplicación de los principios de conservación de materia y energía. Estos modelos han sido ampliamente usados con propósitos de diseño de controladores para intercambiadores de calor de doble tubo e intercambiadores de calor de tanque agitado. Algunas diferencias entre estos modelos se deben principalmente a la forma de definir y estimar los parámetros y las propiedades de los fluidos que se manejan en el sistema. Pero también a pequeñas diferencias en las suposiciones bajo las cuales se deriva el modelo. Por lo tanto, los modelos matemáticos tienen diferentes características matemáticas, dependiendo de la forma de cálculo de propiedades y de parámetros de los modelos, así como de las consideraciones de modelado.

2.3 Modelado del intercambiador de calor por el método de Bond Graph

El modelo matemático del intercambiador de calor es el sistema de ecuaciones (31). A partir de estas ecuaciones se construye el modelo Bond-Graph, siguiendo el procedimiento presentado en [16]. El sistema está formado por un subsistema térmico y por un subsistema hidráulico, definimos para cada subsistema las variables de esfuerzo y flujo. Recordando lo que se mencionó en la introducción, para el pseudo Bond Graph se usa el flujo de entalpía o flujo de calor como variable de flujo, en lugar de la entropía [13].

- **Subsistema térmico**

Variables de flujo: Entalpía o flujo de calor \vec{H} [J/seg]

Variables de esfuerzo: Temperatura T [K]

- **Subsistema hidráulico**

Variable de flujo: Flujo másico w [kgr/seg]

Variable de esfuerzo: Presión P [Pa]

- **Elementos del subsistema térmico**

- **Una fuente de esfuerzo** Se_{water} representa la temperatura en la entrada del tubo externo por donde fluye el agua.

$$Se: T_{water}^i \begin{array}{c} \nearrow \\ \vec{H}_{water}^i \end{array}$$

Figura 2.7 - Representación en Bond-Graph de la fuente de esfuerzo (temperatura a la entrada) de agua

- **Una capacitancia térmica** C_1 representa la dinámica de temperatura en la corriente de agua que circula por el tubo externo. Este es un elemento dinámico que representa almacenamiento de energía potencial.

$$\vec{H}_w = c_w m_w \frac{dT_{water}}{dt} \dots \dots \dots (32)$$

$$\begin{array}{c} T_{water} \nearrow \\ \vec{H}_{water} \end{array} C_1: C_{water} m_{water}$$

Figura 2.8 - Representación en Bond-Graph de la capacitancia térmica del tubo externo

- **Una resistencia modulada** $RM_1: R_{water}^i$ representa el flujo de energía que entra al tubo externo, debido al flujo de materia.

$$\vec{H}_{water}^i = C_{water} w_{water} T_{water}^i \dots (33) \quad RM_1: R_{water}^i = \frac{T_{water}^i}{\vec{H}_{water}^i} = \frac{1}{C_{water}} * \frac{1}{w_{water}} \dots (34)$$

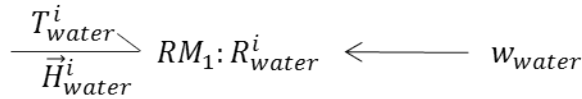


Figura 2.9 - Representación en Bond-Graph del flujo de energía debida al flujo de agua a la entrada del tubo externo

- **Una resistencia modulada.** $RM_2: R_{water}^o$ representa el flujo de energía que entra al tubo externo, debido al flujo de materia.

$$\vec{H}_{water} = C_{water} w_{water} T_{water} \dots (35) \quad RM_2: R_{water}^o = \frac{T_{water}}{\vec{H}_{water}} = \frac{1}{C_{water}} * \frac{1}{w_{water}} \dots (36)$$

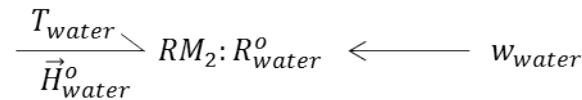


Figura 2.10 - Representación en Bond-Graph del flujo de energía debida al flujo de agua a la salida del tubo externo

- **Una fuente de esfuerzo** Se_{oil} representa la temperatura a la entrada de aceite en el tubo interno.

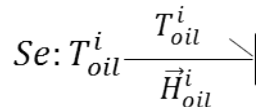


Figura 2.11 - Representación en Bond-Graph de la fuente de esfuerzo (temperatura a la entrada) de aceite

- **Una capacitancia térmica** C_1 representa la acumulación de energía en el tubo externo.

$$\vec{H}_{oil} = c_{oil} m_{oil} \frac{dT_{water}}{dt} \dots (37)$$

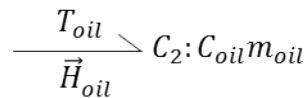


Figura 2.12 - Representación en Bond-Graph de la capacitancia térmica del tubo interno

- **Una resistencia modulada** $RM_3: R_{water}^i$ representa el flujo de energía que entra al tubo externo, debido al flujo de materia.

$$\vec{H}_{oil}^i = C_{oil} w_{oil} T_{oil}^i \dots (38) \quad RM_3: R_{water}^i = \frac{T_{oil}^i}{\vec{H}_{oil}^i} = \frac{1}{C_{oil}} * \frac{1}{w_{oil}} \dots (39)$$

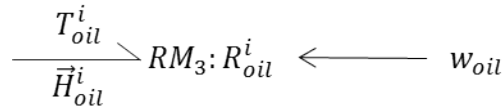


Figura 2.13 - Representación en Bond-Graph del flujo de energía debida al flujo de aceite a la entrada del tubo interno

- **Una resistencia modulada** $RM_2: R_{water}^o$ que representa el flujo de energía que entra al tubo externo, debido al flujo de materia.

$$\vec{H}_{oil}^o = C_{oil} w_{oil} T_{oil} \dots (40) \quad RM_4: R_{oil}^o = \frac{T_{oil}}{\vec{H}_{oil}^o} = \frac{1}{C_{oil}} * \frac{1}{w_{oil}} \dots (41)$$

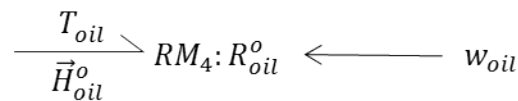


Figura 2.14 - Representación en Bond-Graph del flujo de energía debida al flujo de agua a la salida del tubo externo

- **Una resistencia térmica modulada** RM_5 representa la transferencia de calor del fluido caliente al fluido frío.

$$Q = UA\Delta T \dots \dots \dots (42)$$

$$RM_5 = \frac{\Delta T}{Q} = \frac{1}{UA} \dots \dots \dots (43)$$

Dónde:

$$Q = Q_{water} = Q_{oil}$$

$$\Delta T = \frac{(T_{oil}^i - T_{water}) - (T_{oil} - T_{water}^i)}{\ln(T_{oil}^i - T_{water}) - \ln(T_{oil} - T_{water}^i)}$$

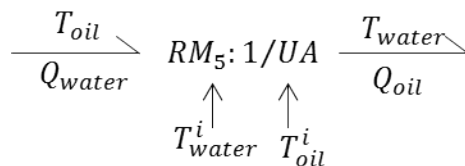


Figura 2.15 - Representación en Bond-Graph de la resistencia térmica en la pared del tubo interno

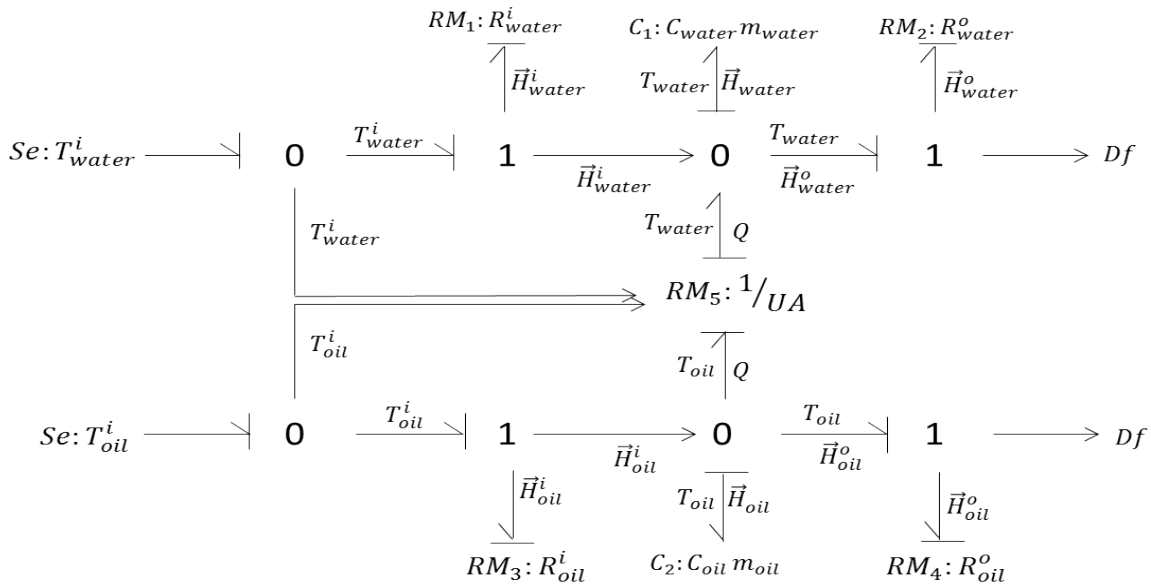
Balances de energía por componente (en cada tubo)

El balance de energía es una sumatoria de variables flujo; por lo tanto, es una ecuación de equilibrio. En una representación en Bond-Graph se usan enlaces series para representar estas ecuaciones de equilibrio.

$$\left[\begin{array}{l} \text{velocidad de cambio de} \\ \text{energía interna, cinética y} \\ \text{potencial dentro del tubo externo} \end{array} \right] = \left[\begin{array}{l} \text{Flujo de energía interna,} \\ \text{cinética y potencial entrando} \\ \text{al tubo externo por} \\ \text{convección y/o difusión} \end{array} \right] + \left[\begin{array}{l} \text{calor cedido al tubo externo} \\ \text{por conducción} \\ \text{convección y/o radiación} \end{array} \right] - \left[\begin{array}{l} \text{Flujo de energía interna,} \\ \text{cinética y potencial saliendo} \\ \text{del tubo externo por convección} \\ \text{y/o difusión} \end{array} \right]$$

$$\vec{H}_{water} = \vec{H}_{water}^i + Q_{water} - \vec{H}_{water}^o$$

$$C_{water} m_{water} \frac{dT_{water}}{dt} = C_{water} w_{water} T_{water}^i + UA\Delta T - C_{water} w_{water} T_{water}^o$$



$$C_{oil} m_{oil} \frac{dT_{oil}}{dt} = C_{oil} w_{oil} T_{oil}^i - UA\Delta T - C_{oil} w_{oil} T_{oil}^o$$

$$\vec{H}_{oil} = \vec{H}_{oil}^i - Q_{oil} - \vec{H}_{oil}^o$$

$$\left[\begin{array}{l} \text{velocidad de cambio de} \\ \text{energía interna, cinética y} \\ \text{potencial dentro del tubo externo} \end{array} \right] = \left[\begin{array}{l} \text{Flujo de energía interna,} \\ \text{cinética y potencial entrando} \\ \text{al tubo externo por} \\ \text{convección y/o difusión} \end{array} \right] - \left[\begin{array}{l} \text{calor cedido al tubo externo} \\ \text{por conducción} \\ \text{convección y/o radiación} \end{array} \right] - \left[\begin{array}{l} \text{Flujo de energía interna,} \\ \text{cinética y potencial saliendo} \\ \text{del tubo externo por convección} \\ \text{y/o difusión} \end{array} \right]$$

• **Elementos del subsistema hidráulico**

- **Una fuente de flujo Sf_{water}** representa el flujo másico de la corriente de agua que pasa por el tubo externo

$$Sf: w_{water} \longrightarrow$$

Figura 2.16 - Representación en Bond-Graph de la fuente de flujo de agua

- **Una fuente de flujo Sf_{oil}** representa el flujo másico de la corriente de aceite en la entrada del tubo interno

$$Sf: w_{oil} \longrightarrow$$

Figura 2.17 - Representación en Bond-Graph de la fuente de flujo de aceite

Balances de materia por componente (en cada tubo)

- Balance de materia en el tubo externo

$$w_{water}^i = w_{water}^o = w_{water} \dots \dots \dots (27)$$

$$Sf: w_{water} \left| \longrightarrow \right. \mathbf{1} \left| \longrightarrow \right. Se: 0$$

- Balance de materia en el tubo interno

$$w_{oil}^i = w_{oil}^o = w_{oil} \dots \dots \dots (28)$$

$$Sf: w_{oil} \left| \longrightarrow \right. \mathbf{1} \left| \xrightarrow{w_{oil}} \right. Se: 0$$

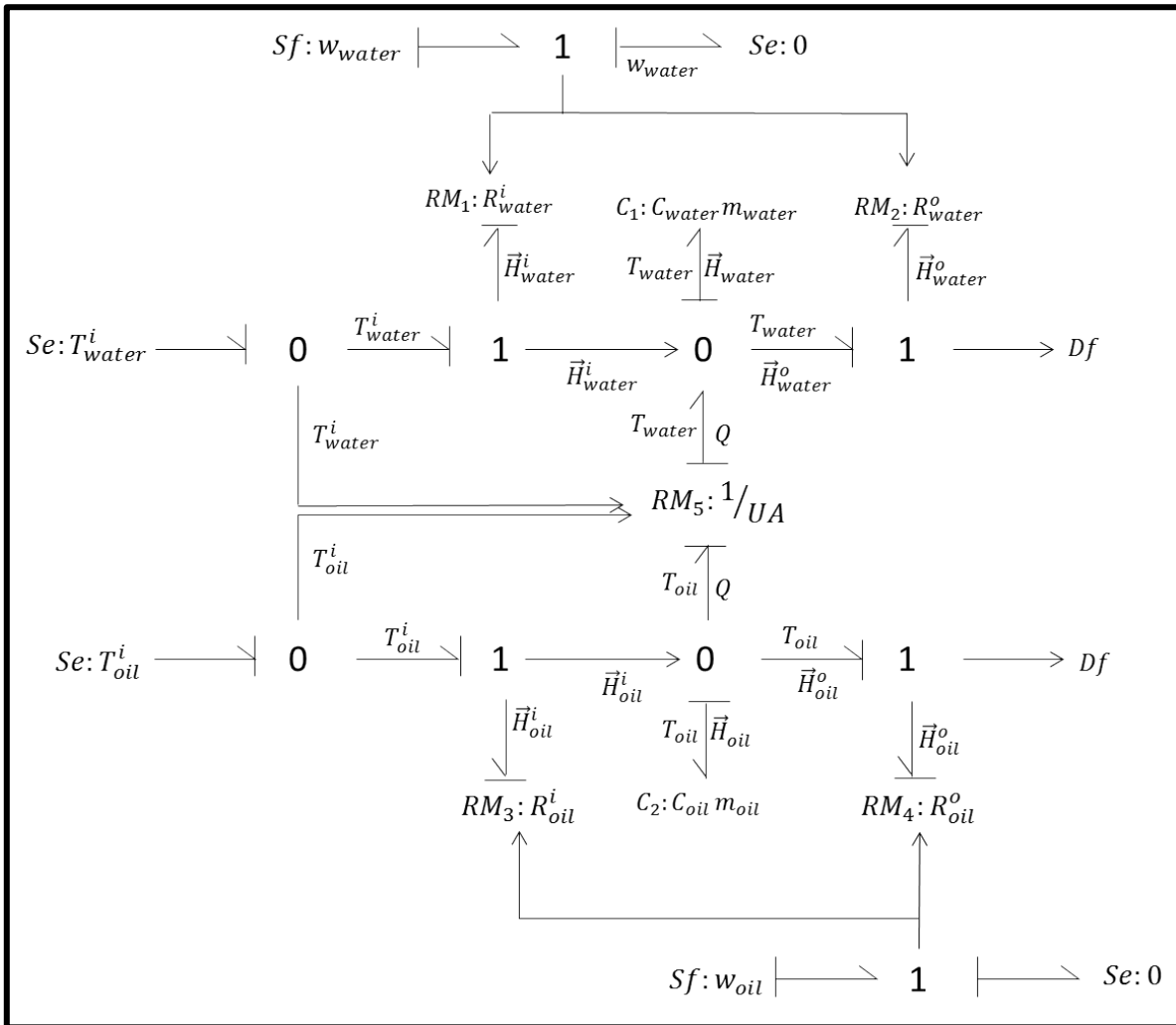


Figura 2.18 - Modelo en Bond Graph del intercambiador de calor de flujo a contracorriente en lazo abierto

2.4 Simulaciones del modelo Bond Graph mediante la librería para MATLAB Simulink

En primer lugar, se realizó una simulación utilizando una función-S para probar el modelo matemático (31), obtenido en ecuaciones diferenciales. El propósito es observar la dinámica del modelo del intercambiador de calor ante algunos disturbios en las entradas. La prueba consiste en aplicar un escalón de 1.1 en el flujo de alimentación de aceite, es decir aumentándolo en un 10% a los 1000s, teniendo como condición inicial el estado estable o equivalentemente, las condiciones nominales de operación o punto de operación nominal.

Posteriormente se realiza otro escalón, esta vez en la temperatura de entrada del aceite en el tubo interno, aumentando la temperatura 5°C a los 5000s. El diagrama de la función-S y los resultados de las pruebas propuestas se muestran a continuación.

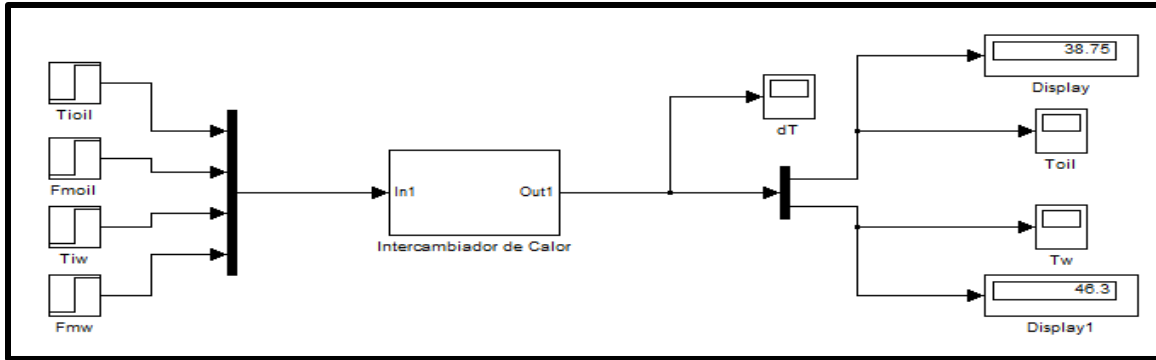


Figura 2.19 - Esquema de Simulink utilizando una función S para simular la dinámica del intercambiador de calor.

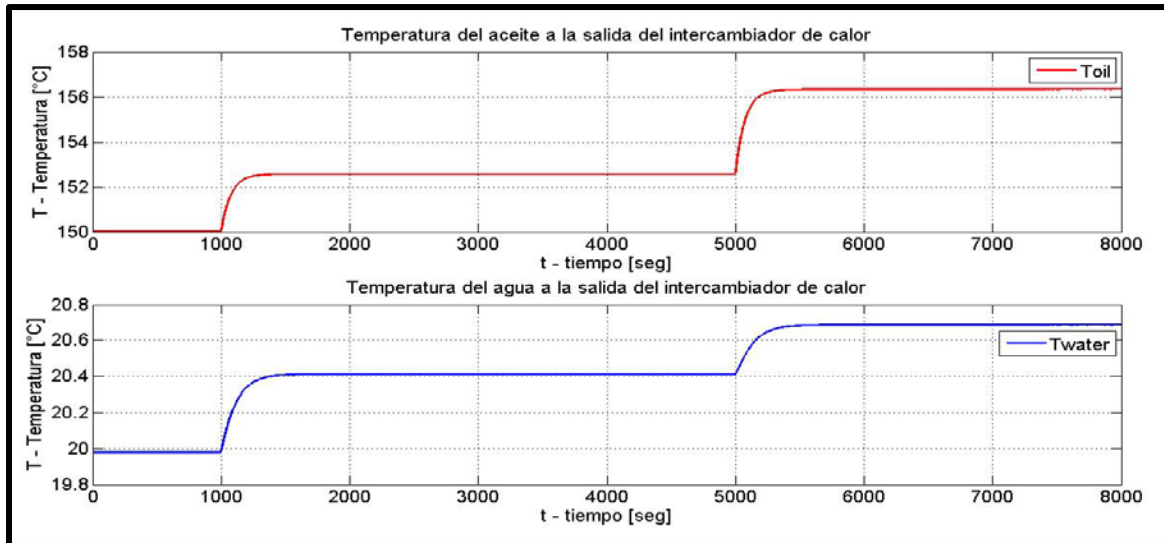


Figura 2.20 – Dinámica del intercambiador de calor en lazo abierto ante perturbaciones en el flujo y en la temperatura de aceite. Simulación en Simulink.

Posteriormente se desarrolló el modelo Bond-Graph utilizando la librería BGv2.1 desarrollada para MATLAB Simulink, dedicada a la simulación de modelos Bond Graph. En la **Figura 2.21** se presenta el simulador construido en esta librería. En la **Figura 2.22** se presentan los resultados de la simulación ante las mismas perturbaciones realizadas anteriormente con la función-S. Los resultados son prácticamente iguales, con lo cual se prueba la funcionalidad de la librería.

En ambos casos, la temperatura de salida del aceite inicia en 150 °C, se estabiliza en 152.6 °C después de aplicar el primer escalón, y finalmente se estabiliza en 156.4 °C después de aplicar el segundo escalón.

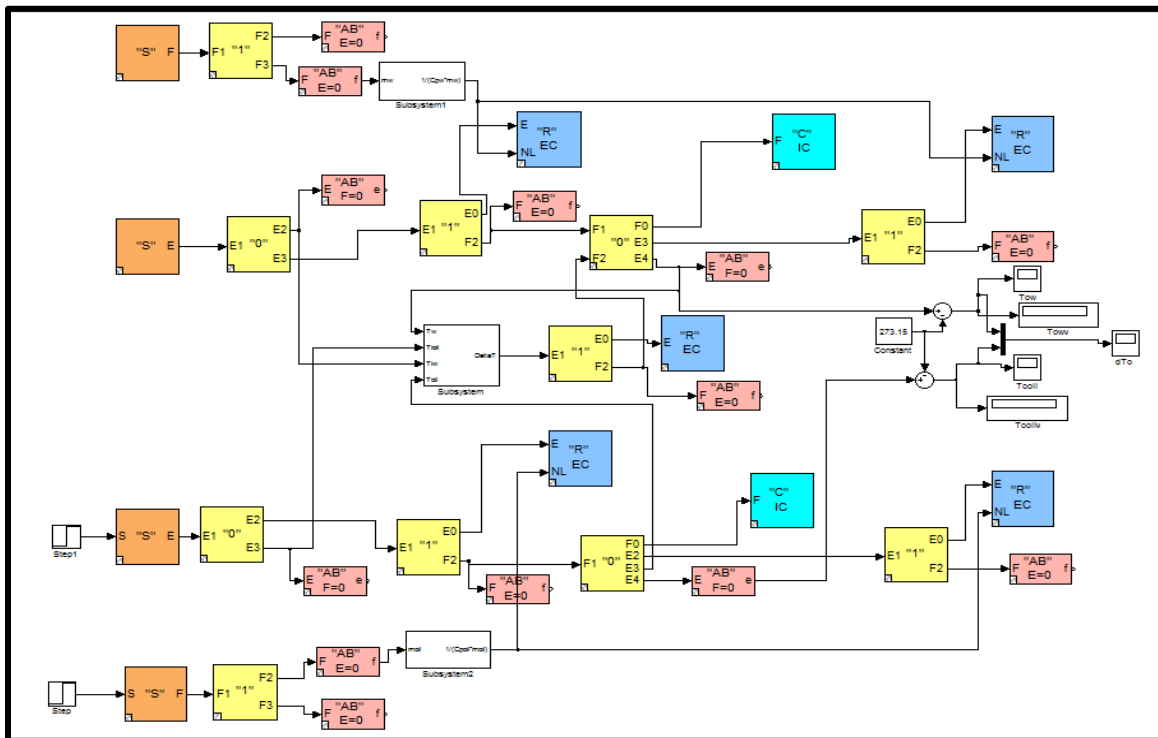


Figura 2.21 - Esquema de la simulación en la librería BGv2.1 de un intercambiador de calor de flujo a contracorriente.

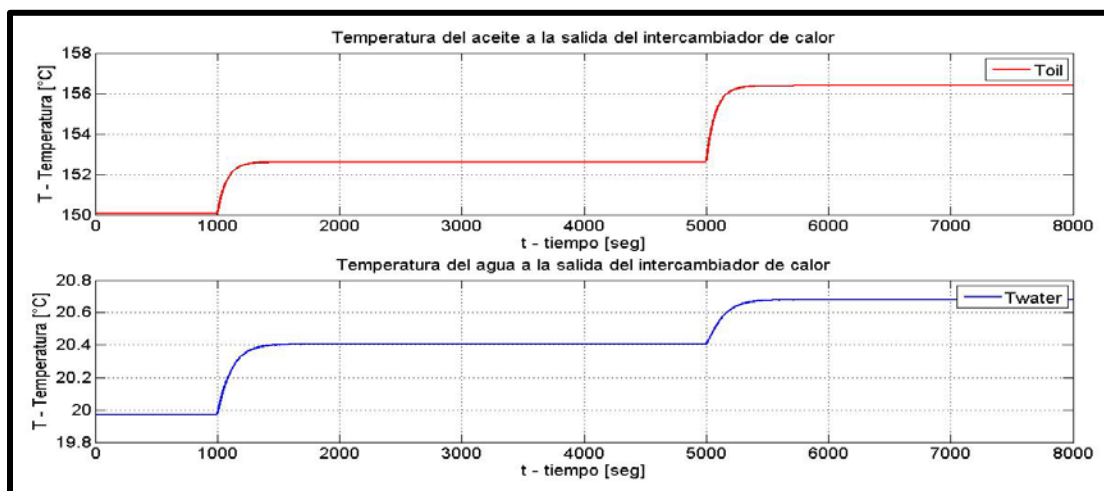


Figura 2.22 - Dinámica del intercambiador de calor en lazo abierto ante perturbaciones en el flujo y en la temperatura de aceite. Simulación con la librería BGv2.1.

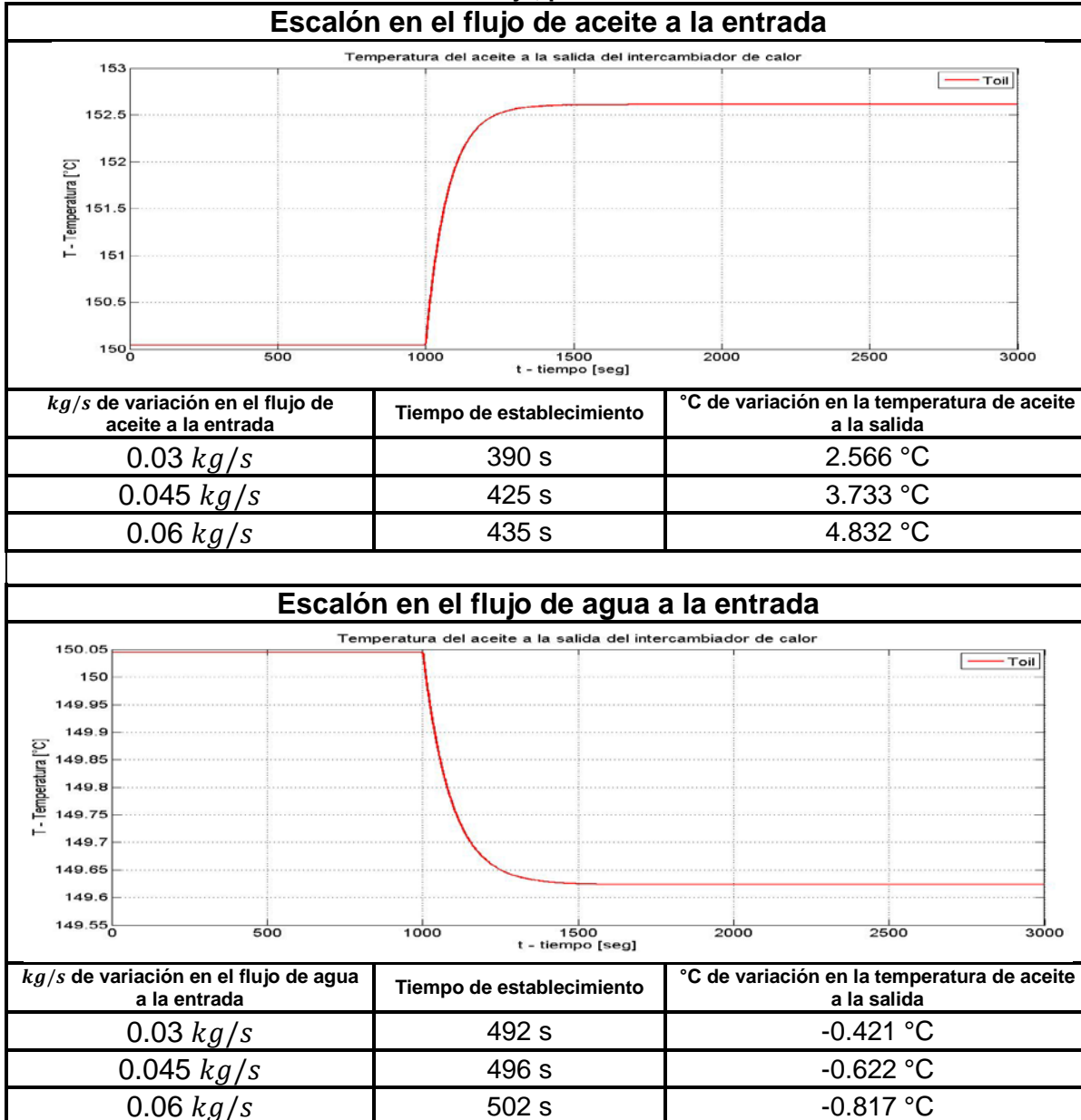
Posteriormente se realizaron pruebas agregando perturbaciones en forma de escalón a las variables de entrada: para las variables de temperatura en la

entrada se aplicó una perturbación en forma de escalón de 5, 10 Y 15 °C, lo que corresponde a variaciones de 2.5, 5 y 7.5% con respecto a la temperatura de entrada de aceite en estado estable y 150, 200 y 250% con respecto a la temperatura de entrada de agua en estado estable. A las variables de flujo en la entrada del intercambiador de calor se les aplicó una perturbación en forma de escalón de 0.03, 0.045, 0.06, *kg/s*, correspondiente a variaciones de 10, 15 y 20% con respecto al flujo de entrada de aceite en estado estable y de 5.24, 7.86 y 10.48% con respecto al flujo de entrada de agua en estado estable. Los parámetros del modelo de intercambiador de calor que se usaron para estas pruebas se encuentran en la **Tabla 2-3**, los resultados se muestran en la **Tabla 2-6** y **Tabla 2-7**

Tabla 2-6 - Escalones en las temperaturas de entrada. Simulación en lazo abierto

Escalón en la temperatura de aceite a la entrada		
°C de variación en la temperatura de aceite a la entrada	Tiempo de establecimiento	°C de variación en la temperatura de aceite a la salida
5°C	310 s	3.68 °C
10°C	363 s	7.37 °C
15°C	401 s	11.06 °C
Escalón en la temperatura de agua a la entrada		
°C de variación en la temperatura de agua a la entrada	Tiempo de establecimiento	°C de variación en la temperatura de aceite a la salida
5 °C	550 s	1.315 °C
10 °C	589 s	2.629 °C
15 °C	610 s	3.944 °C

Tabla 2-7 - Escalones en las entradas de flujo, perturbaciones en lazo abierto



De la **Tabla 2-6** y **Tabla 2-7** podemos apreciar que las variaciones que tienen un mayor efecto en la temperatura de aceite en la salida del intercambiador son las variaciones de temperatura de aceite a la entrada, y sin embargo fue la variable que mejores tiempos de estabilización tuvo. La variable que menor repercusión tuvo fue el flujo de entrada al agua, no fue la que tardó mayor tiempo en estabilizarse, pero si fue la segunda que más tardó.

Es importante considerar que, dado que la variable que más afecta a la salida es la temperatura de aceite a la entrada, nuestro sistema de control debería de ser capaz entonces de soportar las perturbaciones en dicha entrada, manteniendo el valor de referencia de la variable controlada. Es importante considerar también que los límites de operación de la planta dependen de los requerimientos de enfriamiento del sistema y de las temperaturas de operación de los fluidos, ya que estos no deben de llegar al punto de ebullición en cuyo caso el modelo ya no se considera adecuado, también es de considerar las dimensiones del intercambiador de calor, ya que para un operación de mayor rango se requeriría un intercambiador más grande o quizá diferentes condiciones de enfriamiento y de flujos.

Con el fin de analizar la degradación del desempeño del intercambiador de calor, se realizaron simulaciones para analizar el efecto de ensuciamiento debido a una operación prolongada. Se consideran diferentes tiempos de operación que corresponden a diferentes grados de ensuciamiento. De estas simulaciones se obtienen la temperatura de aceite para valores de la resistencia R_D debida al ensuciamiento, que corresponden a un año y a 6 meses de ensuciamiento. Con esta información, se puede conocer aproximadamente cuánto se degrada el desempeño del intercambiador de calor en estos periodos. En la **Tabla 2-8** se muestran los cambios de temperatura en condiciones de deterioro en comparación con las temperaturas que resultan cuando el intercambiador de calor está limpio.

Tabla 2-8 - Valores de temperatura a diversas condiciones de ensuciamiento

	Valores en condiciones nominales $R_D = 0 \text{ m}^2\text{K/W}$	Valores en condiciones de ensuciamiento de 6 meses $R_D = 0.00044 \text{ m}^2\text{K/W}$	Valores en condiciones de ensuciamiento de 1 año $R_D = 0.00088 \text{ m}^2\text{K/W}$
T_{oil}	150.047	152.52	154.77
T_{water}	19.97	19.47	19.028

Se observa que la variación de la temperatura de salida es de 2.506 y 4.723 °C a a 6 meses, y a un año, respectivamente. Para las mismas entradas, el

desempeño del intercambiador se degrada conforme la capacidad de transferencia de calor se disminuye (y aumenta la resistencia R_D). En una segunda prueba, se simuló el intercambiador de calor limpio, con ensuciamiento de 6 meses y con ensuciamiento de 1 año. Las condiciones iniciales cambiaron para cada caso, fueron de 150.05, 152.52 y 154.77°C, como se indica en la **Tabla 2-8**. Se realizaron perturbaciones en las entradas para cada uno de los tres niveles de ensuciamiento, con el objetivo de comparar la dinámica del intercambiador ante perturbaciones a diferentes condiciones de ensuciamiento. Se simulan entonces escalones en las temperaturas de entrada aumentando la temperatura de aceite en la entrada en 5°C. Los resultados se muestran en la **Figura 2.23**, **Figura 2.24** y **Figura 2.25**.

Como resultado se observa que ante una perturbación de +5°C en la temperatura de aceite en la entrada, la temperatura de salida del aceite cambia de 150 a 153.9°C en un intercambiador de calor limpio, de 152.2 a 156.1 en un intercambiador de calor con 6 meses de utilización, y de 154.77 a 158.2 en un intercambiador de calor con 1 año de utilización. Esto significa que un cambio del 10% en la temperatura de entrada, genera un cambio de 3.9°C en un intercambiador limpio, de 6.1°C en un intercambiador sucio con 6 meses en operación y de 8.2 en un intercambiador sucio con 1 año en operación, con relación a la temperatura en las condiciones nominales de diseño (150°C).

Por otro lado, un cambio de 5°C en la temperatura de entrada del agua representa un porcentaje más alto de perturbación porque la temperatura de entrada del agua es baja con relación a la del aceite. Sin embargo, la desviación máxima es de 6°C, con relación a la condición de diseño.

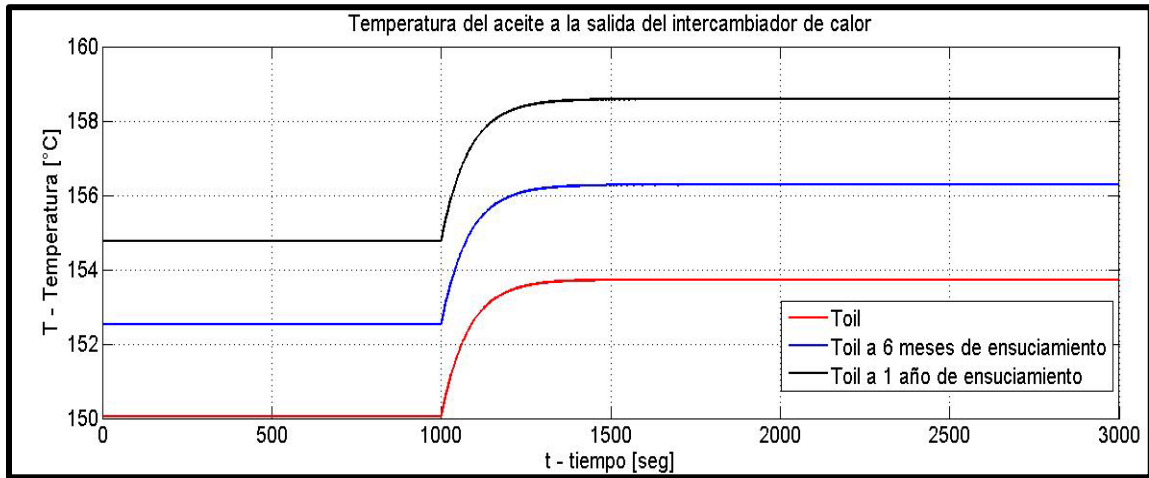


Figura 2.23 - Respuesta de T_{oil} ante un escalón en la temperatura de aceite a la entrada a diferentes condiciones de ensuciamiento

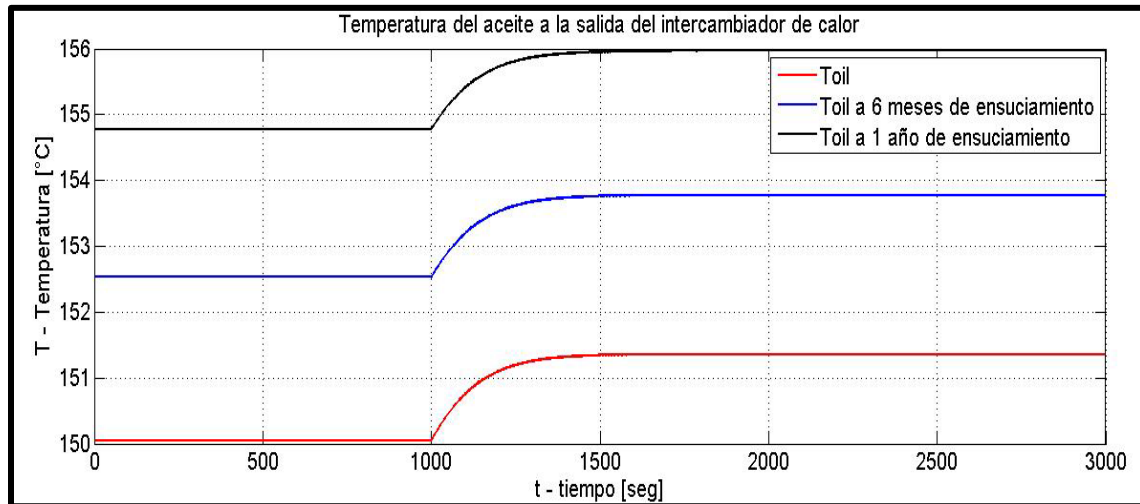


Figura 2.24 - Respuesta de T_{oil} ante un escalón en la temperatura de agua a la entrada a diferentes condiciones de ensuciamiento

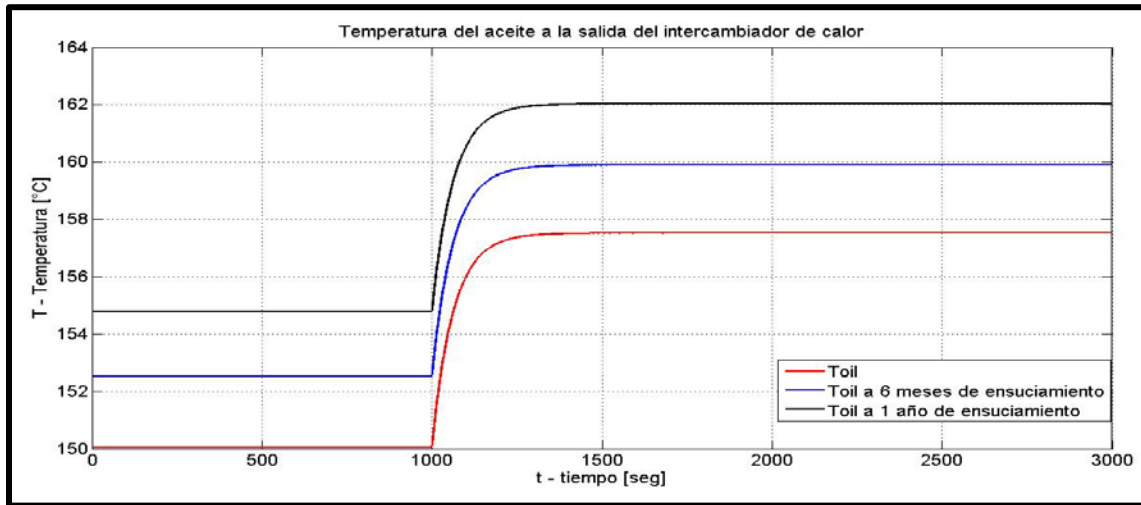


Figura 2.25 - Respuesta de T_{oil} ante un escalón en flujo de aceite a la entrada a diferentes condiciones de ensuciamiento

Este análisis tiene utilidad para definir los umbrales para la evaluación de los residuos como un paso importante del esquema FDI, en el que se contempla incluir detección de falla en el parámetro U .

3. Capítulo 3 – Lazo de control del intercambiador de calor

3.1 Sistema de control

La variable de estado o variable de salida que se desea controlar en el proceso es la temperatura del aceite a la salida del intercambiador de calor T_{oil} , el objetivo de control es regular T_{oil} a una temperatura de 150°C. La forma más accesible de controlar esta temperatura es manipulando el flujo del agua de enfriamiento w_{water} que pasa por el tubo externo. El esquema de control es el que se muestra en la **Figura 3.1**, y las variables de control están especificadas en la **Tabla 3-1**.

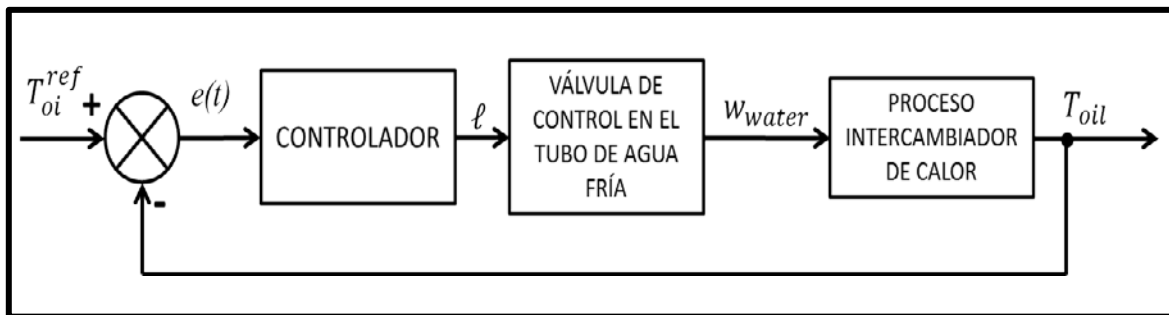


Figura 3.1 - Esquema de control del proceso de intercambiador de calor

Tabla 3-1 - Variables del esquema de control

Variables del sistema de control	
T_{oil}	Variable de salida controlada - Temperatura del aceite a la salida del tubo
w_{water}	Variable manipulada – Flujo másico de agua a la salida de la válvula
T_{oi}^{ref}	Señal de referencia o set point – Temperatura de salida deseada para el aceite
$e(t)$	Señal de error – Diferencia entre la temperatura de salida del aceite deseada y la temperatura de salida del aceite medida
l	Señal de control – Señal que modifica la variable manipulada

3.2 Descripción de la válvula de control

Como se ha mencionado, el objetivo de control en el proceso es regular la temperatura de aceite en la salida del intercambiador de calor. Este objetivo se logra manipulando el flujo de agua de enfriamiento a través de una válvula. El

propósito principal de esta tesis es realizar diagnóstico de fallas en actuadores y parámetros del sistema; por lo tanto, para detectar y localizar fallas en el actuador (válvula), el esquema de diagnóstico propuesto se prueba en simulación induciendo fallas en la válvula que determina cuál es el flujo de agua de enfriamiento que va a entrar al intercambiador de calor.

El esquema FDI se desarrolla con un enfoque basado en modelo, por lo tanto, se requiere un modelo de diagnóstico para válvula de control. El comportamiento en régimen permanente y la dinámica de la válvula usada para manipular el flujo de agua se predicen mediante un modelo Bond-Graph no lineal. Para determinar los parámetros de este modelo, la válvula se dimensiona en función de las características del flujo de agua en el intercambiador de calor y considerando como partida el flujo nominal de operación. Hasta el momento, se ha dado el valor del flujo másico nominal. Para el cálculo estático y dinámico de una válvula, se utiliza el flujo volumétrico o caudal.

3.3 Dimensionamiento de la válvula de control

La ecuación (44) representa la relación estática no lineal entre el flujo a través de la válvula y el porcentaje de apertura de esta.

$$q = f(\ell)C_v \sqrt{\Delta P_v} \quad (44)$$

Dónde ΔP_v es la caída de presión en la válvula, $f(\ell)$ representa la curva característica de la válvula (relación entre flujo y apertura), q es el valor de caudal o flujo volumétrico que se obtiene con el porcentaje de apertura ℓ y C_v es el coeficiente de válvula.

El obturador determina la característica de caudal de la válvula, es decir, la relación que existe entre la posición del obturador y el caudal de paso del fluido. La característica de un fluido incompresible fluyendo en condiciones de presión diferencial constante a través de la válvula se denomina “característica de caudal inherente”, y se representa usualmente considerando como abscisas la carrera del obturador de la válvula y como ordenadas el porcentaje de caudal máximo a una presión diferencial constante (de diseño). Se mencionan a continuación los 3 tipos

de característica de válvula $f(\ell)$, la cual está relacionada con la apertura de la válvula ℓ la **Figura 3.2** muestran las diferentes curvas características de válvula.

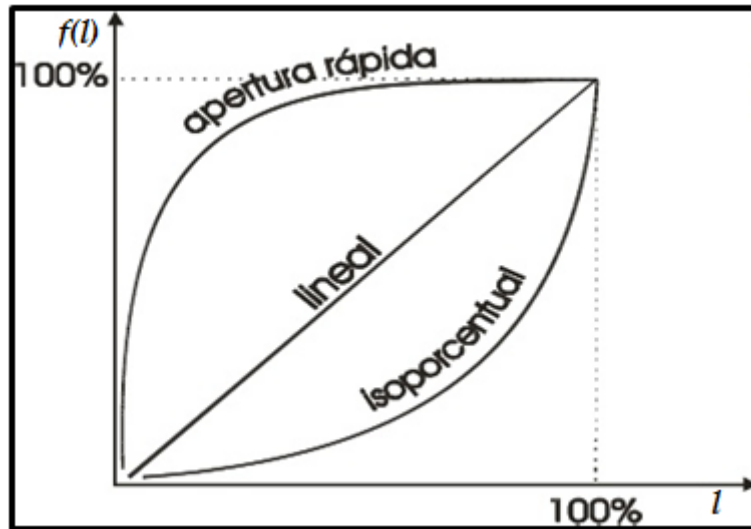


Figura 3.2 - Diferentes características de válvula

- Obturador con Característica Lineal: $f(\ell) = \ell$
- Obturador con Característica de Apertura Rápida: $f(\ell) = \sqrt{\ell}$
- Obturador con Característica Isoporcentual: $f(\ell) = R^{\ell-1}$

Elegimos la característica lineal $f(\ell) = \ell$ (la linealidad solo se refiere al parámetro $f(\ell)$, no a las ecuaciones que relacionan el flujo y la caída de presión a través de la válvula), dado que es común hacer esta consideración en la selección de válvulas de control [42]. Para calcular el coeficiente de válvula C_v , se usa la relación (44). Despejando C_v como incógnita obtenemos (45).

$$C_v = \frac{q_d}{\ell_d \sqrt{\Delta P_{vd}}} \quad (45)$$

dónde:

$\Delta P_{vd} = 8 \text{ bar}$ es la caída de presión de diseño en la válvula.

$q_d = 0.03535 \text{ m}^3/\text{min}$ es el caudal de diseño para el cual se calcula el coeficiente de válvula C_v equivalente a 0.5725 kg/s de flujo másico.

$\ell_d = 0.2$ es el porcentaje de apertura de la válvula al cual se obtiene q_d para el caso de una C_v calculado para un obturador con característica lineal $f(\ell) = \ell$.

Los datos anteriores son los datos de diseño de la válvula usada para el control de temperatura de aceite en el intercambiador de calor. Para poder obtener la gráfica que relaciona que relaciona el flujo con el porcentaje de apertura de la válvula, se calcula la caída de presión en la válvula ΔP_v para cada valor de caudal q , haciendo uso de (46).

$$\Delta P_v = P_b - \Delta P_{pd} \left(\frac{q}{q_d} \right)^2 \quad (46)$$

Dónde:

ΔP_v es la caída de presión en la válvula

$P_b = 10 \text{ bar}$ es la presión (constante) de impulso de la bomba.

$\Delta P_{pd} = 2 \text{ bar}$ es la caída de presión de diseño en el proceso (en el intercambiador de calor) para q_d .

q es el valor del caudal al cual se desea calcular el porcentaje de apertura de la válvula.

Sustituyendo (46) en (44), considerando los valores de diseño (ΔP_{pd} y q_d), y despejando ℓ se obtiene la ecuación que caracteriza el desempeño de la válvula de control para el intercambiador de calor:

$$\ell = \frac{q}{C_v \sqrt{\Delta P_v}} = \frac{q}{C_v \sqrt{10 - 2 \left(\frac{q}{0.03535} \right)^2}}, \text{ con } C_v = 0.0607 \quad (47)$$

Con (47) se obtuvo la gráfica de la **Figura 3.3** que representa la relación estática entre el flujo inherente y el porcentaje de apertura de la válvula. Este diseño permite una variación de flujo entre 0 y $0.0708 \text{ m}^3/\text{min}$, considerando que el valor nominal es de $0.03535 \text{ m}^3/\text{min}$ al 20% de apertura, la válvula permite una acción de control en ese rango, lo que se considera conveniente debido que a partir del caudal en condiciones nominales q_d , hasta el caudal máximo $q_{max} = 0.0708 \text{ m}^3/\text{min}$, se tiene prácticamente el doble del flujo volumétrico. Si se

hubiera elegido una apertura inicial en 50%, esto limitaría bastante la acción del controlador debido que la relación entre flujo y apertura de la válvula, no es lineal. Por otro lado, en simulaciones de procesos, es importante limitar la acción de la válvula para evitar sobretiros que no son convenientes en la práctica.

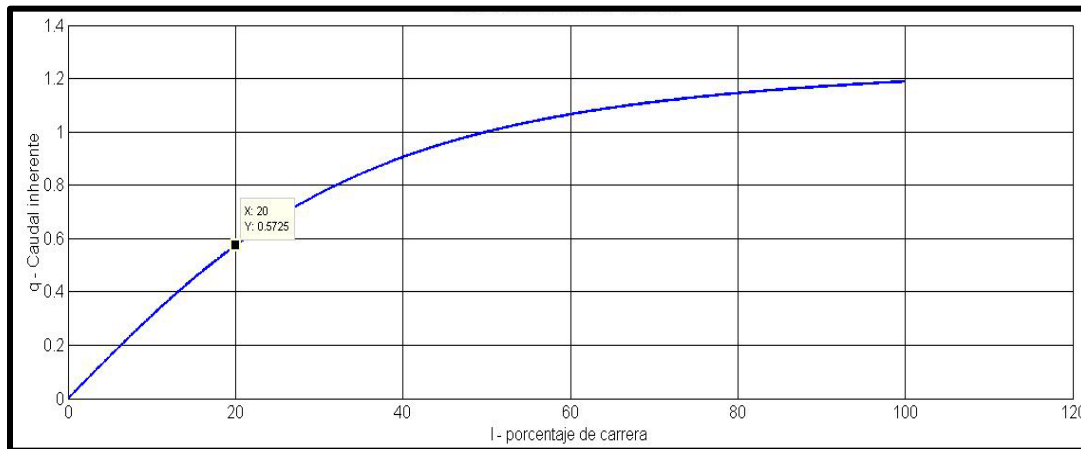


Figura 3.3 – Curva de desempeño de la válvula

3.4 Modelo dinámico de la válvula de control

Cuando un modelo de válvula es requerido, el modelo depende de la aplicación que se le vaya a dar. Comúnmente, el modelo para diseño o cálculo de una válvula en procesos, es un conjunto de relaciones algebraicas que definen el desempeño de una válvula relacionando normalmente el flujo volumétrico con la apertura de la válvula a la cual se proporciona ese caudal. El procedimiento de cálculo o dimensionamiento de una válvula está dado en la sección anterior [45], Este cálculo no da información sobre los retardos, histéresis u otras características dinámicas de una válvula real [47]. Para aplicaciones de control, el interés es más bien poder representar la dinámica de las válvulas. El comportamiento de una válvula de control depende de la posición en la que se encuentre en el momento de actuar, de la dirección de movimiento (apertura y cerrado), así como de la amplitud de la señal. El tiempo muerto en la respuesta de una válvula depende de la magnitud del cambio, de hecho, cuando el cambio es más grande, la válvula tiene un comportamiento similar al de un sistema lineal, y para señales muy

grandes, la saturación de la válvula es conveniente para evitar sobretiros [48]. Se ha observado que el comportamiento dinámico, en términos generales puede ser aproximado con una función de transferencia de primer orden. Entonces es una práctica común usar un modelo lineal, con una ganancia estática o ganancia de error de estado estable. En efecto, las curvas características de desempeño de las válvulas a menudo no son consideradas para la selección de la válvula [48], tampoco para obtener el modelo dinámico de la válvula. Por otro lado, no es raro que la operación de la válvula se limite a la región lineal de la curva característica de desempeño (relación caudal-apertura de válvula). En ocasiones, la ganancia estática es considerada por simplicidad igual a 1.

En este trabajo de tesis se tomaron en cuenta las curvas características de desempeño de la válvula y los requerimientos de flujo del proceso (sección 3.3) para obtener el modelo de la válvula. El modelo deriva de la ecuación (28) definida en [45]. Además, el modelo de las curvas de desempeño es no lineal. También se consideró la dinámica característica de válvulas de control, asimilando este comportamiento en un comportamiento dinámico de primer orden en términos de una constante de tiempo para complementar el modelo de la válvula.

En el true-Bond-Graph las variables de esfuerzo y de flujo para sistemas hidráulicos son caída de presión y flujo volumétrico respectivamente; sin embargo, dado el modelo obtenido, la salida del controlador es " ℓ " y es la entrada en el modelo de la válvula. Por lo tanto, el flujo volumétrico " q " es la salida del modelo de la válvula como variable de flujo. Para el modelo pseudo Bond-Graph, el porcentaje de apertura " ℓ " (el cual indirectamente determina la caída de presión a través de la válvula) es la variable de esfuerzo, y q es la variable de flujo.

Como ya se mencionó anteriormente el paso de flujo a través de una válvula puede verse como una resistencia hidráulica no lineal. Podemos tener entonces una relación entre la variable de esfuerzo y la variable de flujo, expresada como se muestra en las ecuaciones (48) y (49).

$$\frac{\ell}{q} = \frac{1}{C_v \sqrt{\Delta P_v(q)}} \quad (48)$$

$$\frac{e}{f} = R(q) \quad (49)$$

Para la válvula de control del intercambiador de calor, existe una dependencia en la caída de presión en la válvula ΔP_v , con el valor de caudal q , en la forma como se muestra en la ecuación (50).

$$\frac{\ell}{q} = \frac{1}{0.0607 \sqrt{10 - 2 \left(\frac{q}{0.03535} \right)^2}} \quad (50)$$

La relación estática entre el caudal y el porcentaje de apertura es la ecuación de diseño para dimensionamiento de válvulas [45], por lo que el modelo de la válvula respeta el comportamiento real de una válvula además de que está en función de las variables que definen dicho comportamiento.

También se pretende modelar la dinámica de la válvula, es decir, el retardo de la válvula para entregar el valor de caudal q a la salida. La dinámica puede describirse como un modelo dinámico de primer orden, y se modela a través de un elemento de almacenamiento de energía, como puede ser un capacitor o un inductor. Se utiliza un inductor debido a que en sistemas fluídicos o hidráulicos, el elemento de inductancia modela el almacenamiento de energía cinética, y se usa para representar la variación del flujo de fluidos. La relación esfuerzo y flujo del elemento inductivo se presenta en la ecuación (51).

$$\ell = L_h \frac{dq}{dt} \quad (51)$$

En resumen, el modelo de la válvula tiene como variable de flujo el flujo volumétrico y como variable de esfuerzo la apertura de la válvula. Consta de dos elementos: Una resistencia hidráulica no lineal caracterizada por $R_H(q)$ y un inductor caracterizado por el parámetro L_H . El modelo matemático es una

ecuación diferencial ordinaria, no lineal, de primer orden con parámetro variable (52):

$$\ell = L_h \frac{dq}{dt} + R_h(q) q \quad (52)$$

donde R_h depende de la variable dependiente q y se calcula como se indicó en (46) y (48):

$$R_h(q) = \frac{1}{C_v \sqrt{P_b - \Delta P_{pd} \left(\frac{q}{q_d}\right)^2}}$$

En la **Tabla 3-2** obtenida del manual de especificación dinámica de válvulas de control Entech [49] sugieren constantes de tiempo máximas τ para válvulas de control de flujo, sin llegar a especificar un proceso en particular.

Tabla 3-2 - Tipos de velocidad de respuesta de válvulas de control

Velocidad del lazo de control	Constante de tiempo τ para válvula de control
Muy rápido (1 segundo)	0.2 segundos
Rápido (5 segundos)	1 segundo
Nominal (10 segundos)	2 segundos
Lento (1 minuto)	12 segundos

El manual de ingeniería química de Albright [50] sugiere una constante de tiempo no mayor 2 segundos, dado que el intercambiador de calor es un proceso lento, la dinámica de la válvula resulta insignificante en comparación con la del intercambiador de calor, por lo que se opta entonces por una constante de tiempo de un segundo $\tau = 1s$.

Para determinar el valor de la inductancia hidráulica L_h , se considera una constante de tiempo $\tau = 1s$ y se calcula R_h en las condiciones de operación nominales. En estas condiciones R_h tiene un valor de 5.82. Si el modelo de válvula obtenido en la ecuación (35) fuera lineal, entonces el valor de la constante de tiempo sería $\tau = R_h/L_h$, por lo que para obtener una constante de tiempo $\tau = 1s$ se tiene que:

$$L_h = R_{h,nom} = 5.82$$

El modelo dinámico de la válvula relaciona las variables de flujo y esfuerzo. En régimen permanente el modelo es equivalente a la ecuación de curvas de desempeño de la válvula (53).

$$\ell = 5.82 \frac{dq}{dt} + \frac{q}{0.0607 \sqrt{10 - 2 \left(\frac{q}{0.03535} \right)^2}}$$

$$\frac{dq}{dt} = \frac{1}{5.82} \ell - \frac{1}{5.82} \frac{q}{0.0607 \sqrt{10 - 2 \left(\frac{q}{0.03535} \right)^2}} \quad (53)$$

Condición inicial: @ $t = 0$ $q_d = 0.03535 \text{ m}^3/\text{min}$

En términos de flujo másico, las condiciones iniciales son: $w_{water} = 0.5725 \text{ kg/s}$. En la **Figura 3.4** puede apreciarse la respuesta dinámica de la válvula de control ante un escalón partiendo de 20% de apertura hasta el 80% de apertura, el tiempo que tarda en alcanzar el valor de referencia el flujo másico de la válvula está directamente relacionado con la constante de tiempo τ [51].

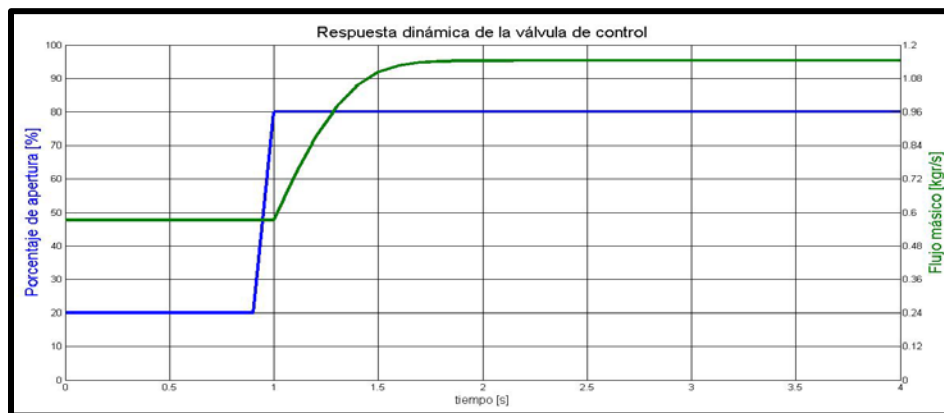


Figura 3.4 - Respuesta dinámica de una válvula de control ante un escalón

Una vez teniendo el circuito equivalente que representa la dinámica de la válvula de control, procedemos a formar su modelo en Bond Graph. El cual inicia con una fuente de esfuerzo que representa el porcentaje de apertura de la válvula, conectada en serie con un elemento disipativo, el cual representa la resistencia no lineal de la válvula de control y un elemento de acumulación, el cual representa la dinámica de respuesta de la válvula, el modelo causal de la válvula puede verse en la **Figura 3.5**.

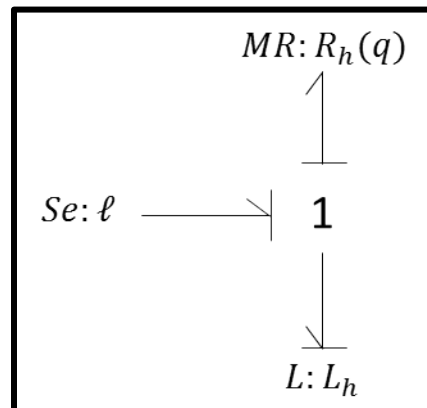


Figura 3.5 - Modelo Bond-Graph causal de la válvula de control

En la **Figura 3.6** puede verse el modelo en Bond Graph del intercambiador de calor controlado, junto con el modelo de la válvula.

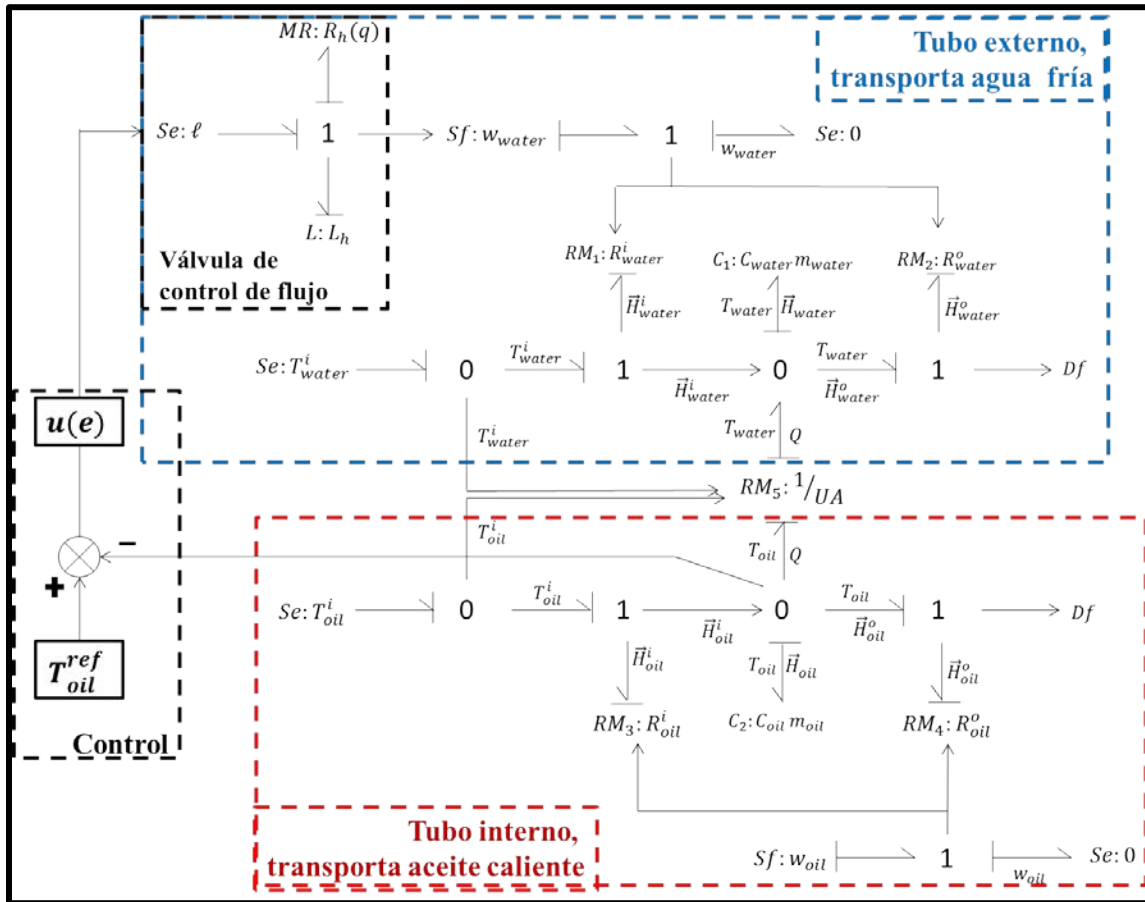


Figura 3.6 - Modelo en Bond Graph del intercambiador de calor de flujo a contracorriente, con válvula de control y controlador

3.5 Sintonización del controlador

El controlador PID es sintonizado por dos diferentes metodologías de sintonización, usando las fórmulas de Ziegler-Nichols (ZN), y por el método de Chien-Hrones-Reswick (CHR), los parámetros del controlador calculados por ambos métodos se muestran en la **Tabla 3-3**.

Tabla 3-3 - Parámetros del controlador calculados por los métodos de ZN y CHR

Controlador	K	Ti	Td	Tp
PID ZN	-2.44	4	1	6.8
PID CHR	-1.93	4.8	0.84	6.8

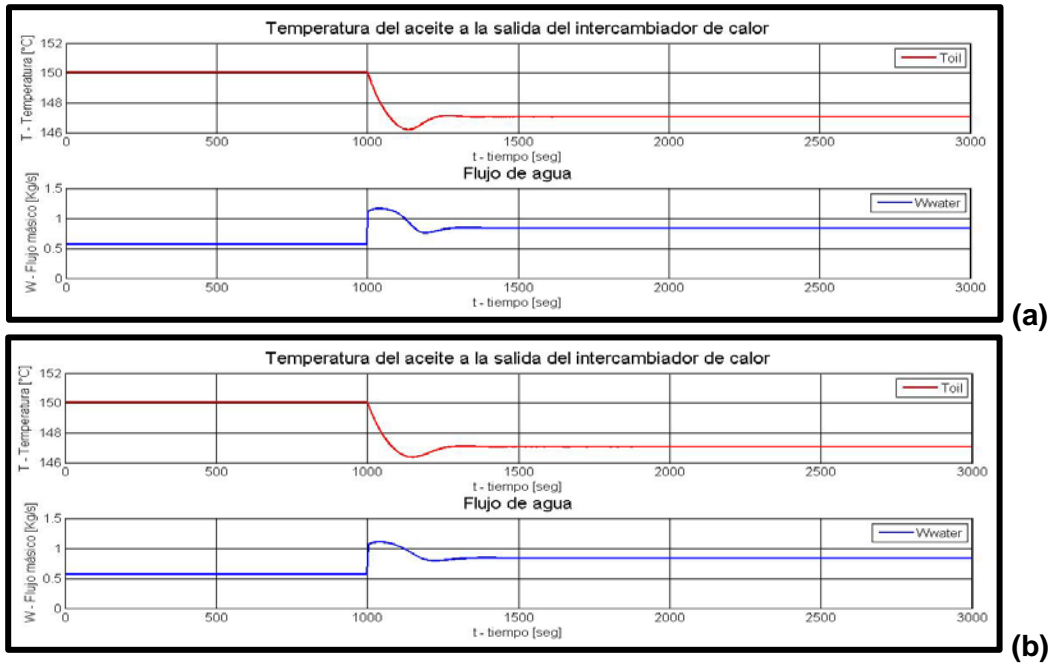


Figura 3.7 - Resultados de un escalón aplicado a la referencia de temperatura de aceite con un controlador sintonizado por (a) el método de ZN, (b) el método de CHR

Se realiza un decremento de 3°C en el valor de referencia partiendo de las condiciones nominales, es decir de 150 a 147 °C

Tabla 3-4 - Tiempos de establecimiento para los métodos de sintonización utilizados

Método de sintonización	Tiempo de establecimiento [s]	ISE	IAE	Sobretiro máximo [%]
Ziegler-Nichols (ZN)	483	236.806	180.834	28.43
Chien-Hrones-Reswick (CHR)	585	239.126	184.108	22.66

A simple vista ambos métodos parecen arrojar resultados semejantes, sin embargo, de la **Tabla 3-4** podemos ver que son mejores los resultados obtenidos por el método de sintonización de ZN, en el sentido de un menor tiempo de establecimiento, y mejores valores en los índices de desempeño ISE e IAE, por lo que se eligen los valores obtenidos por el método de ZN a pesar de tener un mayor valor de sobretiro.

3.6 Simulación del proceso en lazo cerrado

Se desarrolló el modelo de la **Figura 3.6** en la librería para MATLAB Simulink BGv2.1 en conjunto con la simulación del modelo del intercambiador de calor que

incremento de 2°C a los 8000 seg en la temperatura de entrada del aceite, podemos ver la respuesta en la **Figura 3.9**.

El controlador logra mantener la temperatura del aceite al valor de referencia deseado, y la válvula aún no se ha saturado a valor máximo de apertura, aun ante perturbaciones en tres de las cuatro entradas entradas. Sin embargo, como todo sistema de control existen limites ante los cuales la válvula de control se satura, es decir, alcanza su valor máximo de apertura y no logra mantener el valor de referencia.

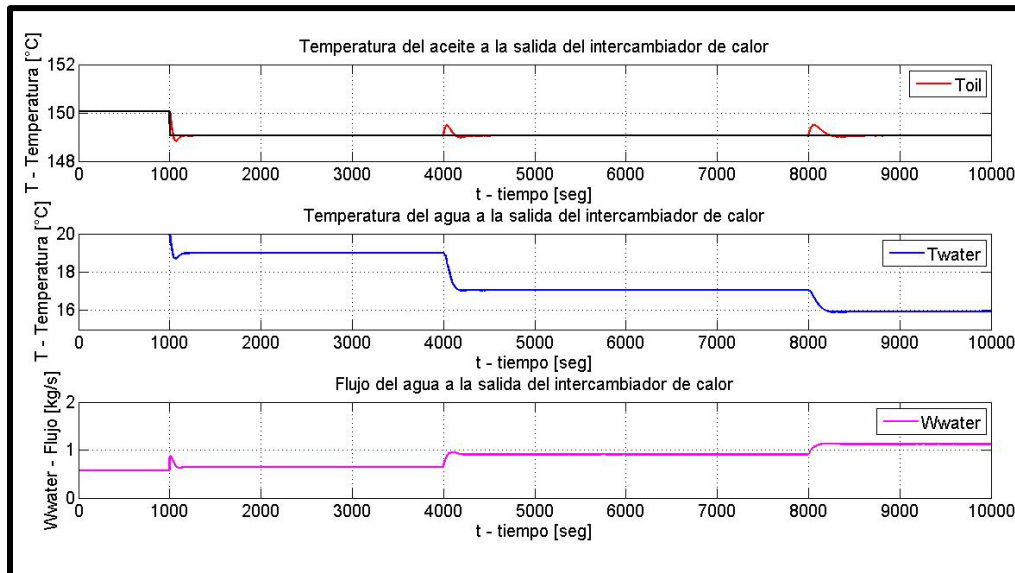


Figura 3.9 - Respuesta del intercambiador de calor en lazo cerrado ante perturbaciones en las entradas.

Tabla 3-5 – Límite de las perturbaciones en las variables de entrada

Perturbación en las variables de entrada	Respuesta de las variables de salida del intercambiador de calor
$T_{oil}^i + 7^{\circ}\text{C}$	

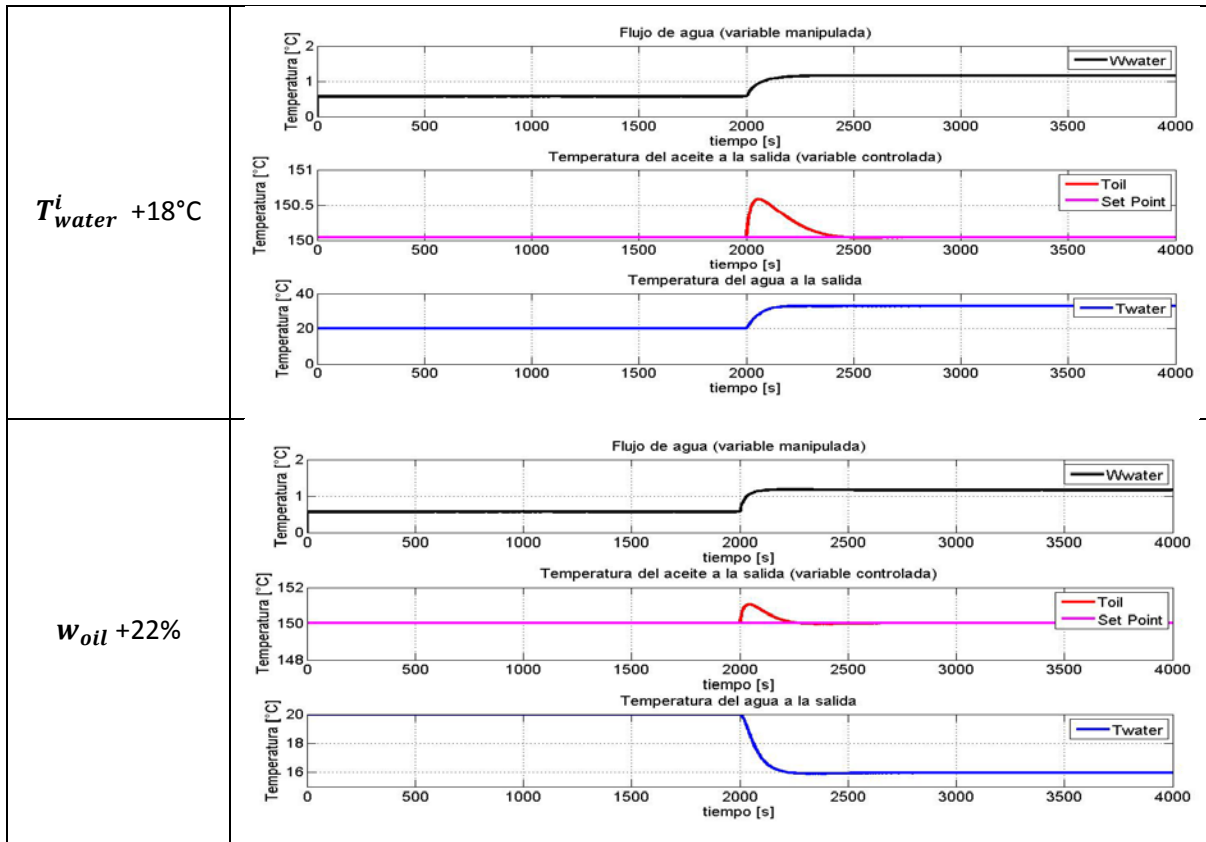
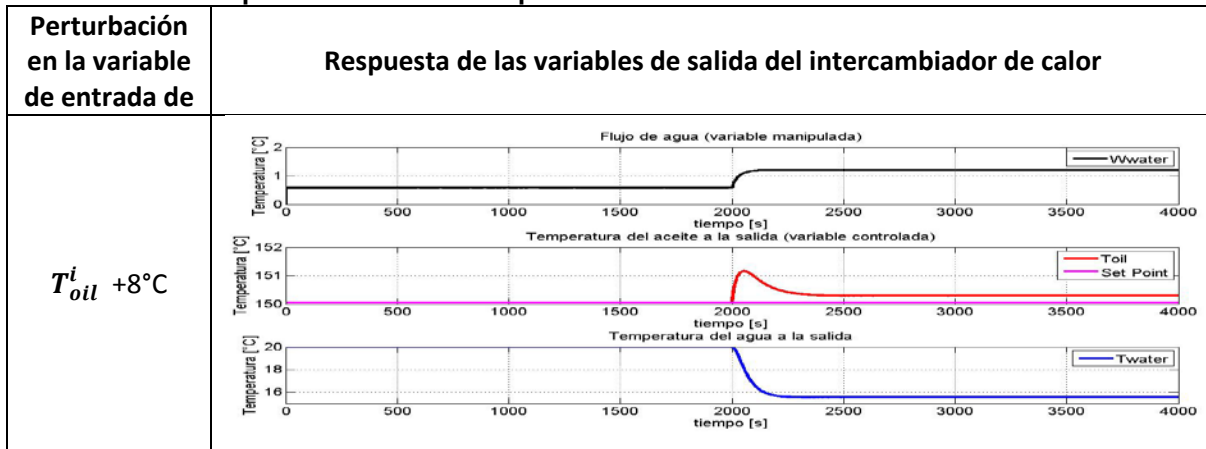
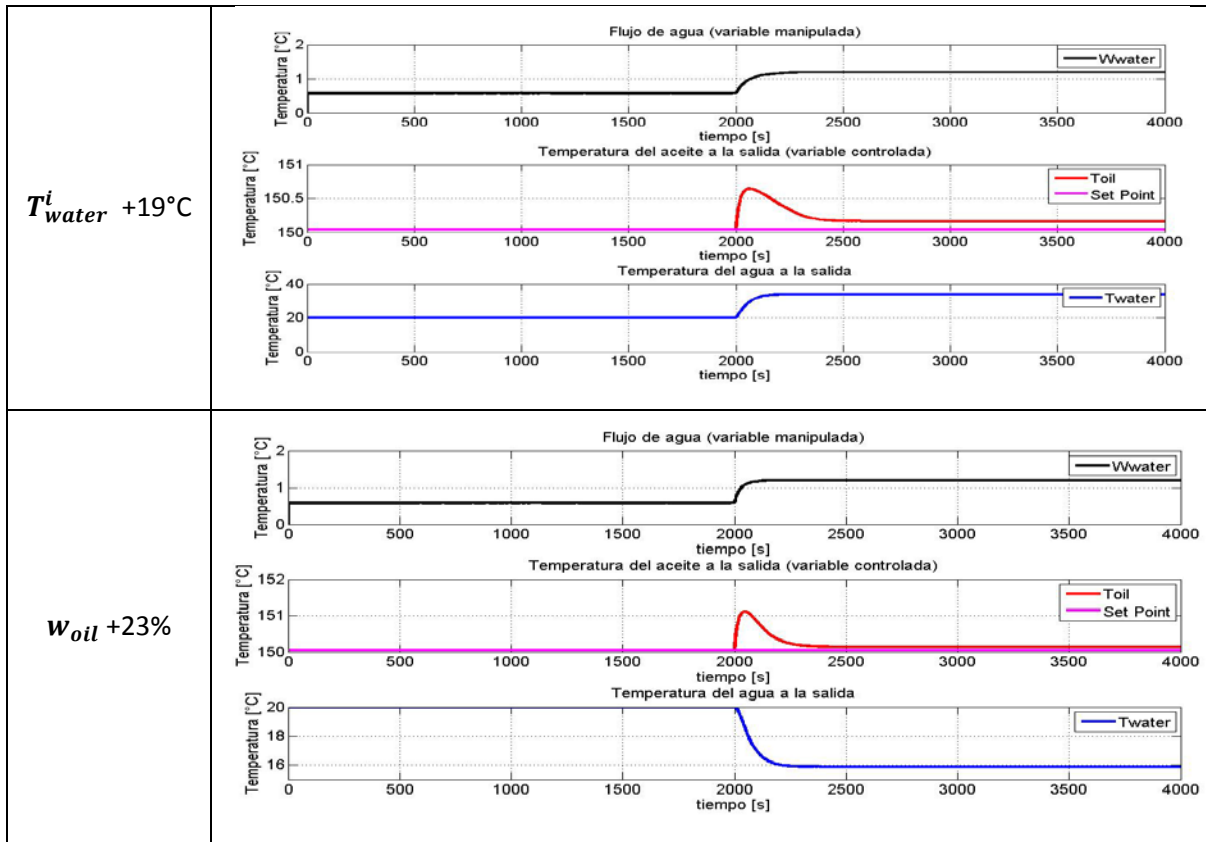


Tabla 3-6 – Sobrepaso del límite de las perturbaciones en las variables de entrada





En las **Tabla 3-5**, se pueden apreciar los límites máximos de las variables de entrada, es decir, el valor límite de la perturbación al que el controlador puede mantener la temperatura de salida del aceite en el valor de referencia (Set Point). En la **Tabla 3-6** se aprecian los valores de las perturbaciones en las variables de entrada a las cuales el controlador es incapaz de mantener el valor de la variable de salida al valor de referencia.

Posteriormente se realizan simulaciones para determinar los límites de las temperaturas en la falla paramétrica, para simularlo de forma práctica se realiza una simulación añadiendo un factor de ensuciamiento R_D en forma de escalón, nótese que la falla de ensuciamiento no es una falla súbita sino una falla progresiva, por lo cual la forma de simular dicha falla sería mediante una señal rampa que durara el tiempo correspondiente al valor de ensuciamiento que se desea conocer, sin embargo, para cuestiones prácticas nos interesa en este momento solamente saber los valores que alcanzan las temperaturas de salida a

determinados periodos de ensuciamiento, por lo que se calculó el ensuciamiento a dichos periodos y se simuló como ya se dijo, en forma de escalón, los resultados a diferentes periodos de tiempo (4, 6 y 12 meses de ensuciamiento) se muestran en **Figura 3.10**, **Figura 3.11** y **Figura 3.12** respectivamente

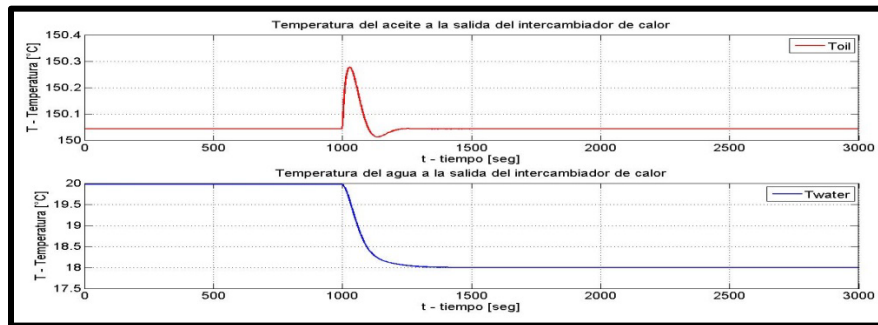


Figura 3.10 - Temperaturas de salida del intercambiador de calor a 4 meses de ensuciamiento

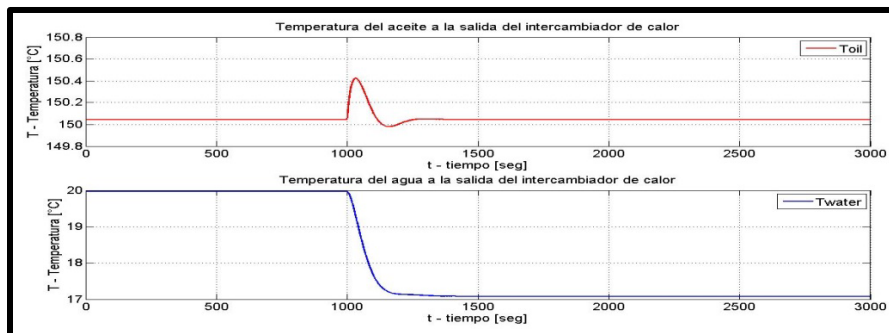


Figura 3.11 - Temperaturas de salida del intercambiador de calor a 6 meses de ensuciamiento

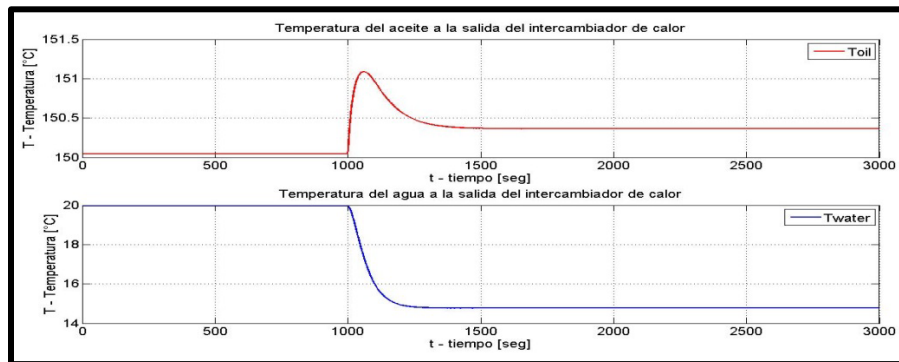


Figura 3.12 - Temperaturas de salida del intercambiador de calor a 12 meses de ensuciamiento

Podemos ver de las **Figura 3.12**, que para el caso de un año de ensuciamiento (12 meses) el sistema de control deja de mantener la temperatura de salida al valor de la referencia por lo cual no se puede permitir alcanzar dicho valor, de la **Figura 3.10** y **Figura 3.11** vemos que la temperatura de salida

controlada se mantiene en la referencia y que es a través de la definición de un umbral en la temperatura de salida de agua que se define la falla paramétrica en U , definimos un umbral de $\pm 3^{\circ}\text{C}$ (15% con respecto al valor en estado estable) para la temperatura de salida de agua como valor máximo de desviación para la falla paramétrica en U , es decir un periodo correspondiente a 6 meses de operación.

4. Capítulo 4 – Detección y aislamiento de fallas basado en el modelo Bond Graph del intercambiador de calor

4.1 Introducción

El desarrollo de sistemas de diagnóstico con modelos Bond Graph permite combinar metodologías cualitativas y cuantitativas. Es posible aplicar los métodos de detección de fallas basados en medición de señales mediante un esquema de modelo paralelo para generación de residuos, y posteriormente usar las relaciones causa/efecto (causalidad) del modelo Bond Graph para determinar el causante de la falla entre un conjunto de posibles candidatos de falla, con apoyo de árboles de falla [34]. La metodología de diagnóstico de fallas usando un modelo paralelo es mostrada en la **Figura 4.1**.

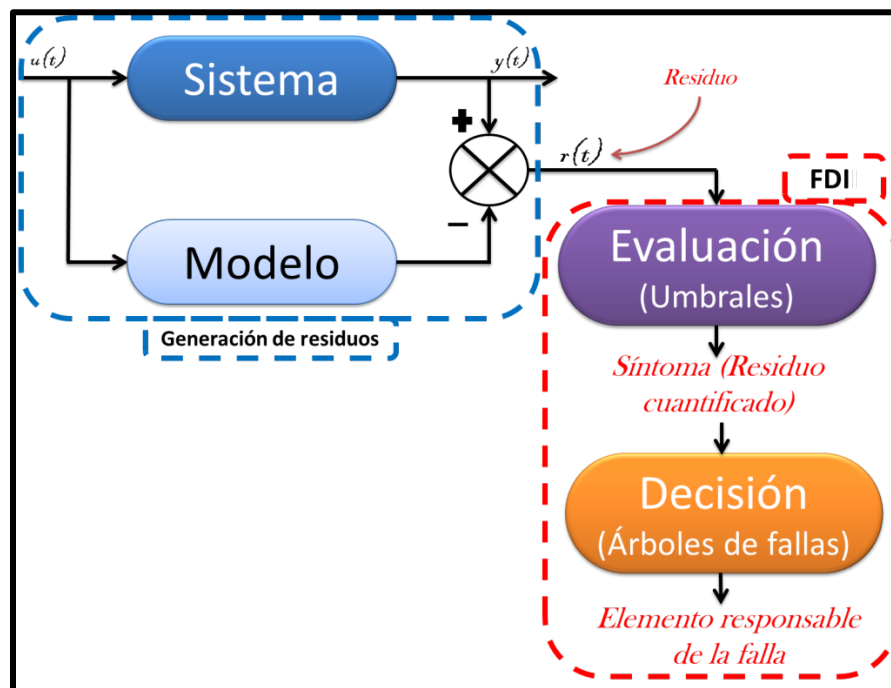


Figura 4.1 - Metodología de diagnóstico de fallas.

El módulo de FDI realiza las siguientes acciones:

- Genera los residuos comparando los valores de salida del sistema (planta) con los valores de salida del modelo de diagnóstico.
- Evalúa los residuos, determinando si estos residuos sobrepasan los umbrales definidos para el sistema, y por lo tanto, si existe una falla.
- A partir del valor cualitativo de los residuos generados (firma de falla), el módulo de decisión compara este comportamiento con los árboles de fallas para definir al causante de la falla.

4.1.1 Fallas consideradas

En la **Figura 4.2** se pueden apreciar las fallas que se van a simular en esta tesis, se considerarán fallas en tres sensores a la entrada del modelo de referencia, los dos sensores de temperatura a la entrada tanto de agua como de aceite y el sensor de flujo de aceite, fallas en un actuador que es una válvula de control que manipula el flujo agua que pasa por el tubo externo, y una falla paramétrica relacionada con el deterioro del intercambiador de calor por uso prolongado. El parámetro que va cambiando progresivamente es el coeficiente global de transferencia de calor, el cual determina el ensuciamiento del intercambiador de calor y el momento en el que se requiere dar mantenimiento al equipo.

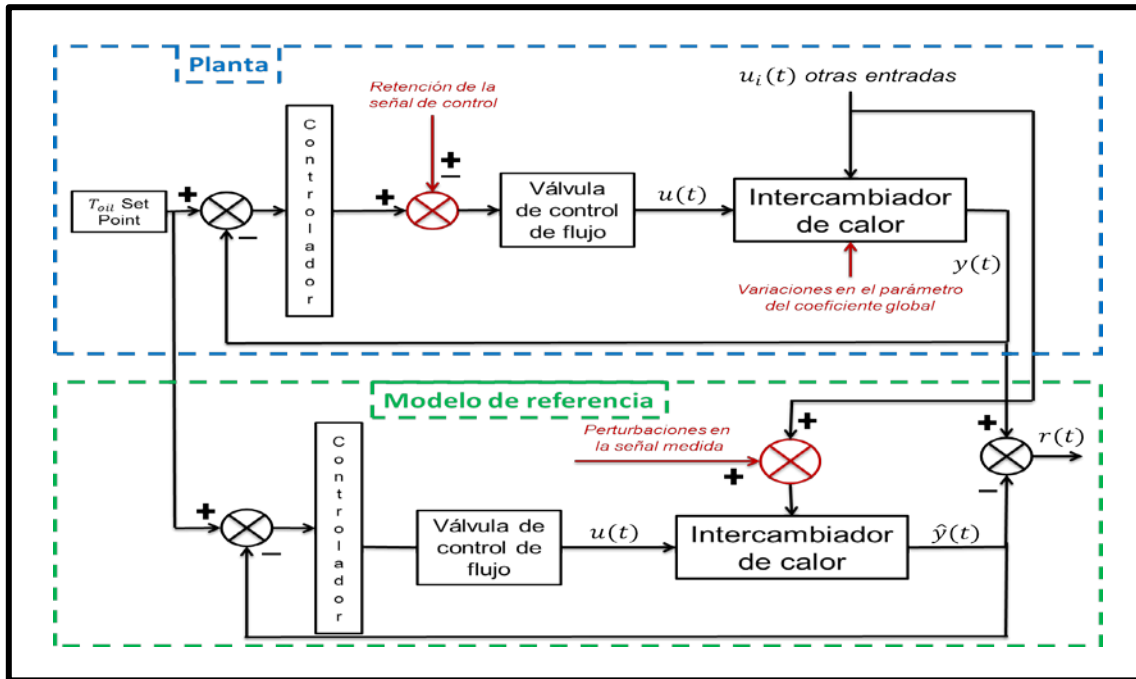


Figura 4.2 - Esquema de simulación de fallas

Las fallas consideradas para esta tesis y su descripción se listan en la **Tabla 4-1**.

Tabla 4-1- Fallas y tipos de fallas consideradas en esta tesis

Falla	Tipo de falla
Atascamiento de la válvula en un punto superior al requerido	Abrupta/Continua/Aditiva
Atascamiento de la válvula en un punto inferior al requerido	Abrupta/Continua/Aditiva
Lectura superior a la real del sensor de flujo de aceite a la entrada del modelo de referencia	Abrupta/Continua/Aditiva
Lectura inferior a la real del sensor de flujo de aceite a la entrada del modelo de referencia	Abrupta/Continua/Aditiva
Lectura superior a la real del sensor de temperatura de aceite a la entrada del modelo de referencia	Abrupta/Continua/Aditiva
Lectura inferior a la real del sensor de temperatura de aceite a la entrada del modelo de referencia	Abrupta/Continua/Aditiva
Lectura superior a la real del sensor de temperatura de agua a la entrada del modelo de referencia	Abrupta/Continua/Aditiva
Lectura inferior a la real del sensor de temperatura de agua a la entrada del modelo de referencia	Abrupta/Continua/Aditiva
Disminución del coeficiente global de transferencia de calor debido a la resistencia de ensuciamiento	Progresiva/Continua/Multiplicativa

Las fallas de atascamiento y de lectura errónea en los sensores producen cambios en la temperatura del aceite que sale del intercambiador de calor. La temperatura aumenta o disminuye dependiendo de si la desviación de la posición de la válvula o de la lectura en sensores ocurre en un sentido o en otro. Por

ejemplo, cuando la válvula se atasca en un punto superior al que se requiere en el momento de la falla, la desviación de temperatura es opuesta a la producida cuando la válvula se atasca en un punto inferior al requerido en el momento de la falla. Por esta razón se consideran dos fallas diferentes para detectar fallas en el actuador. El mismo problema ocurre cuando se presentan fallas en sensores.

4.2 Generación de residuos para la detección de fallas

La generación de residuos se realiza a partir de la simulación mediante el esquema en Simulink de la **Figura 4.3**. El simulador programado con una función-S en Simulink predice el comportamiento de la planta, mientras que el simulador construido con la librería de Bond-Graph funciona como modelo de referencia.

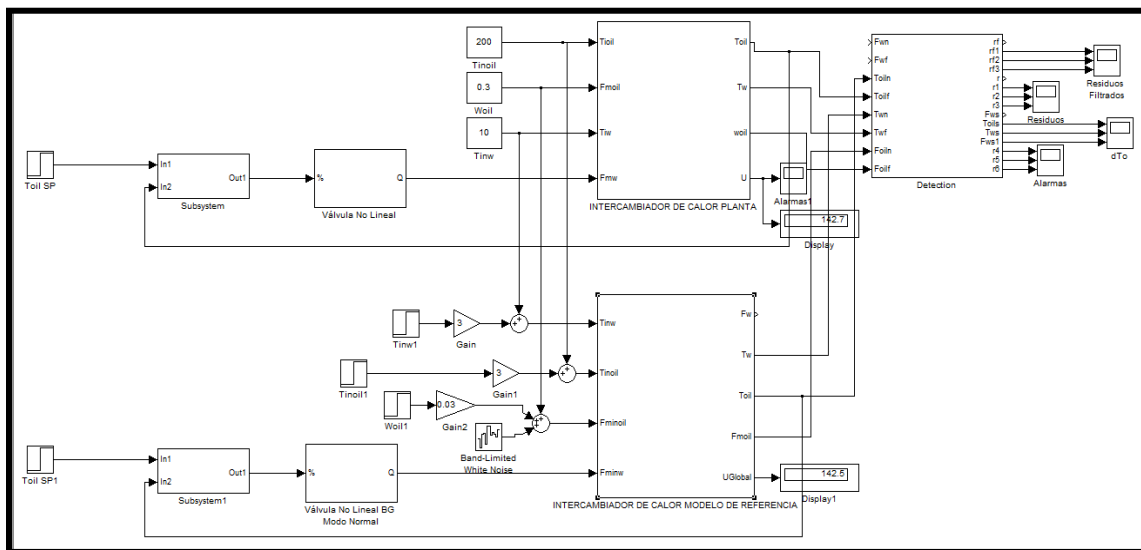


Figura 4.3 - Esquema de simulación para generación de residuos desarrollado en Simulink

La generación de residuos se hace comparando las salidas de ambos modelos. Cuando el sistema opera en modo normal (es decir sin falla) los residuos deberán ser menores a un umbral pre-establecido, cuando la planta se encuentre en modo falla habrá una diferencia entre la salida del modelo de referencia y la salida de la planta; por lo tanto, al menos uno o más residuos sobrepasarán el umbral. En esta tesis se manejan 3 residuos a los cuales se les llama r_1 , r_2 y r_3 , estos corresponden a la diferencia entre la salida de la planta y la salida del modelo de referencia para la señal de temperatura de aceite T_{oil} , temperatura de

agua T_w y flujo de agua w_{oil} , respectivamente. Una vez teniendo los residuos generados, se establecen firmas para cada una de las fallas que se tienen contempladas, con las que se forma la matriz de fallas.

4.2.1 Definición de los umbrales

Los residuos en modo de operación normal deberían de ser cero, sin embargo, existen múltiples causas por las cuales esto no sucede así y aún en operación normal los residuos pueden llegar a ser distintos de cero, algunas de las causas para que esto ocurra son: dinámicas no modeladas, el ruido externo que afecta a la medición de las salidas, errores de medición propios de la precisión de los sensores, perturbaciones ambientales y otro tipo de entradas exógenas al proceso. Para lidiar con estos factores y poder realizar la detección de las fallas correctamente, se establece un margen de variación de las señales, es decir se define un umbral, es decir, un límite de manera tal que de superarse se considerará entonces que, efectivamente, el o los residuos están indicando la presencia de una falla.

Los umbrales para filtrar los residuos se definen con base en la repercusión que tienen las fallas respecto a las variables de salida, así también con respecto a la precisión que presentan los sensores para cada una de las variables de salida, en este caso, tanto para sensores de temperatura como sensores de flujo. El dispositivo de medición de temperatura para este tipo de aplicación es el termopar, existen diversos tipos de termopares, cada uno de ellos ofrece un distinto rango de medición, para la aplicación del intercambiador de calor se supone el uso de termopares tipo J, ya que de acuerdo con [52], el rango de medición de estos es el más adecuado para el rango de temperaturas en las que opera el intercambiador de calor. Dichos termopares presentan una precisión de $\pm 1^\circ\text{C}$, por lo que los límites máximo y mínimo para los residuos tanto de temperatura de aceite como de temperatura del agua no pueden ser menores a 1°C y -1°C respectivamente. La variable de salida que se desea controlar es la temperatura de salida del aceite, se le permite una variación máxima del 1% de su valor en condiciones nominales, por lo que se define como falla una variación menor o mayor al 1% o

equivalentemente a $\pm 1.5^{\circ}\text{C}$. Esta decisión se justifica porque las simulaciones en lazo cerrado demostraron que el control siempre alcanza la referencia en el rango de operación de la válvula de control, aun en presencia de perturbaciones grandes en las variables de entrada; por lo tanto, se espera que para pequeñas perturbaciones externas, el control sea igualmente efectivo y que el sistema FDI no se vea afectado. En la sección 3.6 se muestran las simulaciones en lazo cerrado y se determinan los límites del controlador en función del diseño de la válvula de control y de las características del proceso. Para variaciones en las entradas superiores a los límites que tolera el control, si podría haber una confusión entre una falla y problemas del control para alcanzar la referencia, pero estos serían casos extremos, solo si el intercambiador de calor opera fuera de las condiciones y de los límites de diseño.

Para la variable de salida no controlada (T_{water}) no es tan importante tener una temperatura de salida exacta con respecto a una referencia. Sin embargo, debido a que es una variable manipulada, el residuo calculado con esta variable proporciona más información que otras variables. Para definir el umbral se hacen las mismas consideraciones descritas en el párrafo anterior sobre las características del sensor de temperatura. Otros aspectos que se consideran para definir el umbral son los siguientes: Cualquier perturbación en las entradas produce los mismos cambios en las salidas del modelo de la planta y del modelo de referencia, solo disturbios externos pueden generar residuos en la temperatura de agua en la salida del intercambiador de calor. Observando las simulaciones en lazo cerrado (sección 3.6), cuando el proceso opera con perturbaciones (en T_{oil}^i y w_{oil}) cerca de los límites en los que el control es efectivo, la variación máxima de la temperatura de agua está entre 4 a 5°C , mientras que para perturbaciones más pequeñas en las entradas, las variaciones de la temperatura de agua en la salida son de alrededor de 1°C . Suponiendo que los disturbios externos son más bien pequeños, podemos esperar cambios en las salidas en este orden (alrededor de 1°C) y considerando un pequeño margen de 0.5°C , se hace la suposición de que el límite en el que una falla podría confundirse con el efecto de un disturbio

externo es de 1.5°C, lo que corresponde a una variación de 7.5% con relación a su valor nominal. Es en este valor en el que se define el umbral.

Para el residuo de flujo de aceite, dado que los medidores de flujo tienen una precisión típica del 1% se definen los umbrales un poco más arriba de su valor de precisión, al 2% del valor de flujo nominal. En las simulaciones, se considera el ruido en el sensor de flujo de aceite, pero este genera variaciones menores al 2% del flujo nominal. Puesto que el flujo de aceite es una variable de entrada en los modelos de planta y de referencia; además de la precisión y del ruido, no hay otras causas que puedan generar un residuo en esta variable, excepto una falla en el sensor de la misma. Las perturbaciones grandes y pequeñas en esta entrada no pueden generar residuos porque la variación será la misma para la planta y el modelo de referencia. En conclusión, el umbral se define en una variación de 2% con relación al flujo nominal y este valor está determinado solo por la precisión y del sensor y el ruido considerados. Para definir el umbral de la falla de ensuciamiento se hace con respecto a las gráficas de las simulaciones que se presentaron en la sección 3.6, donde se aprecia una caída de 3°C para un ensuciamiento a 6 meses de la temperatura de agua a la salida.

Tabla 4-2 - Límites de los umbrales para cada falla

	% de desviación para los Límites del umbral del residuo r_1	% de desviación para los Límites del umbral del residuo r_2	% de desviación para los Límites del umbral del residuo r_3
Atascamiento de la válvula en un punto superior al requerido	$\pm 1\% = \pm 1.5^\circ C$	$\pm 7.5\% = \pm 1.5^\circ C$	$\pm 2\% = \pm 0.006 \text{ kg/s}$
Atascamiento de la válvula en un punto inferior al requerido	$\pm 1\% = \pm 1.5^\circ C$	$\pm 7.5\% = \pm 1.5^\circ C$	$\pm 2\% = \pm 0.006 \text{ kg/s}$
Lectura superior a la real del sensor de flujo de aceite a la entrada del modelo de referencia	$\pm 1\% = \pm 1.5^\circ C$	$\pm 7.5\% = \pm 1.5^\circ C$	$\pm 2\% = \pm 0.006 \text{ kg/s}$
Lectura inferior a la real del sensor de flujo de aceite a la entrada del modelo de referencia	$\pm 1\% = \pm 1.5^\circ C$	$\pm 7.5\% = \pm 1.5^\circ C$	$\pm 2\% = \pm 0.006 \text{ kg/s}$
Lectura superior a la real del sensor de temperatura de aceite a la entrada del modelo de referencia	$\pm 1\% = \pm 1.5^\circ C$	$\pm 7.5\% = \pm 1.5^\circ C$	$\pm 2\% = \pm 0.006 \text{ kg/s}$
Lectura inferior a la real del sensor de temperatura de aceite a la entrada del modelo de referencia	$\pm 1\% = \pm 1.5^\circ C$	$\pm 7.5\% = \pm 1.5^\circ C$	$\pm 2\% = \pm 0.006 \text{ kg/s}$

Lectura superior a la real del sensor de temperatura de agua a la entrada del modelo de referencia	$\pm 1\% = \pm 1.5^{\circ}\text{C}$	$\pm 7.5\% = \pm 1.5^{\circ}\text{C}$	$\pm 2\% = \pm 0.006\text{ kg/s}$
Lectura inferior a la real del sensor de temperatura de agua a la entrada del modelo de referencia	$\pm 1\% = \pm 1.5^{\circ}\text{C}$	$\pm 7.5\% = \pm 1.5^{\circ}\text{C}$	$\pm 2\% = \pm 0.006\text{ kg/s}$
Disminución del coeficiente global de transferencia de calor debido a la resistencia de ensuciamiento	$\pm 1\% = \pm 1.5^{\circ}\text{C}$	$\pm 15\% = \pm 3^{\circ}\text{C}^{***}$	$\pm 2\% = \pm 0.006\text{ kg/s}$

Así como se establecieron valores límite para la magnitud de las desviaciones de las variables de salida, y con ellas tener un umbral definido para determinar la existencia o no de fallas a partir de los residuos, así también se establecieron límites para el tiempo máximo que se podría tolerar una desviación de un residuo que supere el umbral. Es decir, en el momento en que algún residuo supera el umbral no se podría considerar como una falla, para poder declarar oficialmente una desviación de los residuos que supere el umbral como una falla, tenemos que esperar un intervalo de tiempo. En general se toman 10 minutos para la mayoría de las fallas porque de acuerdo con las simulaciones en lazo cerrado, se observa lo siguiente: ante perturbaciones en las entradas, la temperatura de aceite siempre alcanza la referencia en el rango de diseño de la válvula. Sin embargo, la referencia se alcanza, cuando las variaciones son grandes, hasta en 500 s (8.3 min). Antes de este tiempo pueden detectarse cambios en la variable manipulada que generan residuos, aun sin haber falla; por lo tanto, considerando un pequeño margen, se define un tiempo de 10 min para que no se confunda la acción de control con una falla.

Por otro lado, se toman 15 minutos para la falla de ensuciamiento del intercambiador de calor por ser una falla más difícil de detectar que el resto de las que se consideran, ya que como se mencionó antes en la **Tabla 4-1**, ésta es de tipo progresiva y el tiempo que tarda en superar el umbral es más lento teniendo en cuenta que debido al ruido de medición en el sensor de flujo se vuelve aún más

complicado decidir si el residuo supera o no el umbral, es por esto que se decide utilizar este umbral de tiempo de esperar para declarar oficialmente una falla.

4.2.2 Condiciones de simulación de las fallas

Para cada una de las fallas que se indujeron se presentan 3 figuras, en cada una se muestran 3 gráficas. En la primera figura se muestra la comparación de las señales medidas de la planta y del modelo de referencia para la temperatura del aceite a la salida T_{oil} , para la temperatura del agua a la salida T_{water} , y para el flujo másico de aceite w_{oil} . En la segunda figura se muestran los residuos r_1 , r_2 y r_3 que se generan de la comparación de las señales de la planta y del modelo de referencia para T_{oil} , T_{water} , y w_{oil} respectivamente. En la tercera figura se muestran tres gráficas, una para cada residuo generado, pero habiendo sido filtrados por el umbral del cual se habló ya previamente en este documento.

Se realizaron simulaciones de cada falla, todas excepto la falla de ensuciamiento con duración de 3000 segundos, para las fallas en el actuador se aplicó un escalón de 3°C al set point de temperatura del aceite a los 1000 segundos. Las gráficas de las simulaciones de todas las fallas se encuentran en el **Apéndice B**.

4.2.3 Método de construcción de la matriz de fallas

Para ejemplificar el método de construcción de la matriz de fallas, se utilizará el ejemplo de la simulación de falla a la entrada de la válvula, es decir a la señal de control, de manera que, de la señal de control, se toma a los 1000 segundos el valor de la señal en ese momento, y se mantiene constante por el resto de la simulación, simulando de esta forma un atascamiento a los 1000 segundos en la válvula de control, es decir, ya no responde más a la señal de control sin importar la diferencia de temperatura a la salida con respecto a la referencia. A continuación, se presentan las figuras **Figura 4.4**, **Figura 4.5** y **Figura 4.6**, correspondientes a los resultados de esta falla.

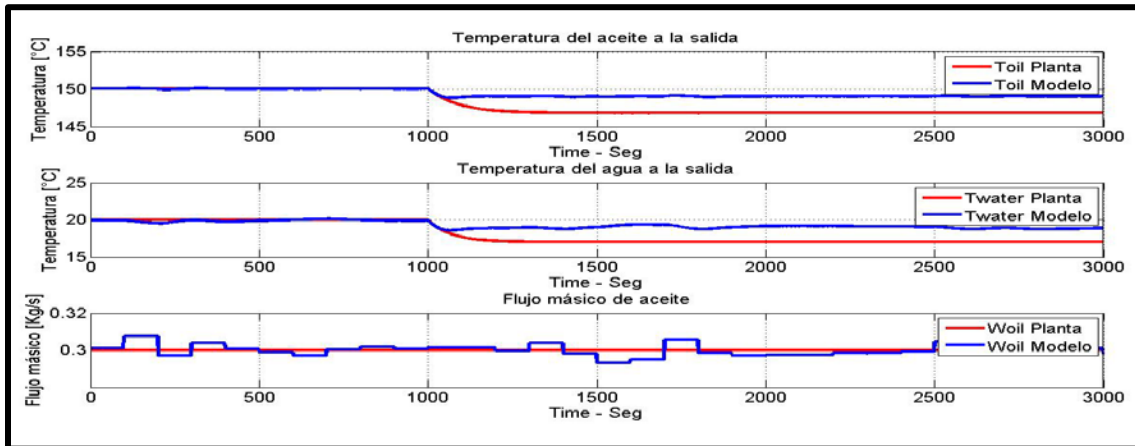


Figura 4.4 - Comparación de las señales de salida del intercambiador de calor ante una falla de atascamiento en la válvula de control.

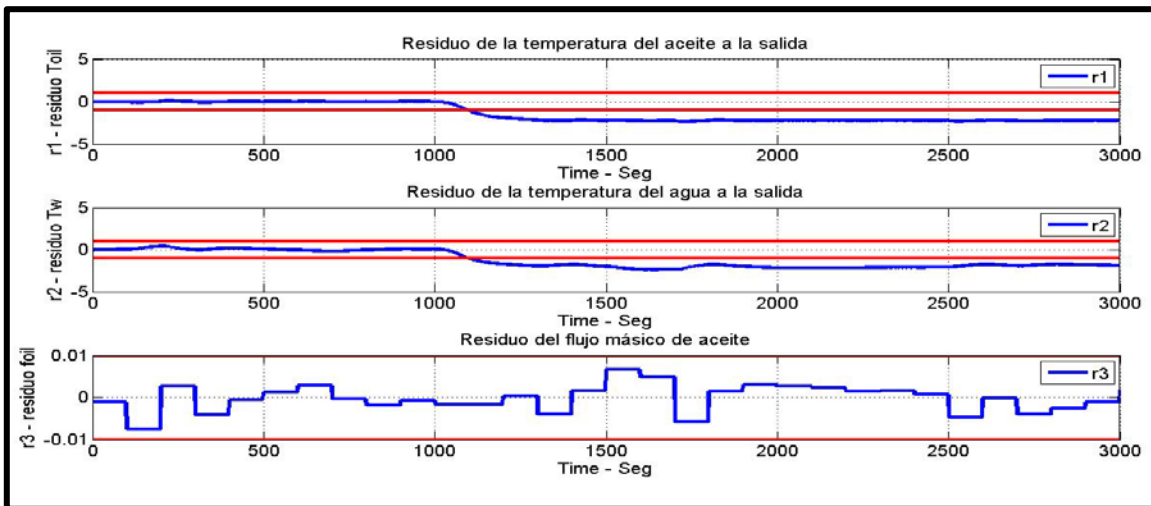


Figura 4.5 - Comparación de los residuos generados ante una falla de atascamiento en un punto superior al requerido en la válvula de control.

Podemos ver que para el caso de esta falla, que las temperaturas de ambos fluidos descienden, como puede verse en la **Figura 4.4**. Así también se puede ver claramente que dado que el flujo másico de aceite no se ve afectado en esta falla, no tiene consecuencias, y en la **Figura 4.5** el residuo de dicha señal es esencialmente cero. En la **Figura 4.6** se muestran los residuos generados r_1 , r_2 y r_3 una vez que se filtran por el umbral.

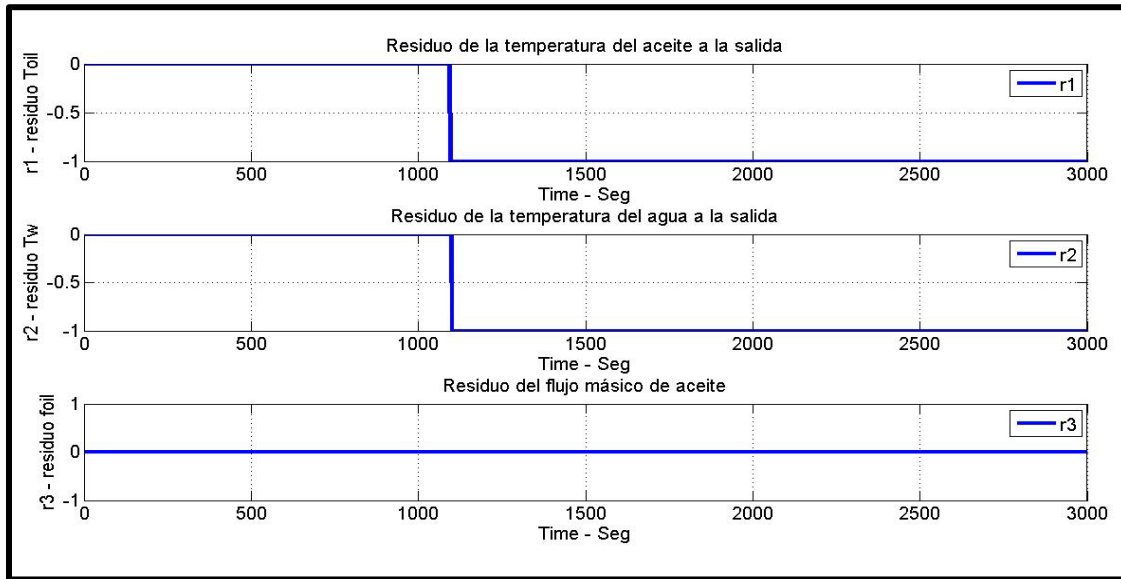


Figura 4.6 - Residuos filtrados por el umbral, generados debido a una falla de atascamiento en un punto superior al requerido, en la válvula de control de flujo de agua.

Siguiendo el anterior procedimiento se realizan las simulaciones de todas las fallas consideradas, rescatando al final el valor cualitativo de cada uno de los residuos, construyendo con ellos una tabla con el valor de los residuos organizados en columnas, y las fallas simuladas en filas.

4.3 Matriz de fallas

Una vez teniendo la forma de los residuos generados filtrados por los umbrales formamos la matriz de fallas, que contiene la firma de cada una de las fallas simuladas, los valores de dicha tabla pueden presentarse de dos formas, la primera forma suele representarse con un segmento de línea parecido a un escalón, en la que se aprecia la forma en la que cambia el residuo con respecto a cero, es decir si crece (cualitativamente positiva), decrece (cualitativamente negativa) o se mantiene en cero; La segunda forma es mostrar el comportamiento de los residuos, asignando valores positivos o negativos dependiendo de si el residuo crece (+1), decrece (-1), o si se mantiene en cero (0).

En la **Tabla 4-3**, se muestran las firmas de las fallas cuando se toman en cuenta únicamente dos residuos, el residuo 1 (r_1) y el residuo 2 (r_2). Posteriormente en la

Tabla 4-4, se muestran solo las fallas que pueden ser localizadas con estos dos residuos. En la **Tabla 4-5**, se muestran las firmas de las fallas detectables si se toman en cuenta 3 residuos, r_1 , r_2 , y r_3 , en la **Tabla 4-6** se muestran las fallas detectables y localizables considerando los residuos mencionados. Algunas de las fallas presentan las mismas firmas de falla, por lo que no puede distinguirse cuál de estas está ocurriendo. En las **Tabla 4-3** y **Tabla 4-5** se identifican en color verde las fallas cuyas firmas no se repiten y en colores azul y rojo las fallas con firmas similares.

Tabla 4-3- Matriz de fallas detectables, consideradas en este trabajo de tesis, considerando los residuos 1 y 2

Falla	r_1	r_2
Falla de atascamiento en un punto superior al requerido	-1	-1
Falla de atascamiento en un punto inferior al requerido	+1	+1
Falla en el sensor de flujo de aceite a la entrada (lectura mayor)	0	+1
Falla en el sensor de flujo de aceite a la entrada (lectura inferior)	0	-1
Falla en el sensor de temperatura de agua a la entrada (lectura mayor)	0	-1
Falla en el sensor de temperatura de agua a la entrada (lectura inferior)	0	+1
Falla en el sensor de temperatura de aceite a la entrada (lectura mayor)	0	+1
Falla en el sensor de temperatura de aceite a la entrada (lectura inferior)	0	-1
Falla de ensuciamiento de la pared del tubo (disminución en el coeficiente global de transferencia de calor)	0	-1

Tabla 4-4 - Fallas detectables y localizables considerando los residuos 1 y 2

Falla	r_1	r_2
Falla de atascamiento en un punto superior al requerido	-1	-1
Falla de atascamiento en un punto inferior al requerido	+1	+1
Falla en el sensor de flujo de aceite a la entrada (lectura mayor)	0	+1
Falla de ensuciamiento de la pared del tubo (disminución en el coeficiente global de transferencia de calor)	0	-1

Tabla 4-5 - Matriz de fallas detectables, consideradas en este trabajo de tesis, considerando los residuos 1, 2 y 3

Falla	r_1	r_2	r_3
Falla de atascamiento en un punto superior al requerido	-1	-1	0
Falla de atascamiento en un punto inferior al requerido	+1	+1	0
Falla en el sensor de flujo de aceite a la entrada (lectura mayor)	0	+1	-1
Falla en el sensor de flujo de aceite a la entrada (lectura inferior)	0	-1	+1
Falla en el sensor de temperatura de agua a la entrada (lectura mayor)	0	-1	0
Falla en el sensor de temperatura de agua a la entrada (lectura inferior)	0	+1	0
Falla en el sensor de temperatura de aceite a la entrada (lectura mayor)	0	+1	0
Falla en el sensor de temperatura de aceite a la entrada (lectura inferior)	0	-1	0
Falla de ensuciamiento de la pared del tubo (disminución en el coeficiente global de transferencia de calor)	0	-1	0

Tabla 4-6 - Fallas detectables y localizables considerando los residuos 1, 2 y 3

Falla	r_1	r_2	r_3
Falla de atascamiento en un punto superior al requerido	-1	-1	0
Falla de atascamiento en un punto inferior al requerido	+1	+1	0
Falla en el sensor de flujo de aceite a la entrada (lectura mayor)	0	+1	-1
Falla en el sensor de flujo de aceite a la entrada (lectura inferior)	0	-1	+1
Falla en el sensor de temperatura de agua a la entrada (lectura inferior)	0	+1	0
Falla de ensuciamiento de la pared del tubo (disminución en el coeficiente global de transferencia de calor)	0	-1	0

4.3.1 Análisis de aislabilidad

Cómo se puede observar de la **Tabla 4-3** y la **Tabla 4-5** de la sección anterior, se concluye que se puede hacer uso de ya sea dos o tres sensores, para generar dos o tres residuos respectivamente, y en ambos casos se pueden realizar la detección de las 9 posibles fallas que se consideraron en esta tesis. Sin embargo, en la **Tabla 4-3** de la sección anterior, se observa que para el caso de tres sensores, existen fallas con firmas repetidas, como es el caso de la falla en el

sensor de flujo de aceite a la entrada (lectura mayor), la falla de temperatura de agua a la entrada (lectura inferior) y la falla en el sensor de temperatura de aceite a la entrada (lectura mayor), ambas tienen la misma firma de falla, por lo que se elige solamente a una de las tres para considerarse como falla detectable y localizable, así también, las fallas en el sensor de flujo de aceite a la entrada (lectura inferior), en el sensor de temperatura de agua a la entrada (lectura mayor), en el sensor de temperatura de aceite a la entrada (lectura inferior), y la falla de ensuciamiento de la pared del tubo (disminución en el coeficiente global de transferencia de calor), tienen la misma firma de falla, por lo que solo se puede elegir a una de ellas para considerarse localizable.

En el otro caso, cuando se considera un sensor de flujo de aceite a la salida para generar un tercer residuo, tenemos un resultado diferente en la aislabilidad de las fallas que en el caso de solo dos residuos. Como se dijo antes, todas las fallas consideradas en esta tesis son detectables con dos o con tres sensores, sin embargo aún con tres sensores también existen firmas de fallas repetidas, pero, al tener un sensor más y por ende un residuo más, hay más información que nos ayuda a discernir entre unas fallas y otras. Las fallas repetidas considerando tres residuos son: la falla en el sensor de temperatura de agua a la entrada (lectura mayor), en el sensor de temperatura de aceite a la entrada (lectura inferior), y la falla de ensuciamiento de la pared del tubo (disminución en el coeficiente global de transferencia de calor) tienen la misma firma de fallas, así también la falla en sensor de temperatura de agua (lectura inferior) y la falla en el sensor de temperatura de aceite (lectura mayor), por lo que solo se considera un de estas tres, como falla localizable.

De todo lo anterior concluimos entonces, que con dos o tres sensores se pueden detectar las nueve fallas consideradas para este trabajo de tesis, es decir la detectabilidad de las fallas no varía, sin embargo como era de esperarse, con más sensores si es posible localizar mayor número de fallas, dos fallas más son posible de aislarse si se cuenta con un sensor más, para poder tener la

información que proporcione otro residuo. Se tiene que con dos sensores se pueden detectar y localizar cuatro fallas, agregando un sensor de flujo de aceite se pueden detectar y localizar seis fallas.

4.4 Árboles de fallas

Una vez habiendo generado los residuos de las fallas hemos realizado la etapa de la detección, es decir, determinar si existe una falla o no en nuestro sistema, ahora procedemos a la etapa del aislamiento o localización, es decir, determinar la causa raíz de la falla, para lo cual se hace uso de un método generalizado de generación de hipótesis de fallas basado en modelos Bond Graph, el cual es llamado, árboles de fallas. Los árboles de fallas suelen emplearse para describir relaciones topológicas cuando se conocen las relaciones entre componentes de manera directa y heurística, y cuando se tienen modelos del sistema que muestran las relaciones estructurales utilizando las ecuaciones provenientes del Bond Graph.

4.4.1 Método de construcción de los árboles de fallas

El método que se utilizará aquí para construir los arboles de fallas, proviene del uso de las relaciones causa/efecto según el tipo de elemento en Bond Graph que se tenga, no requiere generar un gráfico causal, se clasifican los antecedentes (causa) y los consecuentes (efecto) dependiendo de la causalidad que se tenga en el modelo en Bond Graph [34] [31].

1. Del Bond Graph del sistema, se ubican los tipos de elementos que se tienen.
2. Se forma una tabla de antecedentes y consecuentes, como lo indica la **Tabla 4-7**
3. Se toma como inicio del árbol a la variable de interés. Se asigna el valor cualitativo que se vaya a analizar, colocándolo en la parte superior derecha de la variable.

4. En la tabla de antecedentes y consecuentes, se localiza como consecuente esta variable y los antecedentes se colocan como derivaciones, formando brazos entre ellos por medio de una flecha dirigida.
5. Los parámetros o contantes no tienen antecedentes, hasta ahí llega la propagación de más ramas.
6. Se asignan los valores cualitativos en forma lógica, según se pueda obtener el valor cualitativo de la variable que generan.
7. Ahora cada uno de estos antecedentes se localizan en la **Tabla 4-8** como consecuentes, se propagan más ramas siguiendo los pasos 4, 5 y 6, pero atendiendo el paso 8.
8. La propagación de antecedentes se detiene cuando se llega a la variable inicial o cuando se alcanza un valor cualitativo contradictorio, es decir distinto en valor cualitativo a uno hallado antes en el árbol.

La **Tabla 4-7** sirve para construir la **Tabla 4-8** de antecedentes y consecuentes a partir de elementos en Bond Graph que se tengan en el modelo del intercambiador de calor de la **Figura 4.7**, y como se puede notar, obedece a la causalidad asignada a cada elemento, con base en el método mencionado anteriormente.

Tabla 4-7 - Antecedentes y consecuentes

Elemento	Causa	Consecuencia
	$1/C, f$	e
	$1/I, e$	f
	$1/R, e$	f
	R, f	e
	f_1, e_2, n	f_2, e_1
	$f_2, e_1, 1/n$	f_1, e_2
	f_1, f_2, r	e_1, e_2

	e_4 $f_1, -f_2, -f_3$	e_1, e_2, e_3 f_4
	f_4 $e_1, -e_2, -e_3$	f_1, f_2, f_3 e_4
$Se \longrightarrow$	Se	e
$Sf \longleftarrow$	Sf	f

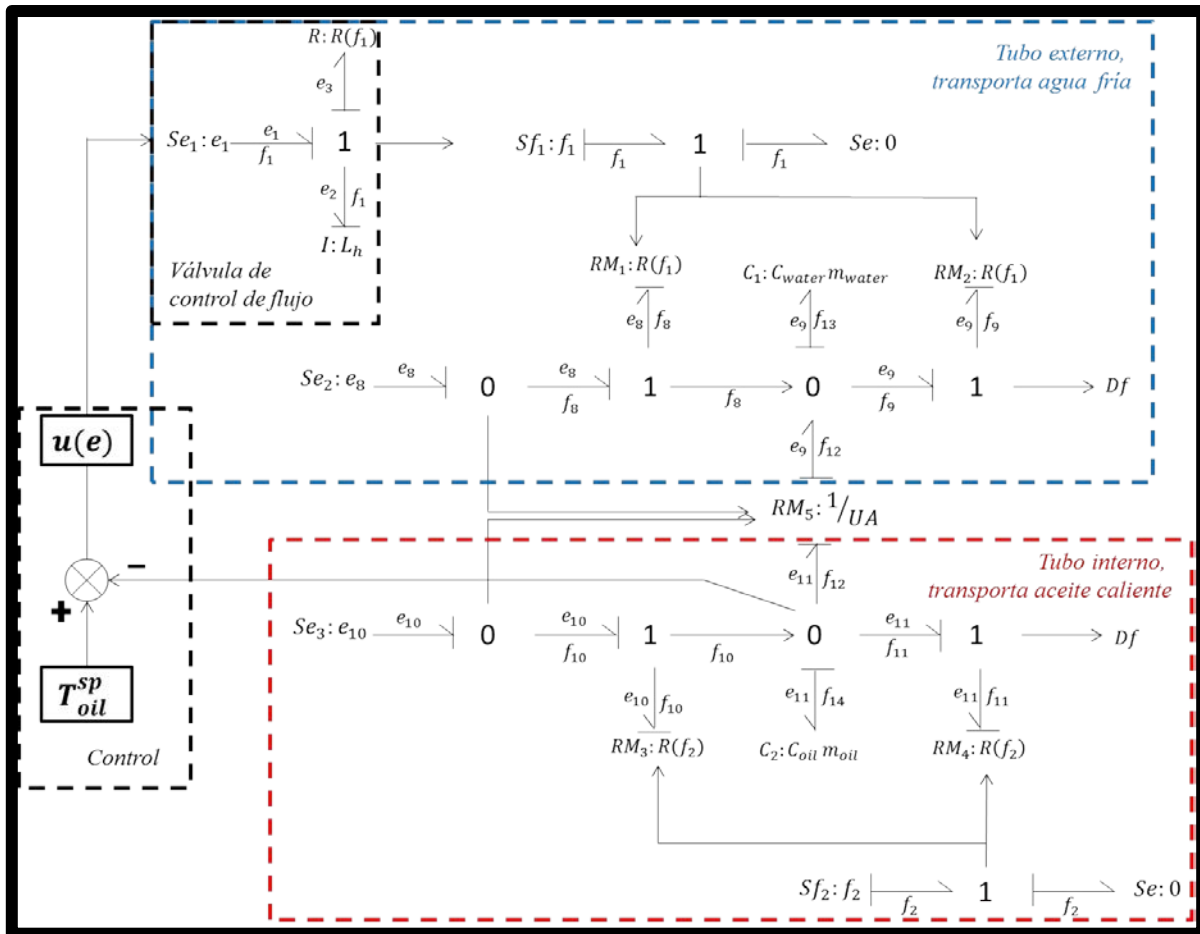


Figura 4.7 - Modelo en Bond Graph del intercambiador de calor

Tabla 4-8 - Antecedentes y consecuentes del modelo BG del intercambiador de calor

Elemento	Causa	Consecuencia
$\left. \begin{array}{c} e_3 \\ \hline f_1 \end{array} \right\} R: R(f_1)$	$R(f_1), f_1$	e_3
$\left. \begin{array}{c} e_8 \\ \hline f_8 \end{array} \right\} RM_1: R(f_1)$	$1/RM_1(f_1), e_8$	f_8
$\left. \begin{array}{c} e_9 \\ \hline f_9 \end{array} \right\} RM_2: R(f_1)$	$1/RM_2(f_1), e_9$	f_9
$\left. \begin{array}{c} e_{10} \\ \hline f_{10} \end{array} \right\} RM_3: R(f_2)$	$1/RM_3(f_2), e_{10}$	f_{10}
$\left. \begin{array}{c} e_{11} \\ \hline f_{11} \end{array} \right\} RM_4: R(f_2)$	$1/RM_4(f_2), e_{11}$	f_{11}

$\begin{array}{c} e_{11} \rightarrow \\ f_{12} \rightarrow \end{array} \Big RM_5: 1/UA \Big \begin{array}{c} e_9 \rightarrow \\ f_{12} \rightarrow \end{array}$ $\begin{array}{c} \uparrow \\ e_8 \end{array} \quad \begin{array}{c} \uparrow \\ e_{10} \end{array}$	$U(f_1, f_2, R_D), e_8, e_9, e_{10}, e_{11}$	f_{12}
$\begin{array}{c} e_9 \rightarrow \\ f_{13} \rightarrow \end{array} \Big C_1: C_{water} m_{water}$	$1/C_1, f_{13}$	e_9
$\begin{array}{c} e_{11} \rightarrow \\ f_{14} \rightarrow \end{array} \Big C_2: C_{oil} m_{oil}$	$1/C_2, f_{14}$	e_{11}
$\begin{array}{c} e_2 \rightarrow \\ f_1 \rightarrow \end{array} \Big I: L_h$	$1/L_h, e_2$	f_1
$Se_1: e_1 \rightarrow \begin{array}{c} e_1 \rightarrow \\ f_1 \rightarrow \end{array} \Big $	Se_1	e_1
$Se_2: e_8 \rightarrow \Big $	Se_2	e_8
$Se_3: e_{10} \rightarrow \begin{array}{c} e_{10} \rightarrow \\ \end{array} \Big $	Se_3	e_{10}
$Sf_1: f_1 \Big \begin{array}{c} \rightarrow \\ f_1 \end{array}$	Sf_1	f_1
$Sf_2: f_2 \Big \begin{array}{c} \rightarrow \\ f_2 \end{array}$	Sf_2	f_2
$\begin{array}{c} \uparrow \\ e_3 \end{array} \Big \begin{array}{c} \rightarrow \\ f_1 \end{array} \Big \mathbf{1} \Big \begin{array}{c} \downarrow \\ e_2 \end{array}$	$e_1, -e_3$ f_1	e_2 f_1, f_1
$\begin{array}{c} \rightarrow \\ f_1 \end{array} \Big \mathbf{1} \Big \begin{array}{c} \rightarrow \\ f_1 \end{array}$	f_1	f_1
$\begin{array}{c} \uparrow \\ e_8 \end{array} \Big \mathbf{1}$	e_8	e_8
$\begin{array}{c} e_8 \rightarrow \\ f_8 \rightarrow \end{array} \Big \mathbf{1}$	f_8	f_8

$\begin{array}{c} e_9 \nearrow \\ f_9 \longrightarrow \end{array} \mathbf{1}$	$\begin{array}{c} e_9 \\ f_9 \end{array}$	$\begin{array}{c} e_9 \\ f_9 \end{array}$
$\begin{array}{c} e_{10} \nearrow \\ f_{10} \longrightarrow \\ e_{10} \downarrow \\ f_{10} \end{array} \mathbf{1}$	$\begin{array}{c} e_{10} \\ f_{10}, f_{10} \end{array}$	$\begin{array}{c} e_{10} \\ f_{10} \end{array}$
$\begin{array}{c} e_{11} \nearrow \\ f_{11} \longrightarrow \\ e_{11} \downarrow \\ f_{11} \end{array} \mathbf{1}$	$\begin{array}{c} e_{11} \\ f_{11} \end{array}$	$\begin{array}{c} e_{11} \\ f_{11} \end{array}$
$\begin{array}{c} \longrightarrow \\ f_2 \end{array} \mathbf{1} \quad \begin{array}{c} \longrightarrow \\ f_2 \end{array}$	f_2	f_2
$\begin{array}{c} e_8 \longrightarrow \\ f_8 \end{array} \mathbf{0} \quad \begin{array}{c} e_8 \nearrow \\ f_8 \end{array}$	$\begin{array}{c} e_8 \\ f_8 \end{array}$	$\begin{array}{c} e_8 \\ f_8 \end{array}$
$\begin{array}{c} e_9 \nearrow \\ f_{13} \longrightarrow \\ f_8 \longrightarrow \\ e_9 \downarrow \\ f_{12} \end{array} \mathbf{0} \quad \begin{array}{c} e_9 \nearrow \\ f_9 \end{array}$	$\begin{array}{c} e_9 \\ f_8, f_{12}, -f_9 \end{array}$	$\begin{array}{c} e_9, e_9 \\ f_{13} \end{array}$
$\begin{array}{c} e_{10} \longrightarrow \\ f_{10} \end{array} \mathbf{0} \quad \begin{array}{c} e_{10} \nearrow \\ f_{10} \end{array}$	$\begin{array}{c} e_{10} \\ f_{10} \end{array}$	$\begin{array}{c} e_{10} \\ f_{10} \end{array}$
$\begin{array}{c} e_{11} \nearrow \\ f_{12} \longrightarrow \\ f_{10} \longrightarrow \\ e_{11} \downarrow \\ f_{14} \end{array} \mathbf{0} \quad \begin{array}{c} e_{11} \nearrow \\ f_{11} \end{array}$	$\begin{array}{c} e_{11} \\ f_{10}, -f_{12}, -f_{11} \end{array}$	$\begin{array}{c} e_{11}, e_{11} \\ f_{14} \end{array}$

Formalmente, el número de árboles de fallas T_f , es

$$T_f = 2n$$

Donde n es el número de variables medidas. El número dos proviene del número de valores cualitativos distintos de cero que se pueden tener: [-1] y [+1].

Cuando se presenta una falla, se utilizan los árboles de fallas que tienen el mismo valor que los del comportamiento de los residuos. Así se establece el conjunto de hipótesis de falla, observando qué parámetros o variables son candidatos de falla en cada árbol de fallas. Tenemos que las variables medidas en el proceso del intercambiador de calor son las temperaturas a la salida de ambos tubos, tenemos entonces $n=3$ variables medidas en el proceso, por lo tanto:

$$T_f = 2(3) = 6$$

Serán 6 los árboles de fallas que se tendrán que desarrollar de acuerdo al método de diagnóstico, en la **Figura 4.8** se presentan dichos árboles ya desarrollados.

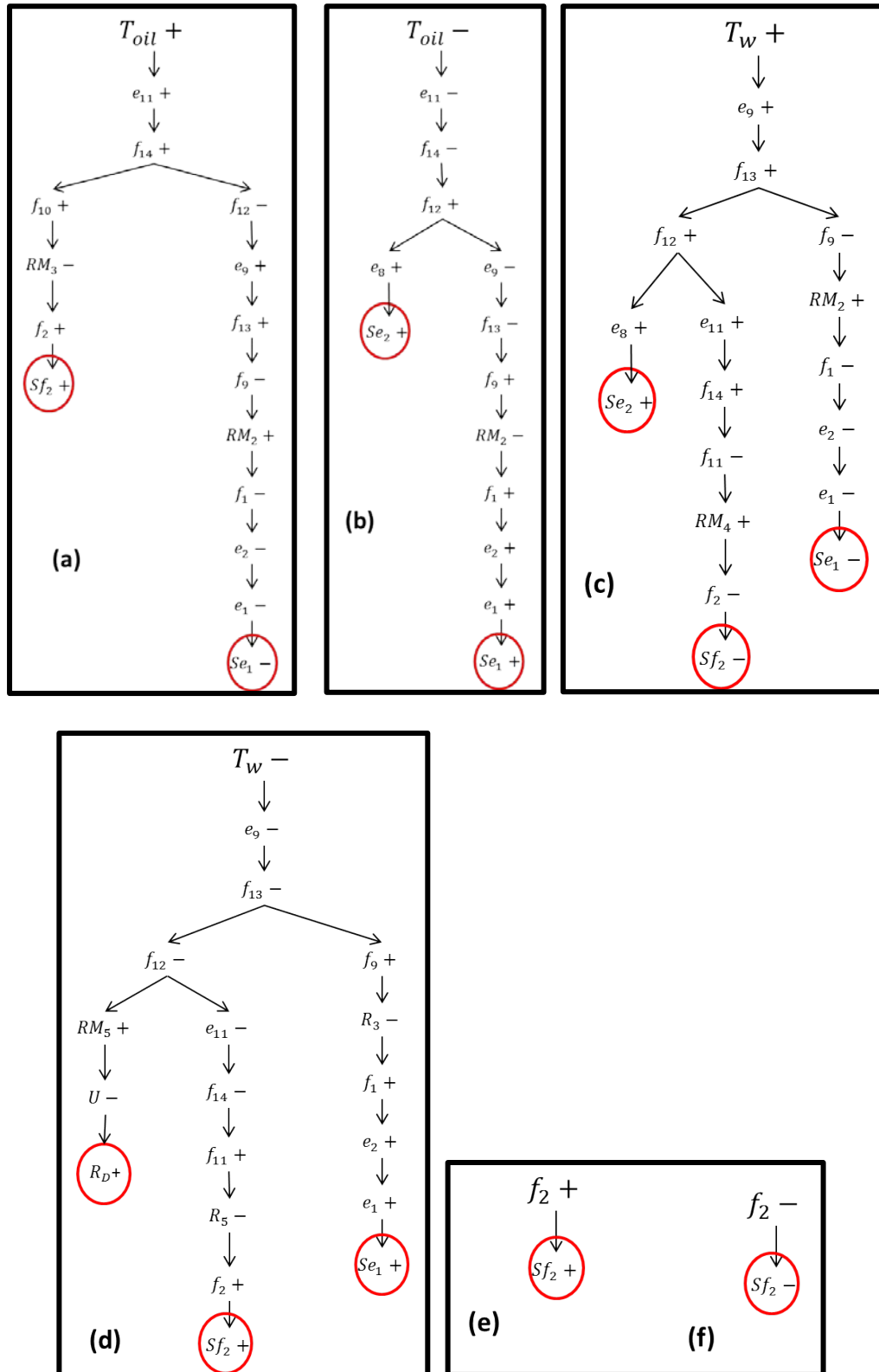


Figura 4.8 - Árboles de fallas para (a) $Toil+$ (b) $Toil-$ (c) $Tw+$ (d) $Tw-$ (e) $Woil+$ (f) $Woil-$

4.4.2 Método de selección del candidato de falla

Como puede verse en cada árbol de fallas, al final existen diversos candidatos de falla (señalados en un círculo rojo) debido al tipo de proceso de este caso de estudio, no existen mucho parámetros que puedan fallar, podemos ver también que varios de los candidatos a ser la causa de los residuos son las propias entradas del proceso (las temperaturas de ambos fluidos a la entrada del intercambiador, y el flujo másico del fluido a enfriar). Las entradas al proceso no pueden ser los causantes del residuo, debido a que una de las principales condiciones del método de modelo paralelo para generación de residuos es que las entradas sean las mismas para ambos modelos, es decir tanto para la planta, como para el modelo de referencia; por lo tanto, las entradas antes mencionadas solo podrían considerarse como candidatos a ser los causantes de la falla, cuando existan perturbaciones a la entrada que solo afecten a la planta y no al modelo de referencia. Se descartan entonces las 3 entradas antes mencionadas como candidatos de falla. El siguiente paso, es definir los candidatos de falla restantes que sean comunes para los árboles de falla que se utilicen para cada una de las firmas de falla.

Dada una firma de falla, hacemos uso de los árboles de falla que coinciden con dicha firma y buscamos los candidatos de falla que sean comunes para ambos árboles, este procedimiento se repite para cada una de las firmas de falla de la matriz de falla.

Para el caso de la primera falla tenemos la siguiente firma:

r_1	-1
r_2	-1

Usamos los árboles de fallas que inicien con los valores cualitativos $r_1 -$ y $r_2 -$, que corresponden a $T_{oil} -$ y $T_w -$, los cuales se presentaron en la **Figura 4.8 (b)** y **(d)** respectivamente, recordando que se descartaron las entradas de temperatura de ambos fluidos, los árboles de falla se presentan en la **Figura 4.9**.

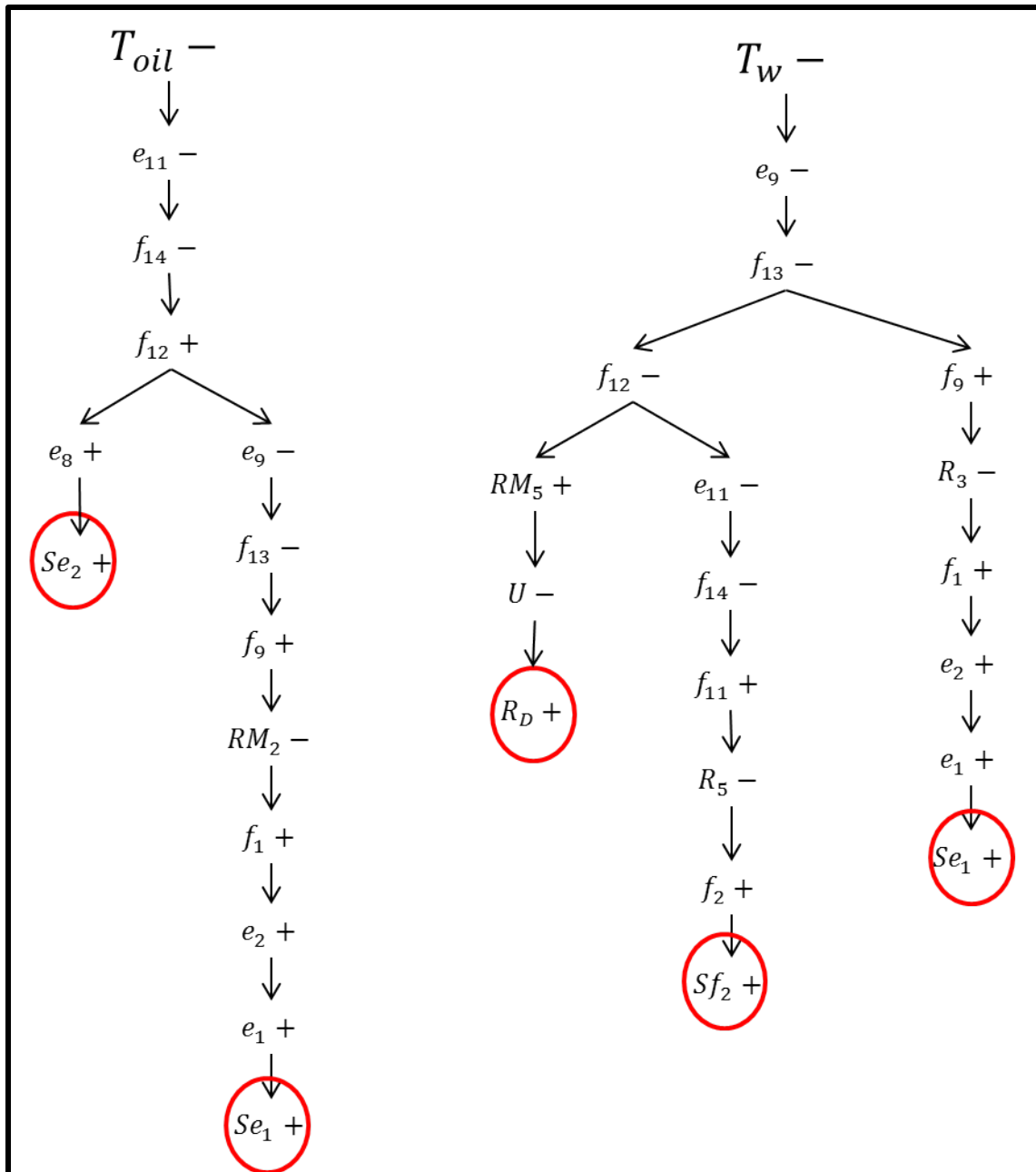


Figura 4.9 - Árboles de fallas para T_{oil-} y T_w-

Como puede apreciarse en la **Figura 4.9**, existen tres candidatos de falla para el árbol de falla T_w- . El primero es una diferencia entre los valores de coeficiente global de transferencia de calor negativa, es decir, que el coeficiente global de transferencia de calor haya disminuido, esto es físicamente posible dado que la pared del tubo está expuesta a residuos de ambos fluidos por lo que puede

ensuciarse, provocando que el coeficiente global de transferencia de calor disminuya, sin embargo, este candidato de falla se descarta dado que solamente se encuentra como candidato de falla en uno de los árboles que corresponde a la firma de falla. El segundo candidato de falla es $Sf_2 +$, que corresponde a una falla cualitativamente positiva en el sensor de flujo de aceite caliente a la entrada del intercambiador de calor, es decir, el sensor indica que hay un mayor caudal entrando al tubo de aceite que el que en realidad está entrando, debido a que este candidato de falla, al igual que el anterior, solo se presenta como candidato de falla en uno de los árboles de falla que corresponden a la firma de falla, se descarta como candidato de falla. El otro candidato de falla en $T_w -$, es la fuente de esfuerzo 1, con un valor cualitativamente positivo $Se_1 +$, y, como podemos ver, dicho candidato de falla, también se encuentra en el árbol de fallas para $T_{oil} -$, este candidato de falla con valor cualitativo positivo, corresponde a una discrepancia positiva en el porcentaje de apertura de la válvula entre la planta y el modelo de referencia, es decir, físicamente puede interpretarse como un mayor porcentaje de apertura en la válvula de la planta con respecto a la válvula del modelo de referencia, lo que a su vez puede interpretarse, como un atascamiento de la válvula en un porcentaje de apertura mayor al requerido para regular la temperatura del aceite a la salida, al valor de referencia (*Set Point*), lo cual concuerda con los valores obtenidos de los residuos, ya que al haber una mayor apertura de la válvula, mayor es flujo de agua, por lo que las temperaturas de ambos fluidos tienden a descender. Por lo tanto, la raíz o causa de la falla, un atascamiento de la válvula en un punto superior al requerido.

En las **Tabla 4-9, Tabla 4-10, Tabla 4-11, Tabla 4-12, Tabla 4-13 y Tabla 4-14** se presentan las diferentes firmas de fallas que se tienen en la matriz de falla, los árboles de fallas usados para las distintas firmas de falla, y el candidato de falla señalado como el causante de la falla, según el análisis hecho a partir de los árboles de falla. Como ya se había mencionado previamente el aporte de los árboles de fallas sobre la matriz de fallas es el conocimiento de cómo se propaga la firma de falla a través de las variables y parámetros del Bond-Graph haciendo

uso de la estructura del modelo y de la propiedad de causalidad del modelo Bond-Graph.

Tabla 4-9 - Atascamiento de la válvula en un punto superior al requerido

	r_1	r_2
Firma de falla	-1	-1
Árboles de falla	<p style="text-align: center;">$T_{oil} -$</p> <p style="text-align: center;">↓</p> <p style="text-align: center;">$e_{11} -$</p> <p style="text-align: center;">↓</p> <p style="text-align: center;">$f_{14} -$</p> <p style="text-align: center;">↓</p> <p style="text-align: center;">$f_{12} +$</p> <div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div style="text-align: center;"> <p>$e_8 -$</p> <p>↓</p> <p>$Se_2 -$</p> </div> <div style="text-align: center;"> <p>$e_9 -$</p> <p>↓</p> <p>$f_{13} -$</p> <p>↓</p> <p>$f_9 +$</p> <p>↓</p> <p>$RM_2 -$</p> <p>↓</p> <p>$f_1 +$</p> <p>↓</p> <p>$e_2 +$</p> <p>↓</p> <p>$e_1 +$</p> <p>↓</p> <p>$Se_1 +$</p> </div> </div> <p style="text-align: center;">(b)</p>	<p style="text-align: center;">$T_w -$</p> <p style="text-align: center;">↓</p> <p style="text-align: center;">$e_9 -$</p> <p style="text-align: center;">↓</p> <p style="text-align: center;">$f_{13} -$</p> <div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div style="text-align: center;"> <p>$f_{12} -$</p> <p>↙ ↘</p> <div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div style="text-align: center;"> <p>$RM_5 +$</p> <p>↓</p> <p>$U -$</p> <p>↓</p> <p>$R_D +$</p> </div> <div style="text-align: center;"> <p>$e_{11} -$</p> <p>↓</p> <p>$f_{14} -$</p> <p>↓</p> <p>$f_{11} +$</p> <p>↓</p> <p>$R_5 -$</p> <p>↓</p> <p>$f_2 +$</p> <p>↓</p> <p>$Sf_2 +$</p> </div> </div> </div> <div style="text-align: center;"> <p>$f_9 +$</p> <p>↓</p> <p>$R_3 -$</p> <p>↓</p> <p>$f_1 +$</p> <p>↓</p> <p>$e_2 +$</p> <p>↓</p> <p>$e_1 +$</p> <p>↓</p> <p>$Se_1 +$</p> </div> </div> <p style="text-align: center;">(d)</p>
Candidato de falla elegido	$Se_1 +$	
Causa de la falla	<i>Atascamiento de la válvula en un punto superior al requerido.</i>	

Tabla 4-10 - Atascamiento de la válvula en un punto inferior al requerido

	r_1	r_2
Firma de falla	+1	+1
Árboles de falla	<div style="text-align: center;"> $T_{oil} +$ \downarrow $e_{11} +$ \downarrow $f_{14} +$ $\swarrow \quad \searrow$ $f_{10} + \quad f_{12} -$ $\downarrow \quad \downarrow$ $RM_3 - \quad e_9 +$ $\downarrow \quad \downarrow$ $f_2 + \quad f_{13} +$ $\downarrow \quad \downarrow$ $Sf_2 + \quad f_9 -$ $\quad \quad \downarrow$ $\quad \quad RM_2 +$ $\quad \quad \downarrow$ $\quad \quad f_1 -$ $\quad \quad \downarrow$ $\quad \quad e_2 -$ $\quad \quad \downarrow$ $\quad \quad e_1 -$ $\quad \quad \downarrow$ $\quad \quad Se_1 -$ </div> <p style="text-align: center;">(a)</p>	<div style="text-align: center;"> $T_w +$ \downarrow $e_9 +$ \downarrow $f_{13} +$ $\swarrow \quad \searrow$ $f_{12} + \quad f_9 -$ $\swarrow \quad \searrow \quad \downarrow$ $e_8 + \quad e_{11} + \quad RM_2 +$ $\downarrow \quad \downarrow \quad \downarrow$ $Se_2 + \quad f_{14} + \quad f_1 -$ $\quad \quad \downarrow \quad \downarrow$ $\quad \quad f_{11} - \quad e_2 -$ $\quad \quad \downarrow \quad \downarrow$ $\quad \quad RM_4 + \quad e_1 -$ $\quad \quad \downarrow \quad \downarrow$ $\quad \quad f_2 - \quad Se_1 -$ $\quad \quad \downarrow$ $\quad \quad Sf_2 -$ </div> <p style="text-align: center;">(c)</p>
Candidato de falla elegido	$Se_1 -$	
Causa de la falla	<i>Atascamiento de la válvula en un punto inferior al requerido.</i>	

Tabla 4-11 - Falla en el sensor de flujo de aceite a la entrada (lectura mayor)

	r_2	r_3
Firma de falla	+1	-1
Árboles de falla	<div style="display: flex; justify-content: space-around; align-items: center;"> <div style="text-align: center;"> $T_w +$ ↓ $e_9 +$ ↓ $f_{13} +$ ↙ ↘ $f_{12} +$ $f_9 -$ ↙ ↘ ↓ $e_8 +$ $e_{11} +$ $RM_2 +$ ↓ ↓ ↓ $Se_2 +$ $f_{14} +$ $f_1 -$ ↓ ↓ ↓ ↓ $f_{11} -$ $e_2 -$ ↓ ↓ ↓ ↓ $RM_4 +$ $e_1 -$ ↓ ↓ ↓ $f_2 -$ $Se_1 -$ ↓ ↓ $Sf_2 -$ $Sf_2 -$ </div> <div style="text-align: center;"> $f_2 -$ ↓ $Sf_2 -$ </div> </div> <p style="text-align: center; margin-top: 20px;">(c)</p>	
Candidato de falla elegido	$Sf_2 -$	
Causa de la falla	<i>Falla en el sensor de flujo de aceite a la entrada (lectura mayor)</i>	

Tabla 4-12 - Falla en el sensor de flujo de aceite a la entrada (lectura inferior)

	r_2	r_3
Firma de falla	-1	+1
Árboles de falla		
Candidato de falla elegido	$Sf_2 +$	
Causa de la falla	<i>Falla en el sensor de flujo de aceite a la entrada (lectura inferior)</i>	

Tabla 4-13 - Falla en el sensor de temperatura de agua a la entrada (inferior)

	r_2
Firma de falla	-1
Árboles de falla	<div style="text-align: center;"> $T_w +$ \downarrow $e_9 +$ \downarrow $f_{13} +$ $\swarrow \quad \searrow$ $f_{12} + \quad f_9 -$ $\swarrow \quad \searrow \quad \downarrow$ $e_8 + \quad e_{11} + \quad RM_2 +$ $\downarrow \quad \downarrow \quad \downarrow$ $Se_2 + \quad f_{14} + \quad f_1 -$ $\downarrow \quad \downarrow \quad \downarrow$ $f_{11} - \quad e_2 -$ $\downarrow \quad \downarrow$ $RM_4 + \quad e_1 -$ $\downarrow \quad \downarrow$ $f_2 - \quad Se_1 -$ $\downarrow \quad \downarrow$ $Sf_2 -$ </div> <p style="text-align: center;">(c)</p>
Candidato de falla elegido	$Se_2 +$
Causa de la falla	<i>Falla en el sensor de temperatura de agua a la entrada (lectura inferior)</i>

Tabla 4-14 - Falla de ensuciamiento de la pared del tubo (disminución en el coeficiente global de transferencia de calor)

	r_2
Firma de falla	-1
Árboles de falla	<p style="text-align: center;">(d)</p>
Candidato de falla elegido	$R_D +$
Causa de la falla	Falla de ensuciamiento de la pared del tubo (disminución en el coeficiente global de transferencia de calor, debido a la resistencia de ensuciamiento)



5. Capítulo 5 – Conclusiones, aportaciones y trabajos futuros

5.1 Conclusiones

Las conclusiones aquí presentadas se realizaron con base en las problemáticas y limitaciones que se presentaron a lo largo del desarrollo de esta tesis, éstas se relacionan con la técnica de modelado y el diagnóstico de fallas, así como el propio proceso.

La técnica de modelado Bond Graph es buena en términos de simplicidad, aun teniendo en cuenta que el uso de dicha técnica conlleva el aprendizaje de reglas y restricciones. Su uso resulta apropiado cuando se tienen en cuenta procesos que involucran diversos dominios energéticos.

En el caso del modelo de intercambiador de calor desarrollado en esta tesis, se complicó el modelo debido a algunas no linealidades propias del proceso, que se tomaron en cuenta en las consideraciones de modelado. Un ejemplo de esto es la media logarítmica, la cual se tomó como consideración del gradiente de temperatura a lo largo del tubo, y la cual involucraba las propias temperaturas a la salida de ambos tubos. Así también la consideración que se hizo relacionada al cambio de temperatura debido al movimiento del fluido en el tubo, modelado en Bond Graph como una resistencia térmica no lineal dependiente de flujo másico en cada tubo.

El modelo de válvula tuvo sus complicaciones; una moto válvula de control de flujo es un sistema mecatrónico que conlleva varios elementos tanto mecánicos, como eléctricos y magnéticos, por lo cual, al intentar modelar una válvula de control tomando en cuenta todos éstos elementos, daría como resultado un modelo que sería incluso de mayor complejidad que el propio modelo de intercambiador de calor, por el contrario la idea es tener un modelo de válvula sencillo, que emule la dinámica de una válvula de control lo mejor posible pero sin

llegar a ser un modelo demasiado grande y complicado. Se optó por modelar la relación de porcentaje de apertura de la válvula con respecto al flujo de salida de esta por medio de la relación que se obtiene mediante la llamada característica de válvula C_v , la cual es una relación no lineal.

Con relación a la detección y localización de fallas se aplicó una metodología de FDI basada en un modelo paralelo. Se utilizó un modelo de proceso y un modelo de diagnóstico para la generación de residuos, y se logró la detección de fallas. También se usaron las firmas de fallas y árboles de fallas para la localización de las fallas, pudiendo así determinar la causa raíz de éstas.

Existe una diferencia entre la información que proporciona la matriz de referencia de fallas y los árboles de fallas, a pesar de que en términos generales se puede lograr lo mismo con ambos, los árboles de falla proporcionan información estructural de la propagación de la falla, y la forma en como van interactuando las variables del proceso al hacer la propagación, información que con la matriz de referencia de fallas no se puede tener.

Los árboles de fallas representan una buena metodología de localización de fallas a través de la propagación de la firma de fallas hacia los elementos del modelo en Bond-Graph por medio de las relaciones causa-efecto, estos pueden obtenerse de diversos métodos y a partir de diferentes tipos de modelo, sin embargo es claro que es a partir de un modelo en Bond-Graph que su obtención es más sencilla.

Se realizó un análisis detallado respecto a la falla de ensuciamiento en donde se toman en cuenta factores como las sustancias consideradas en el caso de estudio y el tiempo de ensuciamiento real basado información empírica de intercambiadores de calor reales, así como el hecho de considerarla como una medida de tiempo para mantenimiento periódico.

Generalmente el problema de ensuciamiento se suele resolver sobredimensionando el equipo para considerar el factor de ensuciamiento y poder

mantener las temperaturas deseadas a pesar del ensuciamiento, en este trabajo el problema se resuelve con métodos FDI.

Para fallas en actuadores se consideró el modelo dinámico de la válvula, para calcular una válvula de control se hace a partir de curvas de desempeño, con base en una necesidad de flujo a tratar a las condiciones de entrada. Estas curvas de desempeño normalmente no se consideran para el modelo dinámico que se define para el control. Normalmente se define una ganancia de estado estable constante y en muchas ocasiones esta ganancia es idealmente 1. Para este trabajo de tesis yo combino modelo dinámico y curvas de desempeño, además de un tiempo de respuesta de la válvula.

En cuanto la consideración de las fallas en un sistema simple normalmente solo se consideran 1 o 2 fallas más comúnmente en sensores, en este trabajo de tesis se consideran varias fallas de diversos tipos, se concluye que aunque el sistema es simple es difícil de localizar fallas porque en realidad las causas pueden ser varias.

Se observó la necesidad de más sensores, ya que entre más sensores se tienen mayor información se tiene del sistema y puede realizarse una mejor localización, por otro lado se deben considerar a su vez fallas en estos sensores.

El Bond-Graph es bueno para FDI, prueba de esto es la cantidad de trabajos generados de FDI basados en modelos Bond-Graph, esto debido a la información causal y estructural que proporcionan dichos modelos.

El análisis de aislabilidad que se hace en esta tesis es puramente cualitativo, por lo que hace falta incluir algún criterio cuantitativo para distinguir entre fallas progresivas y súbitas, esto ayudaría a distinguir entre algunas fallas con firmas repetidas.

5.2 Aportaciones

Pueden destacarse de este trabajo de tesis algunas contribuciones en varias de las etapas del desarrollo. En la parte de modelado se contribuye con un modelo

que, si bien su desarrollo se basó en algunos otros que ya existían, constituye a su vez una base para futuros trabajos en donde se requiera un modelo Bond Graph, que contenga algunas no linealidades típicas de un intercambiador de calor.

En la parte de modelado también se obtuvo un modelo de válvula de control de flujo, el cual, a pesar de ser un modelo relativamente sencillo, modela la parte hidráulica de una válvula de control, y además se considera una dinámica de primer orden; podemos considerar esta una buena aportación, dado que en la literatura suele encontrarse modelos que son muy complejos, o que no consideran la parte dinámica de la válvula.

Las principales contribuciones que se consideran en esta tesis son el análisis de aislabilidad, y la aplicación del método de diagnóstico de fallas a actuadores y sensores. Por el lado del análisis de aislabilidad, se analizan los casos de detección de fallas con dos y tres sensores, el número de fallas que se pueden detectar y localizar en cada caso y cuales fallas son, para el caso de la aplicación del método a actuadores y sensores constituye un aportación importante ya que los anteriores trabajos que se habían realizado relacionados al diagnóstico de fallas basado en modelos Bond Graph se habían sido limitados a fallas paramétricas, y en el caso de la aplicación de otros métodos de FDI, se habían enfocado casi en su mayoría a fallas en sensores.

Así también se considera una aportación importante el hecho de haber considerado diversas fallas, y la consideración en cómo se simula la falla de ensuciamiento basado en datos empíricos reportados en manuales de intercambiadores de calor reales, tomando en cuenta el tiempo de ensuciamiento como un indicador del periodo de mantenimiento y las sustancias del caso de estudio.

5.3 Trabajos futuros

Se prevé que se puedan realizar trabajos teniendo como base el presente trabajo de tesis, dichos trabajos consistirán en diagnóstico de fallas, tanto para modelos

lineales como modelos no lineales, explorando otros métodos de diagnóstico o estudiando variantes al método que se presenta en este trabajo.

También en el ámbito de la aplicación, es decir del proceso o sistema a considerar, puede aplicarse para un proceso quizá aún más complejo, es probable que este trabajo sirva de base para su uso en la aplicación de un método de detección de fallas para celdas de combustible que es uno de los procesos que se trabajan en CENIDET, y que es una de los sistemas que están marcando tendencia como alternativa para fuentes energéticas.

Pudieran presentarse también futuros trabajos orientados al control, que tomen como referencia los modelos tanto de válvula de control de flujo como el de intercambiador de calor a contracorriente desarrollados en esta tesis.

Bibliografía

- [1] D. Geitner, «Add-on library BG V.2.1 for graphical programming of Bondgraphs by means of Simulink,» ETI/TU Dresden, [En línea]. Available: https://eeiwzg.et.tu-dresden.de/ae2_files/ae_8_1e.htm.
- [2] R. C. Rosenberg y D. C. Karnopp, *System Dynamics a Unified Approach*, Wiley, 1990.
- [3] H. M. Paynter, «Systems Engineering Seminar,» de *Port, Energy, Systems*, Cleveland, USA, 1959.
- [4] B. O. Bouamama, M. N. El Harabi, M. K. Abdelkrim y B. Gayed, «Bond Graphs for diagnosis of chemical process,» *Computers and Chemical Engineering*, vol. 36, pp. 301-324, 2011.
- [5] R. El Harabi, B. O. Bouamama, B. Gayed y M. N. Abdelkrim, «Pseudo Bond Graph for fault detection and isolation of an industrial chemical reactor part I: Bond Graph Modeling,» LAGIS, UMR CNRS 8146, Ecole Polytechnique Universitaire de Lille, Cité Scientifique, 59655 Villeneuve d'Ascq Cedex, France, Lille, Francia, 2010.
- [6] R. El Harabi, B. O. Bouamama, B. Gayed y M. N. Abdelkrim, «Pseudo Bond Graph for fault detection and isolation of an industrial chemical reactor part II: FDI system design,» LAGIS, UMR CNRS 8146, Ecole Polytechnique Universitaire de Lille, Cité Scientifique, 59655 Villeneuve d'Ascq Cedex, France, Lille, Francia, 2011.

- [7] R. El Harabi, B. O. Bouamama, B. Gayed y M. N. Abdelkrim, «8th International Multi-Conference on Systems, Signals & Devices,» de *Robust fault diagnosis of chemical system by using uncertain Bond Graph model*, Lille, Francia, 2011.
- [8] M. Ilyas , B. O. Bouamama y B. Meghebbar, «3rd International Control Conference on Systems and Control,» de *Hybrid Bond Graph for robust diganosis - application to hydraulic system*, Argiers, Algeria, 2013.
- [9] A. K. Samantaray y B. O. Bouamama, *Model based process supervision a Bond Graph approach*, London, UK: Springer, 2008.
- [10] S. A. Arogeti, D. Wang, C. B. Low y M. Yu, «Fault detection, isolation and estimation in a vehicle steering system,» *IEEE Transactions on Industrial Electrónics*, vol. 59, nº 12, 2012.
- [11] B. O. Bouamama, R. Merzouki y S. Benmoussa, «Bond Graph Approach for plant fault detection and isolation: application to intelligent autonomous vehicle,» *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, vol. 11, nº 2, pp. 585-593, 2004.
- [12] B. O. Bouamama, K. Medjaher, M. Bayart y A. K. Samantaray, «Fault detection and isolation of smart actuators using Bond Graphs and external models,» *Control Engineering Practice*, vol. 13, pp. 159-175, 2005.
- [13] D. C. Karnopp, D. L. Margolis y R. C. Rosenberg, *System Dynamics*, New Jersey: Wiley, 2006.
- [14] P. J. Mosterman, «Hybrid dynamic systems: a hybrid Bond Graph modeling paradigm,» Graduate School of Vanderbilt University, Tenesee, 1997.
- [15] C. B. Low, S. Arotegi y M. Luo, «Quantitive hybrid Bond Graph based fault detection and isolation,» *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, vol. 7, nº 3, pp. 558-569, 2010.
- [16] W. Borutzky, «Chapter 12 Applications,» de *Bond Graph Methodology*, London, Springer, 2010, pp. 633-637.
- [17] J. U. Thoma y B. O. Bouamama, *Modelling and Simulation in Thermal and Chemical Engineering: A Bond Graph Approach*, Springer, 2000.
- [18] C. M. Astorga-Zaragoza, V. M. Alvarado-Martínez y G. V. Guerrero-Ramírez, «Observer-based monitoring of heat exchangers,» *ISA Transactions*, vol. 47, pp. 15-24, 2008.
- [19] A. K. Samantaray y S. K. Ghosal, «Chapter 7 - Bond Graph Model Based Fault Diagnosis,» de *Bond Graph Modelling of Engineering Systems*, Springer, 2011, pp. 227-265.
- [20] K. Medjaher y A. K. Samantaray, «Bond Graph model of a vertical U-tube steam condenser coupled with a heat exchanger,» *Simulation Modeling Practice and Theory*, vol. 17, pp. 228-239, 2007.

- [21] L. Zhu, J. He, Q. Zhao y Y. Y. Guo, «2nd International Conference on Intelligent Control and Information Processing,» de *Fault diagnosis of aircraft heat exchangers based on RELS method*, 2011.
- [22] A. K. Samantaray, B. O. Bouamama, M. Staroswiecki y G. Dauphin Tanguy, «Diagnostic Bond Graphs for online fault detection and isolation,» *Simulation Modelling Practice and Theory*, vol. 14, pp. 237-262, 2006.
- [23] A. K. Samantaray y S. K. Ghosal, «Bicausal Bond-Graph for supervision: From fault detection to fault accomodation,» *Journal of the Franklin Institute*, vol. 345, pp. 1-28, 2008.
- [24] S. A. K. Namaane y N. K. M'Sirdi, «On the state structural observability and controlability of linear and linearized Bond Graphs,» Laboratoire des Sciences de l'Informatique et des Systèmes Université Aix-Marseille III, Marseille, Francia, 2012.
- [25] C. Fantuzzi y C. Secchi, «American Control Conference,» de *Energetic approach to parametric fault detecction and isolation*, Boston, USA, 2004.
- [26] M. Delgado y J. Garcia, «Parametric Identification on Bond Graph,» Departamento de Procesos y Sistemas, Universidad Simón Bolívar, Caracas, Venezuela, 1993.
- [27] K. Spreitzer y P. Ballé, «A Multi-Model Approach for Detection and Isolation of Sensor and Process Faults for a Heat Exchanger,» de *Proceedings of the American Control Conference*, Chicago, Illinois, 2000.
- [28] N. Tudoroiu y M. Zaheeruddin, «Fault Detection and Diagnosis of Valve Actuators in HVAC Systems,» de *Proceedings of the 2005 IEEE Conference on Control Applications*, Toronto, Canda, 2005.
- [29] L. EL Bahir y M. Kinnaert, «Fault Detection and Isolation for a Three Tank System Based on a Bilinear Model of the Supervised Process,» de *International Conference on Control Conference Publication N°45 IEE*, Bruxelles, Belgium, 1998.
- [30] L. Tesar, L. Berec, G. Dolanc, G. Szederkényi, J. Kadlec, D. Juricic, K. Hangos y M. Kinnaert, «A Toolbox for Model-based Fault Detection and Isolation,» de *European Control Conference*, Karlsruhe, Germany, 1999.
- [31] A. Mukherjee, R. Karmakar y A. K. Samantaray, *Bond Graph in Modeling, Simulation and Fault Identification*, New Delhi: I.K. International Publishing House Pvt. Ltd., 2006.
- [32] R. Shoureshi, «Modeling and dynamics of two pahse flow heat exchangers using temperature entropy Bond Graphs,» School of Mechanical Engineering, West Lafayette, India, 1985.
- [33] R. Isermann, *Fault-Diagnosis Systems*, Berlin: Springer, 2006.
- [34] B. M. G. Contreras, «Diagnóstico de fallas en un motor de corriente directa utilizando el

- método del Bond Graph,» Cuernavaca, México, 2002.
- [35] D. Q. Kern, Procesos de transferencia de calor, México : Compañía Editorial Continental S.A. de C.V, 1999.
- [36] R. C. Martínez, «Revista Académica de Investigación Tlatemoani,» [En línea]. Available: <http://www.eumed.net/rev/tlatemoani/05/rcm.htm>. [Último acceso: 04 10 2015].
- [37] V. software, «Vaxa software,» Vaxa software, [En línea]. Available: http://www.vaxasoft.com/doc_edu/fis/viscosidad.pdf. [Último acceso: 23 10 14].
- [38] S. C.-C. E., «rumbonorte,» [En línea]. Available: <http://www.rumbonorte.cl/downloads/Tabla%20de%20Calor%20Espec%C3%ADfico.pdf>. [Último acceso: 23 10 14].
- [39] T. E. Toolbox, «The Engineering Toolbox,» The Engineering Toolbox, [En línea]. Available: http://www.engineeringtoolbox.com/thermal-conductivity-d_429.html. [Último acceso: 23 10 2014].
- [40] D. d. I. E. y. Fluidomecánica, «Notas: Transmisión de calor por convección,» Valladolid, 2013.
- [41] C. A. O. E. D. Franco, «OpenCourseWare,» Universidad de Sevilla, 25 Abril 2008. [En línea]. Available: http://ocw.us.es/arquitectura-e-ingenieria/operaciones-basicas/contenidos1/tema8/pagina_04.htm. [Último acceso: 10 08 2014].
- [42] D. P. D. Frank P. Incropera, Fundamentos de Transferencia de Calor, Pearson Prentice Hall, 1999.
- [43] J. F. Ontiveros, «Web del Profesor Jesús F. Ontiveros O.,» [En línea]. Available: <http://webdelprofesor.ula.ve/ingenieria/jesuf/OP2-001Def.pdf>. [Último acceso: 24 10 2015].
- [44] E. Umez, Dinámica de sistemas y control, México: Thomsom, 2001.
- [45] D. E. Seborg, T. F. Edgar, D. A. Mellichamp y F. J. Doyle III, Process dynamics and control, Wiley, 2011.
- [46] W. B. Bequette, Process dynamics: Modeling, Analysis and Simulation, New Jersey: Prentice Hall, 1998.
- [47] Luyben, PLANTWIDE DYNAMIC SIMULATORS IN CHEMICAL PROCESSING AND CONTROL, New York: Marcel Dekker, Inc, 2002.
- [48] M. Ruel, *A simple method to determine control valve performance*, Swanton, Vermont: Top Control Inc.
- [49] Entech, «Control Valve Dynamic Specification,» Austin, Texas, 1998.

- [50] L. F. Albright, *Albright Chemical Engineering Handbook*, Boca Raton, Florida: CRC Press, 2008.
- [51] S. Anderson y N. Rinehart, «How to achieve optimal control valve performance,» *Valve Magazine*, 2007.
- [52] Termokew, «termokew,» TERMOKEW S.A. DE C.V., [En línea]. Available: <http://www.termokew.mx/termopares.php#rangos>.
- [53] D. G. L. López, *Librería BGV2.1 para programación gráfica de Bond-Graphs por medio de Simulink*, Cuernavaca: Cenidet.
- [54] Luyben, *Modelling of Dynamic Systems*, Wiley, 2000.
- [55] S. Rahmatallah, «Analytical and experimental investigation of flow reversible heat exchangers using temperature entropy Bond Graphs,» School of Mechanical Engineering, Purdue University, West Lafayette, Indiana, 1985.
- [56] D. Rodríguez Ramirez y T. Alamo Canterero, «Identificación mediante el metodo de mínimos cuadrados».
- [57] S. Skogestad, «Selecting the best distillation control configuration,» *ALChE Journal*, vol. 36, nº 5, pp. 753-764, 1990.
- [58] M. Tan, L. Chen y J. Jin, «Bond Graph based fault diagnosis for a marine condensate-booster-feedwater system,» *Applied Energy*, vol. 81, pp. 449-458, 2005.
- [59] X. Zhang y K. Hoo, «Effective fault detection and isolation using Bond Graph based domain decomposition,» *Computers and Chemical Engineering*, vol. 35, pp. 132-148, 2011.

6. Apéndices

a) Apéndice A – Guía para el uso de la librería BGv2.1 de MATLAB Simulink

Descripción general: La librería BG V2.1 ha sido desarrollada por Dr. Geitner. Esta librería contiene bloques con modelos de los elementos y vínculos necesarios para simular sistemas modelados con Bond Graph. La librería BG V2.1 se guarda y usa como una herramienta más del banco de toolbox de Simulink, por lo tanto su uso se puede combinar con la ejecución de programas MATLAB [53].

Descarga e instalación: La página web de descarga es:

http://eeiwzq.et.tu-dresden.de/ae2_files/ae_8_1e.htm

De aquí se puede descargar la última versión *BG V.2.1* incluyendo ejemplos y documentación.

De todos los archivos que se descargan, la carpeta que contiene las librerías para simulación gráfica se llama. Esta carpeta se guarda preferentemente en el directorio donde “**BibV21**” está instalado MATLAB, específicamente en la carpeta de Toolbox; sin embargo, no hay problema si se guarda en cualquier otra dirección.

En ambos casos es necesario declarar en MATLAB la dirección de la carpeta: en el **BibV21** menú principal “file” se selecciona, se abre una ventana y se selecciona el botón “**Set path**”, se indica en que folder se encuentran los archivos de la librería; se guarda en “**Add path**” y se cierra la ventana.

El resto de los archivos y carpetas contienen documentación y ejemplos. Estos pueden ser archivados en cualquier otro lugar.

Una vez instalada la librería, esta estará disponible en el visor de toolbox de Simulink (**Figura 6.1**) y puede usarse en combinación con los bloques, librerías y herramientas de Simulink, y también con funciones y programas de código MATLAB.

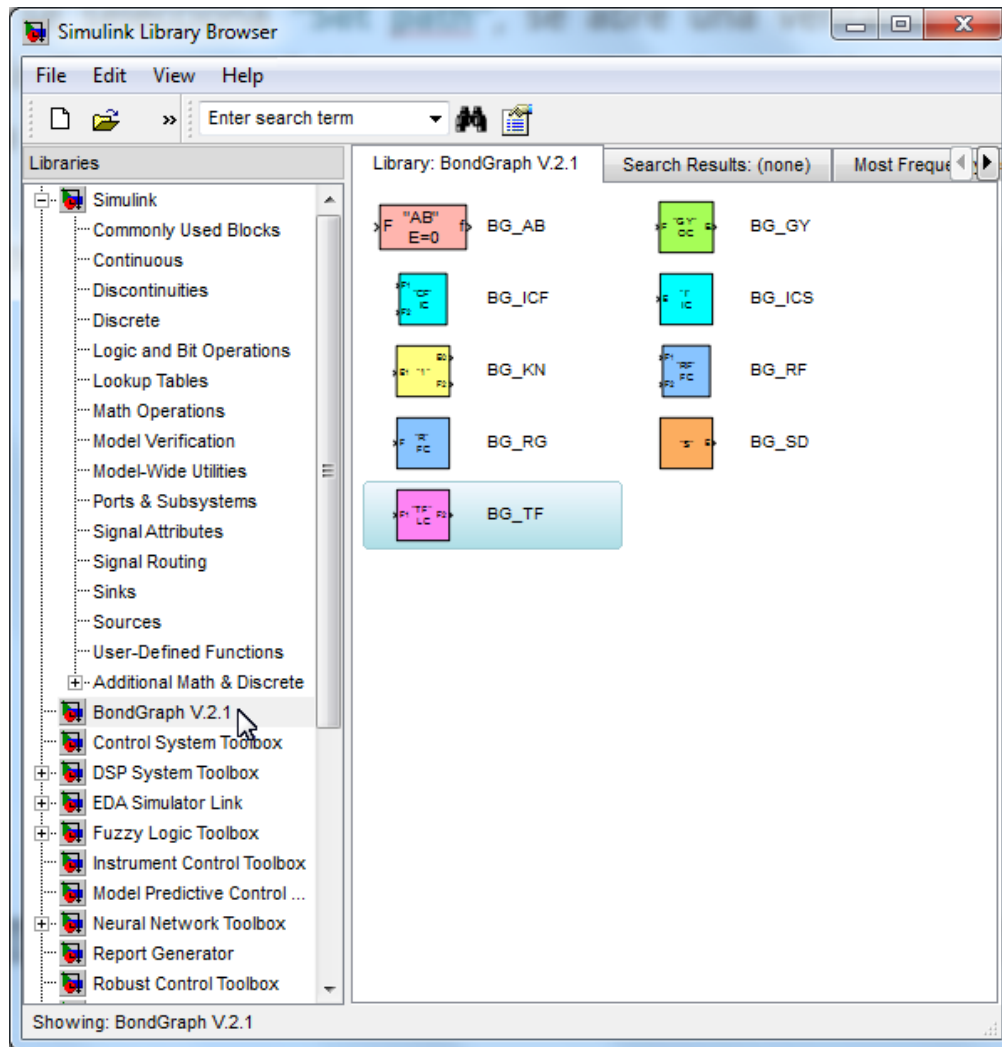



Figura 6.1 - Ventana de toolbox de Simulink, conteniendo la librería de simulación con los bloques de Bond-Graph BGv2.1

Descripción de los bloques conteniendo las ecuaciones constitutivas de los elementos: En la tabla I se muestran y describen los bloques contenidos en la librería BGv2.1.

Bloque	Elemento	Configuración
	Fuente	<p>Representa una fuente de flujo o una fuente de esfuerzo según la configuración.</p> <ul style="list-style-type: none"> Se especifica en el tipo de fuente. Se especifica también si la fuente alimenta al sistema o si la alimentación viene del sistema (de acuerdo con el flujo de potencia – o la dirección de la semiflecha). Acepta parámetros constantes en la ventana de configuración o parámetros

		<p>especificados por una fuente externa (programa o función MATLAB).</p> <ul style="list-style-type: none"> La entrada puede ser escalar o vector.
	Vinculo/Nodo	<p>Representa los vínculos o uniones serie y paralelo.</p> <ul style="list-style-type: none"> Se declara en el tipo de vínculo. Se define el número de entradas. Se define el número de salidas.
	Transformador	<p>Representa un elemento transformador.</p> <ul style="list-style-type: none"> Se especifica el tipo de causalidad según la estructura del Bond Graph. Acepta parámetros constantes en la ventana de configuración o parámetros especificados por una fuente externa (programa o función MATLAB). Se indica si los parámetros son lineales o no-lineales. No lineales se definen de manera externa. La entrada puede ser escalar o vector.
	Disipador	<p>Representa un elemento disipador - Resistencia.</p> <ul style="list-style-type: none"> Se declara en el tipo de causalidad. El bloque tiene como opción desplegar como salida la potencia. Acepta parámetros constantes en la ventana de configuración o parámetros especificados por una fuente externa (programa o función MATLAB). Se indica si los parámetros son lineales o no-lineales. No lineales se definen de manera externa. La entrada puede ser escalar o vector. Existe la opción de desplegar las variables de desplazamiento y momento en la salida.
	Almacenamiento	<p>Representa un elemento almacenador: capacitivo o inductivo.</p> <ul style="list-style-type: none"> Se declara en el tipo de elemento almacenador (capacitancia / inductancia) y el tipo de causalidad (integral / derivativa). El bloque tiene como opción desplegar como salida la potencia. Acepta parámetros constantes en la ventana de configuración o parámetros especificados por una fuente externa (programa o función MATLAB). La entrada puede ser escalar o vector. Existe la opción de desplegar las variables de desplazamiento y momento en la salida. Se especifican las condiciones iniciales de las variables de potencia – (son los elementos dinámicos del sistema).

	Girador	<p>Representa un elemento girador.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Se especifica el tipo de causalidad según la estructura del Bond Graph. • Acepta parámetros constantes en la ventana de configuración o parámetros especificados por una fuente externa (programa o función MATLAB). • Se indica si los parámetros son lineales o no-lineales. No lineales se definen de manera externa. • La entrada puede ser escalar o vector.
	Campo Disipador	Elemento Resistencia. Acepta vectores y multientradas. Los parámetros característicos se dan como una matriz. – Ver notas.
	Campo Almacenador	Elementos almacenadores (capacitancia / inductancia). Acepta vectores y es un elemento multientrada. Los parámetros característicos se dan como una matriz. – Ver notas.
	Conexión de enlace activado	Toma los valores de la variable de potencia seleccionada (F o E)

NOTAS:

Los elementos multipuerto son básicamente los vínculos, uniones o nodos, sin embargo también se habla de “multienlaces”, este último término se refiere a enlaces por los que entran y salen variables agrupadas en vectores. Varios enlaces simples pueden ser tratados como un multienlace uni-dimensional (**Figura A.6.2**). La dimensión puede indicar variaciones espaciales.

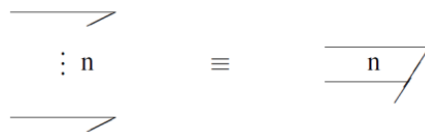


Figura A.6.2 - Combinación de n enlaces simples en un multienlace de dimensión n .

Los elementos disipadores y almacenadores hasta el momento se han estudiado como elementos momo-puerto, lo cual es útil para tratar una gran cantidad de sistemas, sin embargo en forma generalizada, los disipadores y capacitores son elementos multipuerto y son llamados campos.

Los elementos disipadores (resistencia) pueden tener varios puertos de potencia. Si todos los esfuerzos se agrupan en un vector e y todos los flujos se agrupan en un vector f , entonces la potencia en el elemento es: $P = e^T f = f^T e$. La ecuación constitutiva es: $e = Rf$, donde R es una matriz positiva definida (es la que se introduce como parámetro en un campo disipador).

Los transformadores y giradores son para muchas aplicaciones, elementos de dos puertos. Su uso se puede extender igualmente al manejo de multipuerto. Si los enlaces adyacentes de un transformador o de un girador con $2n$ puertos se agrupan en dos multienlaces con una dirección correspondiente al flujo de energía a través de los elementos, entonces el módulo o parámetro característico del elemento se transforma en una matriz T o G de $n \times n$.

b) Apéndice B - Simulación de las fallas

B.1 - Falla de atascamiento de la válvula en un punto superior al deseado

Se induce una falla a la entrada de la válvula, es decir a la señal de control, de manera que, de la señal de control, la cual se encontraba actuando para regular la temperatura al valor del *set point*, se toma a los 1005 segundos el valor de la señal de control en ese momento, y se mantiene constante por el resto de la simulación, simulando de esta forma un atascamiento a los 1005 segundos en la válvula de control, la cual ya no responde más a la señal de control sin importar la diferencia de temperatura a la salida con respecto a la referencia. A continuación se presentan las **Figura B.6.3**, **Figura B.6.4** y **Figura B.6.5**, correspondientes a los resultados de esta falla.

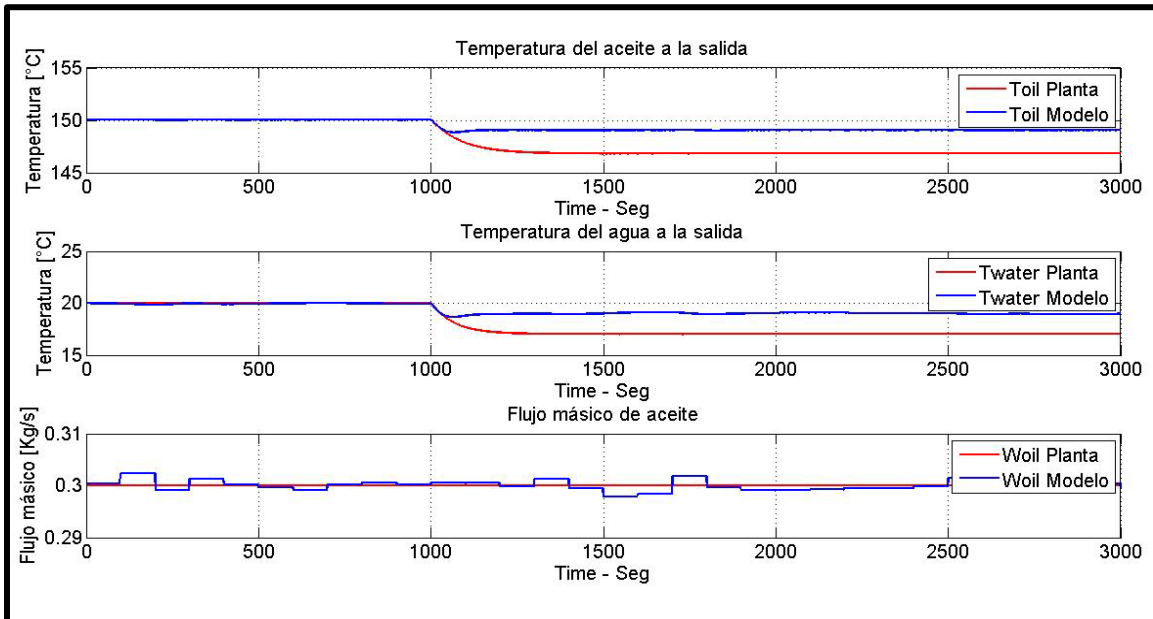


Figura B.6.3 - Comparación de las señales de salida del intercambiador de calor ante una falla de atascamiento en un punto superior al requerido en la válvula de control.

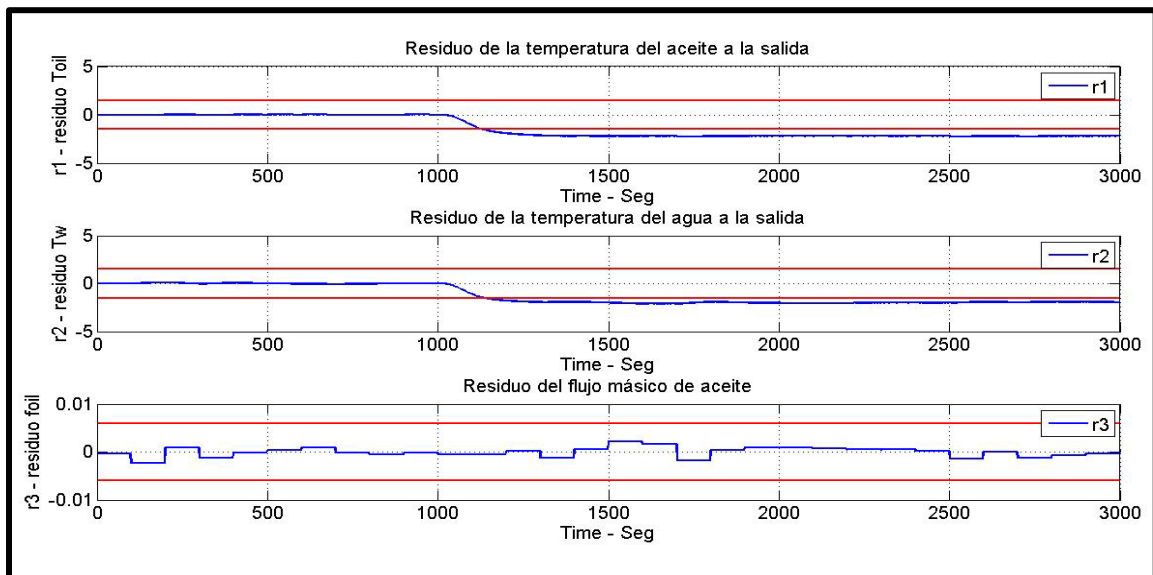


Figura B.6.4 - Comparación de los residuos generados ante una falla de atascamiento en un punto superior al requerido en la válvula de control.

Podemos ver que para el caso de esta falla, que las temperaturas de ambos fluidos descienden, como puede verse en las gráficas de la **Figura B.6.3**. Así también se puede ver claramente que dado que el flujo másico de aceite no se ve afectado en esta falla, no tiene consecuencias, y el residuo de dicha señal es

esencialmente cero. En la **Figura B.6.5** se muestran los residuos generados r_1 , r_2 y r_3 una vez que se filtran por el umbral.

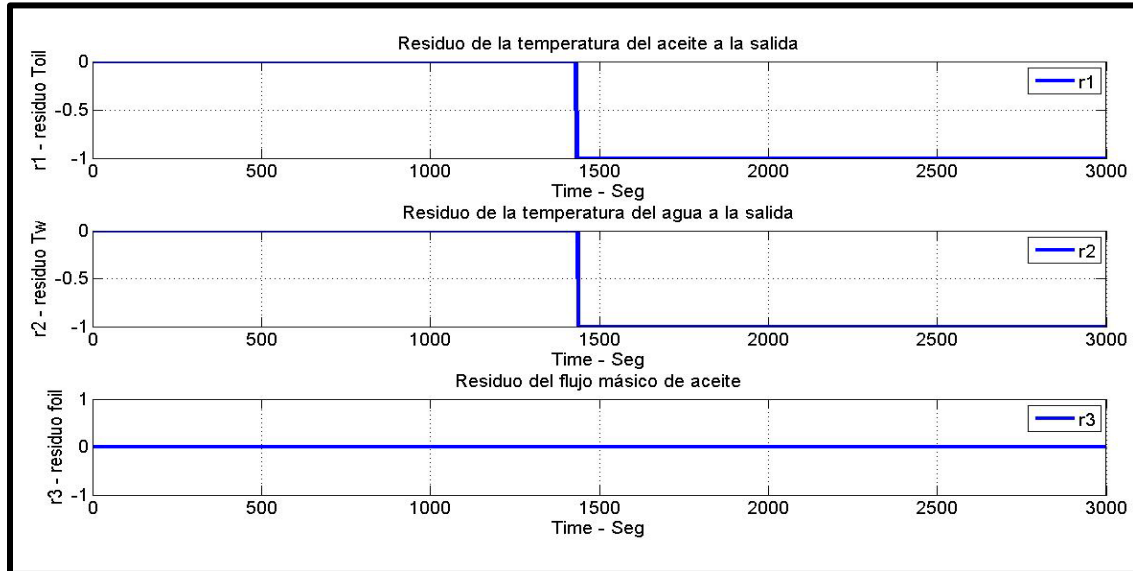


Figura B.6.5 - Residuos filtrados por el umbral, generados debido a una falla de atascamiento en un punto superior al requerido, en la válvula de control de flujo de agua.

B.2 - Falla de atascamiento de la válvula en un punto inferior al deseado

La segunda falla se realiza bajo las mismas condiciones de la falla anterior descritas previamente, se realiza el mismo tipo de falla, se toma el valor de la señal de control a los 1005 segundos, y se mantiene hasta el final de la simulación, en dicho punto la señal de control se encontraba en un punto inferior al requerido para estabilizar la temperatura en el valor establecido en la referencia, haciendo uso de esta falla podemos analizar los residuos generados por la falla de atascamiento cuando la válvula de control de flujo queda bloqueada en un punto inferior al requerido, los resultados se muestran en las **Figura B.6.6**, **Figura B.6.7** y **Figura B.6.8**.

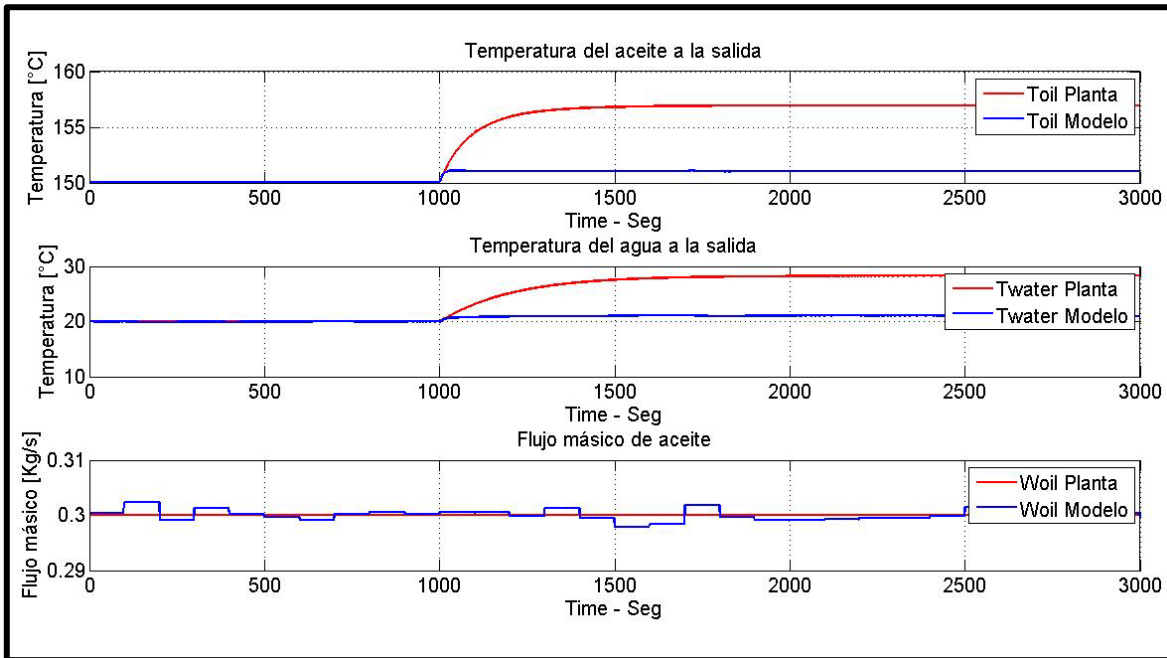


Figura B.6.6 - Comparación de las señales de salida del intercambiador de calor ante una falla de atascamiento en un punto inferior al requerido en la válvula de control.

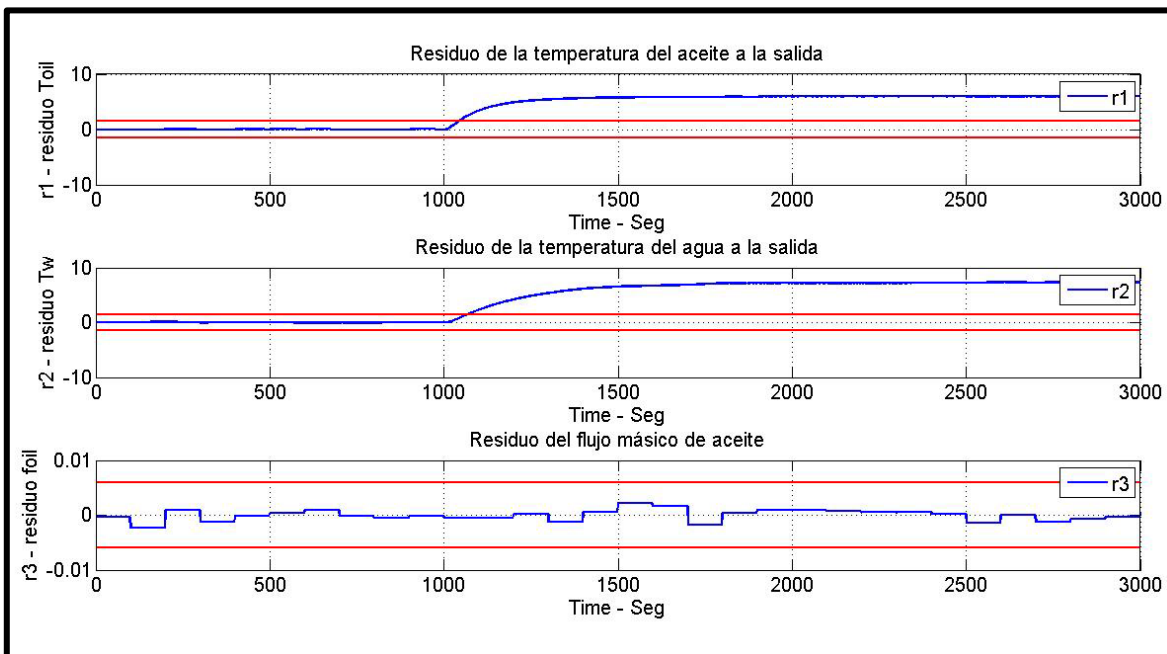


Figura B.6.7 - Comparación de los residuos generados ante una falla de atascamiento en un punto inferior al requerido en la válvula de control.

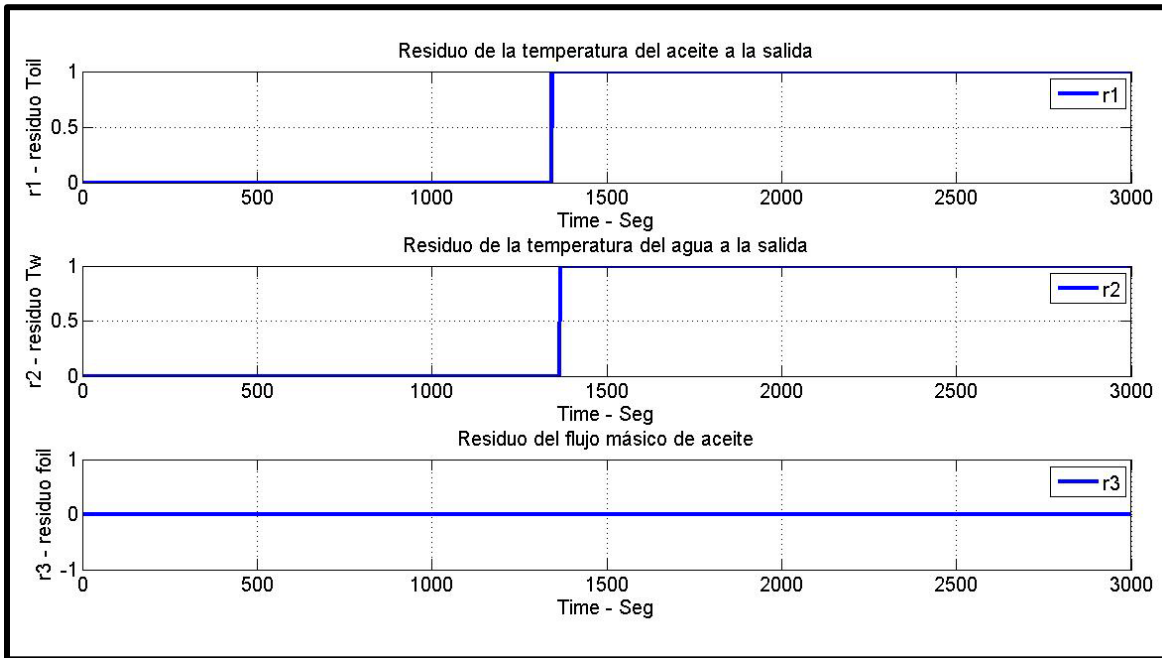


Figura B.6.8 - Residuos filtrados por el umbral, generados debido a una falla de atascamiento en un punto inferior al requerido en la válvula de control de flujo de agua.

B.3 - Falla en el sensor de flujo de aceite a la entrada (lectura superior a la real)

La falla en el sensor de flujo se simula con las mismas condiciones de simulación que las fallas anteriores, la falla en el sensor es una falla aditiva, abrupta simulada a los 2000 segundos de iniciada la simulación, se añade un valor positivo a la señal que proviene del sensor de flujo, el porcentaje de falla es del 5%, lo que puede significar una degradación del sensor de flujo, provocando una lectura superior a la real en un 5% de su valor nominal, los resultados de la simulación de la falla se muestran en la **Figura B.6.9**, **Figura B.6.10** y **Figura B.6.11**

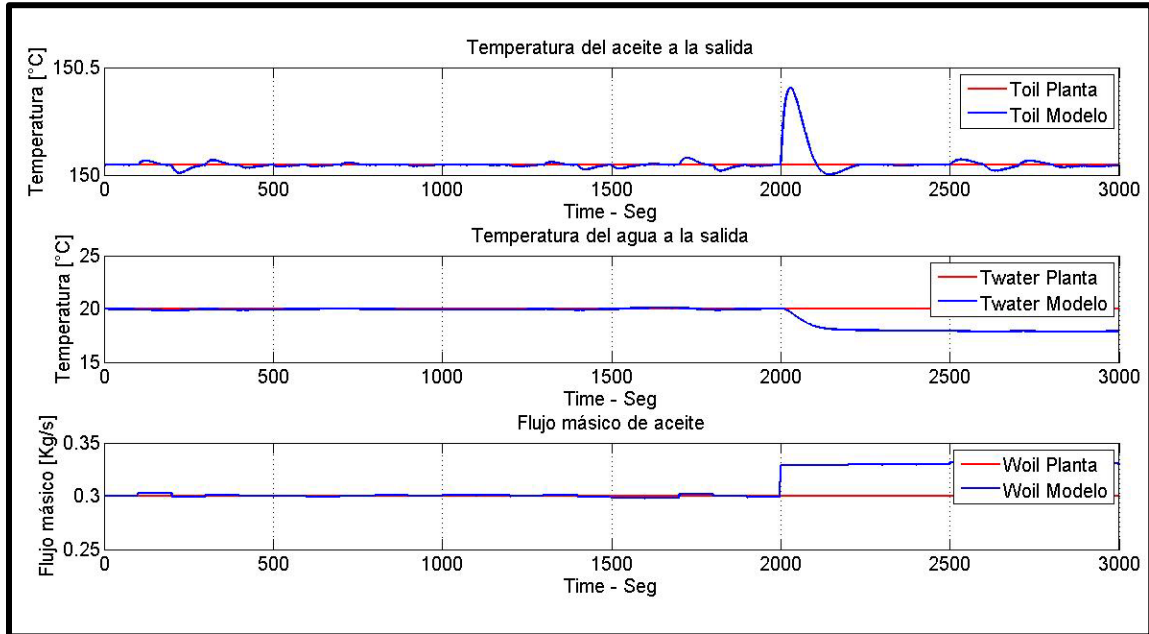


Figura B.6.9 - Comparación de las señales de salida del intercambiador de calor ante una falla de lectura superior a la real en el sensor de flujo de aceite a la entrada del modelo de referencia.

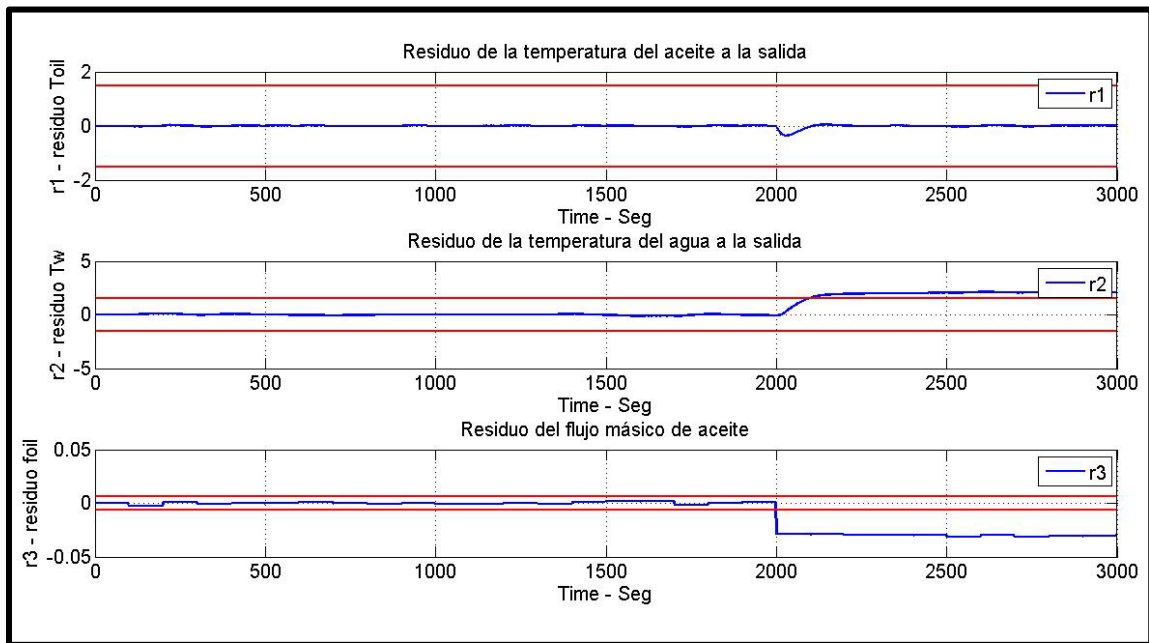


Figura B.6.10 - Comparación de los residuos generados ante una falla de lectura superior a la real en el sensor de flujo de aceite a la entrada del tubo interno del intercambiador de calor.

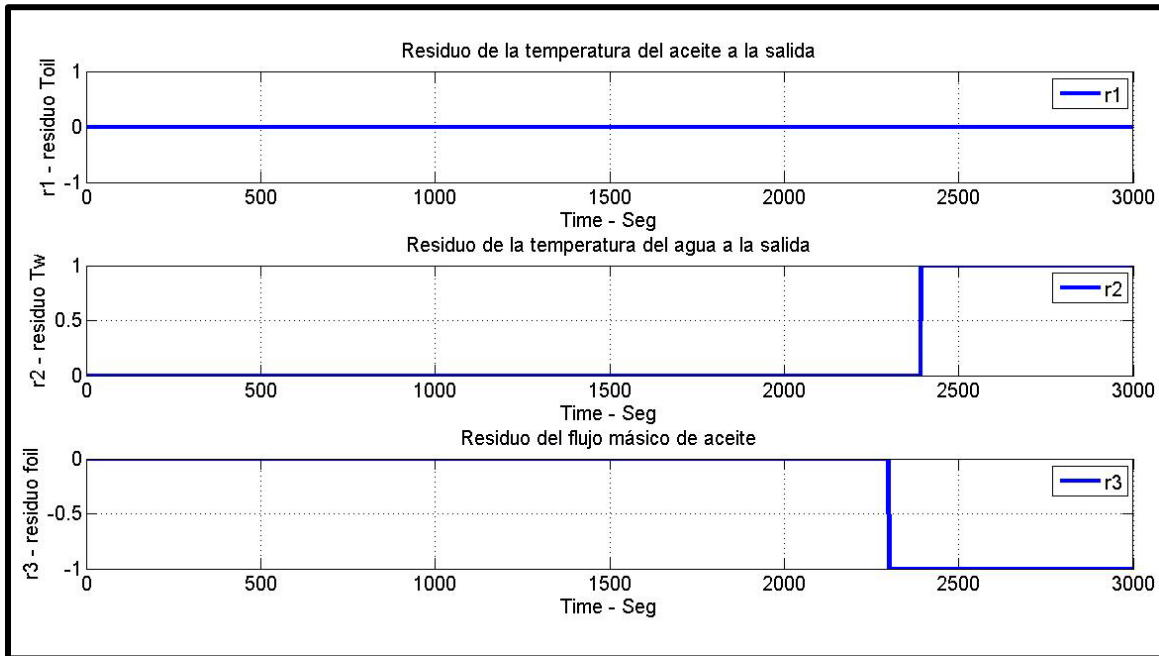


Figura B.6.11 - Residuos filtrados por el umbral, generados debido a una falla de lectura superior a la real, en el sensor de flujo de aceite a la entrada del tubo interno del intercambiador de calor.

B.4 - Falla en el sensor de flujo de aceite a la entrada (lectura inferior a la real)

Esta falla se simula exactamente de la misma forma que la falla anterior solo que en lugar de añadir un valor positivo a la señal que viene del sensor de flujo a la entrada del aceite, se le añade un valor negativo, de la misma magnitud que la falla anterior lo que implica una lectura 2% menor a la real, la falla se simula al igual que la anterior a los 2000 segundos, los resultados para esta falla se muestran en las **Figura B.6.12**, **Figura B.6.13** y **Figura B.6.14**

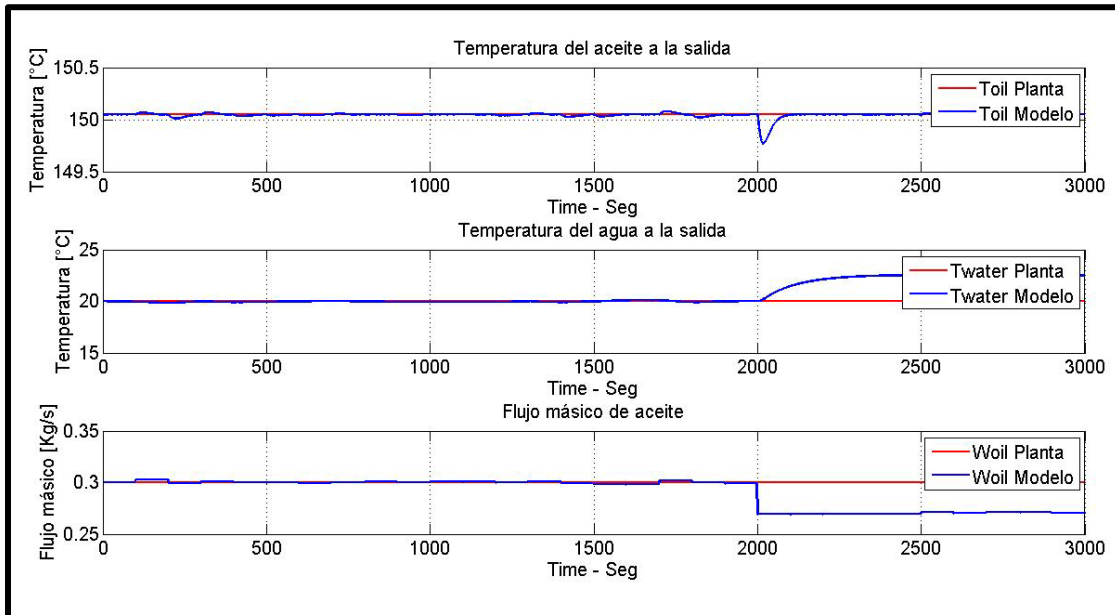


Figura B.6.12 - Comparación de las señales de salida del intercambiador de calor ante una falla de lectura inferior a la real en el sensor de flujo de aceite a la entrada del modelo de referencia.

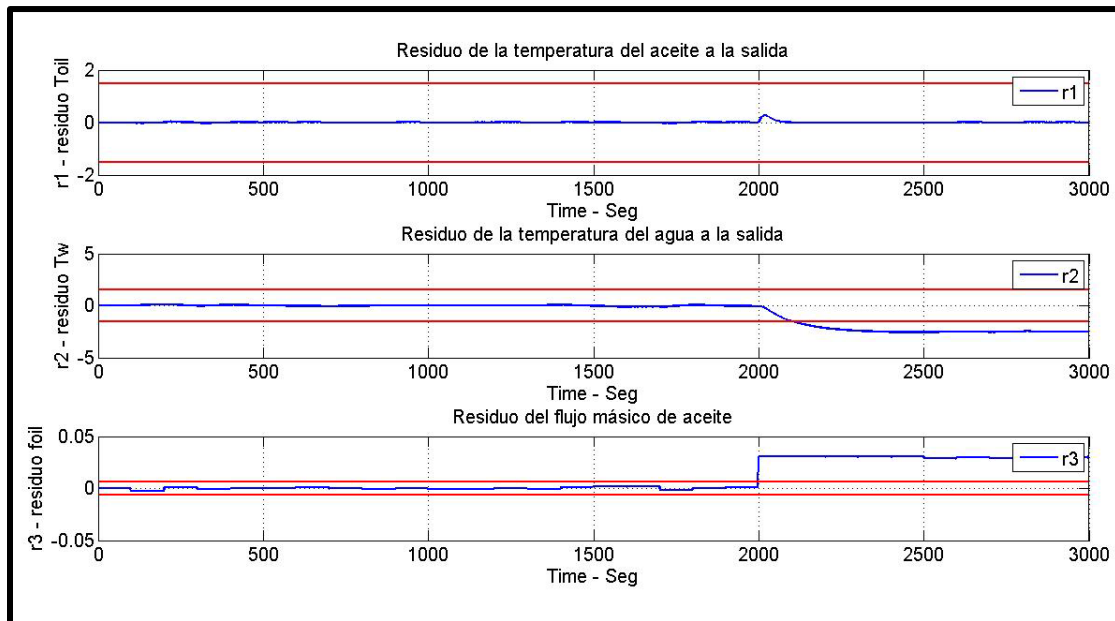


Figura B.6.13 - Comparación de los residuos generados ante una falla de lectura inferior a la real en el sensor de flujo de aceite a la entrada del modelo de referencia.

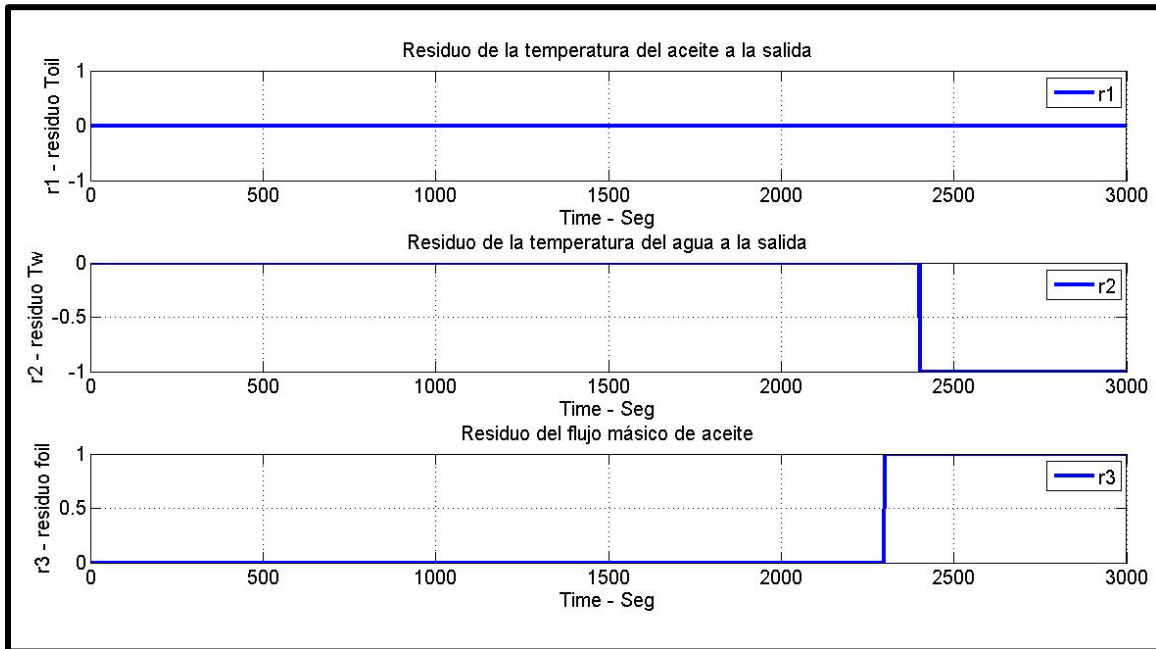


Figura B.6.14 - Residuos filtrados por el umbral, generados ante una falla de lectura inferior a la real, en el sensor de flujo de aceite a la entrada del tubo interno del intercambiador de calor.

B.5 - Falla en el sensor temperatura del agua a la entrada del intercambiador (lectura superior a la real)

La falla en el sensor de temperatura del agua, al igual que la falla en el sensor de flujo de aceite se simula como una falla aditiva en donde se le añade una perturbación positiva a la señal que vienen del sensor de temperatura del agua a la entrada del intercambiador de calor, la simulación de la falla se realiza a los 2000 segundos, el valor positivo que se añade a la temperatura es de 3°C, lo que significa que el sensor de temperatura está registrando una temperatura de 3°C mayor que la real, los resultados de la simulación de la falla se pueden ver en las **Figura B.6.15.**, **Figura B.6.16** y **Figura B.6.17**

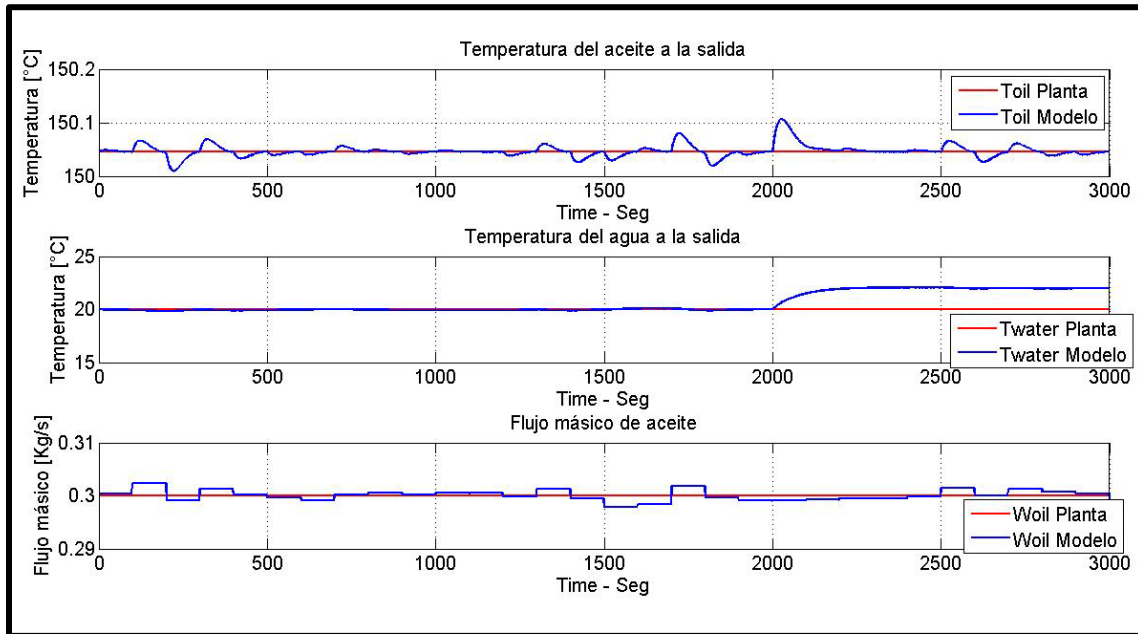


Figura B.6.15 - Comparación de las señales de salida del intercambiador de calor ante una falla de lectura superior a la real en el sensor de temperatura del agua a la entrada

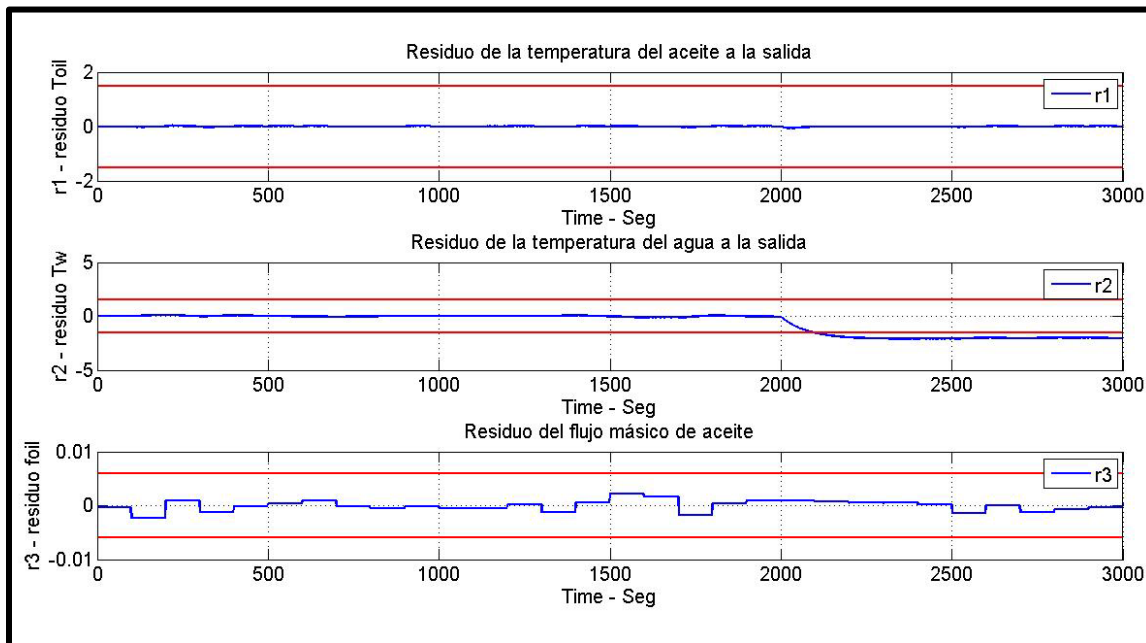


Figura B.6.16 - Comparación de los residuos generados ante una falla de lectura superior a la real en el sensor de temperatura del agua a la entrada

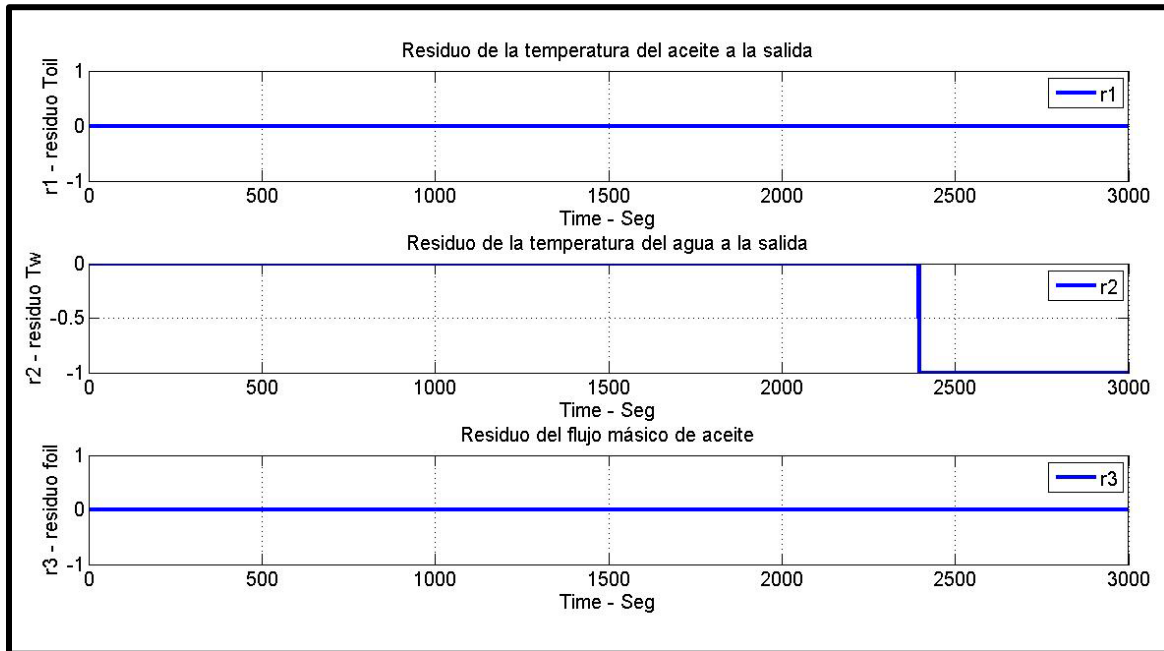


Figura B.6.17 - Residuos filtrados por el umbral, generados ante una falla de lectura superior a la real, en el sensor de temperatura de agua a la entrada del tubo externo del intercambiador de calor

B.6 - Falla en el sensor temperatura del agua a la entrada del intercambiador (lectura inferior a la real)

La simulación de esta falla es igual a la anterior solo con sentido contrario es decir, la falla se simula añadiendo un valor negativo a la señal del sensor de temperatura del agua a la entrada del tubo externo, lo que se interpreta como que el sensor de temperatura de agua a la entrada está leyendo una temperatura 3°C menor al valore real, la falla se simula a los 2000 segundos de la simulación, los resultados de esta falla se muestran en las **Figura B.6.18.**, **Figura B.6.19** y **Figura B.6.20**

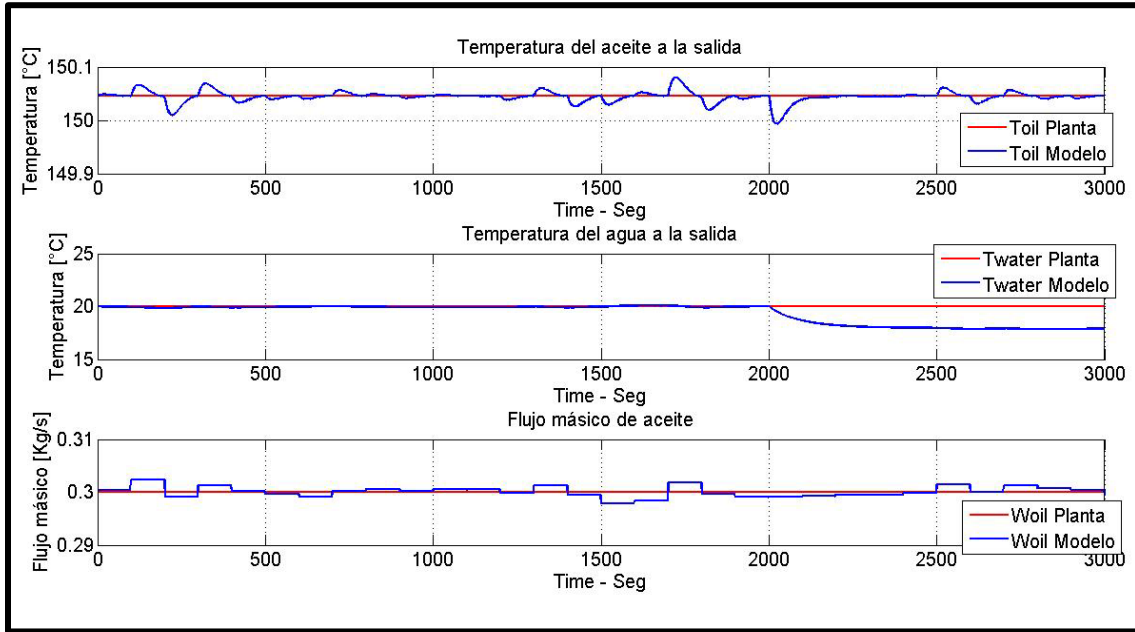


Figura B.6.18 - Comparación de las señales de salida del intercambiador de calor ante una falla de lectura inferior a la real en el sensor de temperatura del agua a la entrada

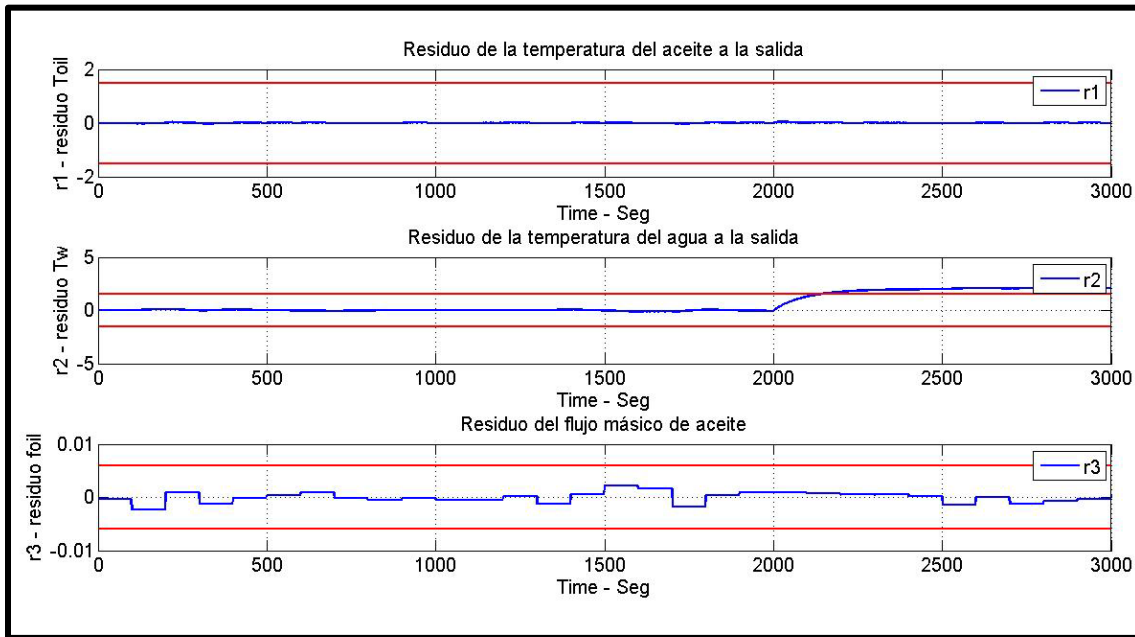


Figura B.6.19 - Comparación de los residuos generados ante una falla de lectura inferior a la real en el sensor de temperatura del agua a la entrada

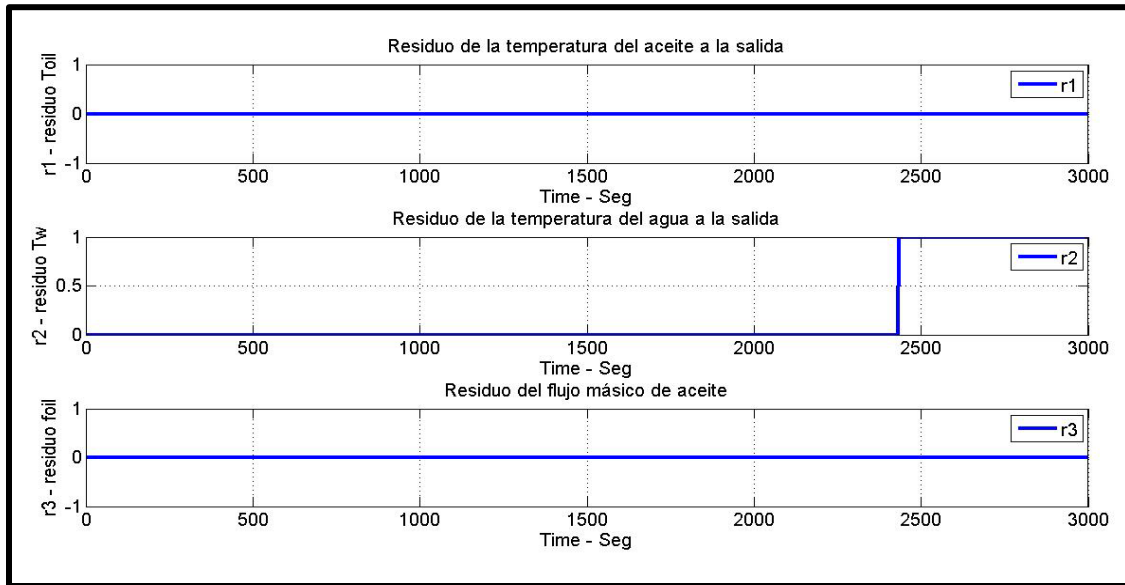


Figura B.6.20 - Residuos filtrados por el umbral, generados debido a una falla de lectura inferior a la real, en el sensor de temperatura de agua a la entrada del tubo externo.

B.7 - Falla en el sensor temperatura del aceite a la entrada del intercambiador (lectura superior a la real)

La falla en el sensor de temperatura del aceite se simula de la misma forma que la de en sensor de temperatura del agua, los resultados se muestran en las **Figura B.6.21**, **Figura B.6.22** y **Figura B.6.23**

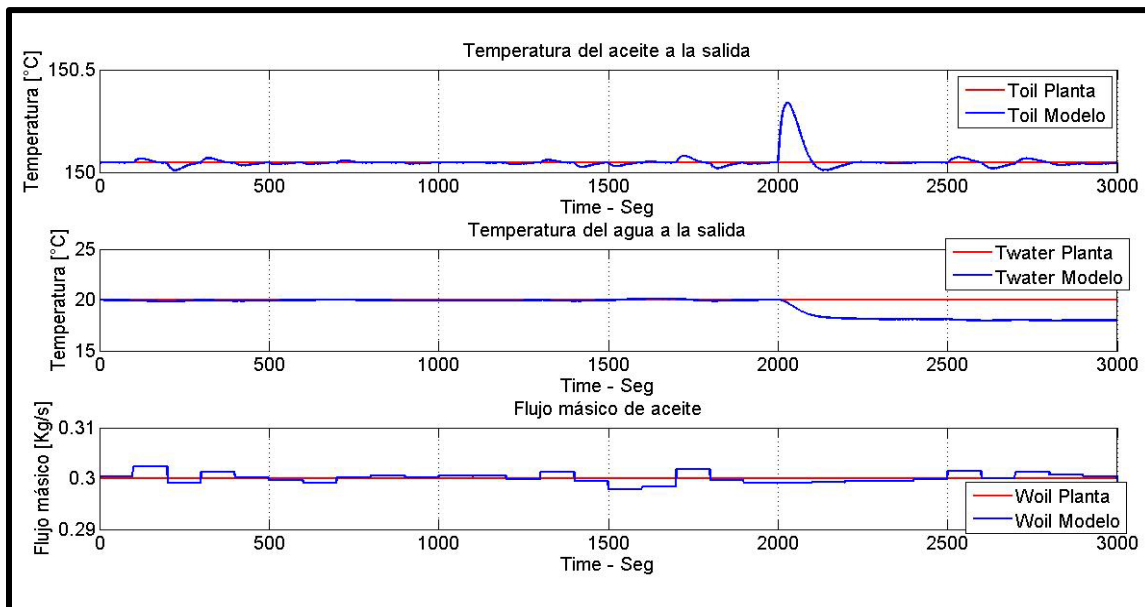


Figura B.6.21 - Comparación de las señales de salida del intercambiador de calor ante una falla de lectura superior a la real en el sensor de temperatura del aceite a la entrada.

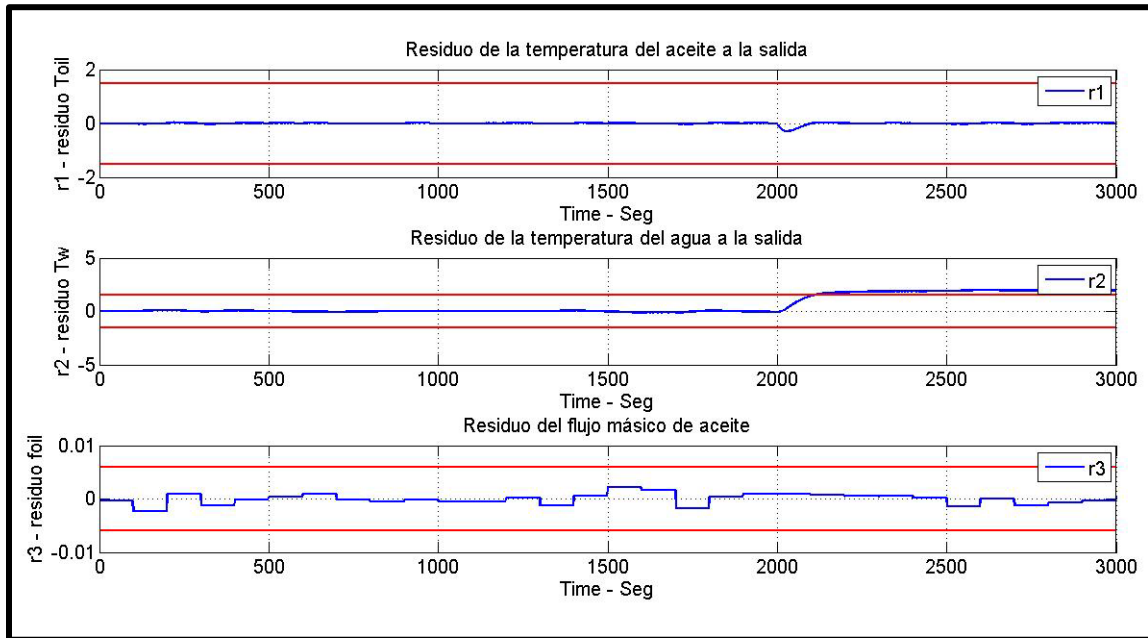


Figura B.6.22 - Comparación de los residuos generados ante una falla de lectura superior a la real en el sensor de temperatura del aceite a la entrada.

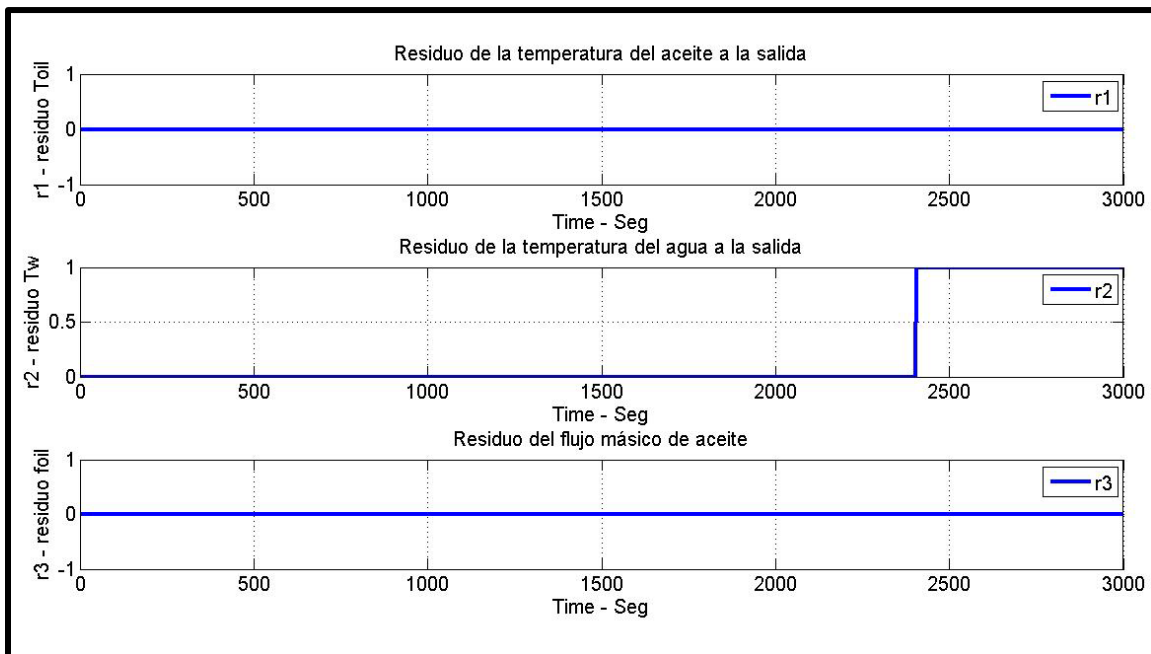


Figura B.6.23 - Residuos filtrados por el umbral, generados debido a una falla de lectura superior a la real, en el sensor de temperatura de aceite a la entrada del tubo interno

B.8 - Falla en el sensor temperatura del aceite a la entrada del intercambiador (lectura inferior a la real)

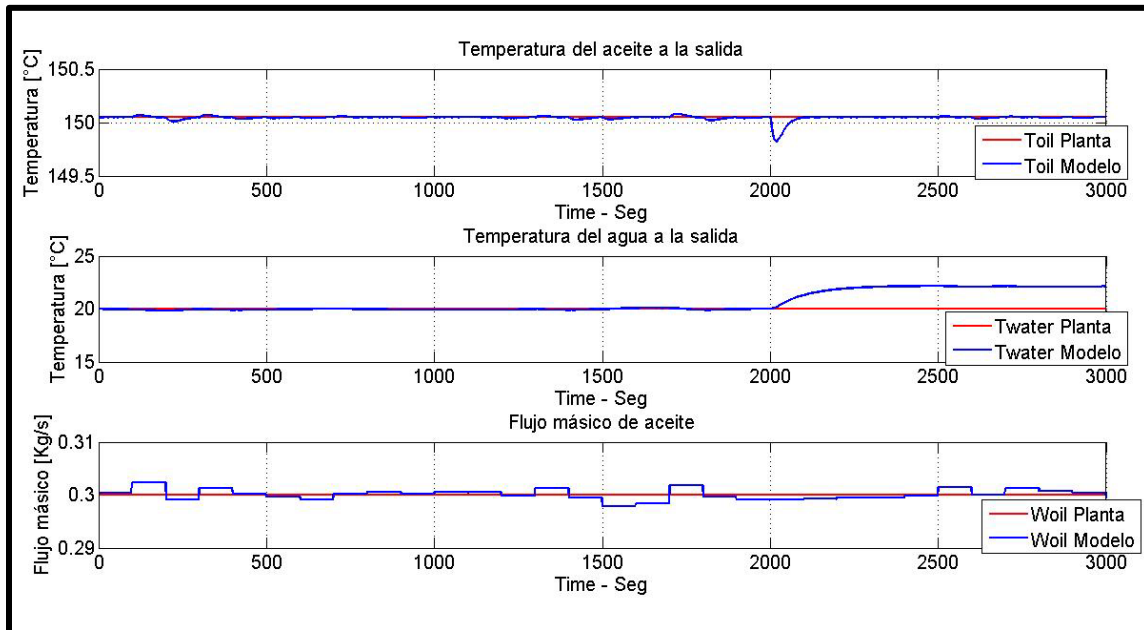


Figura B.6.24 - Comparación de las señales de salida del intercambiador de calor ante una falla de lectura inferior a la real en el sensor de temperatura del aceite a la entrada

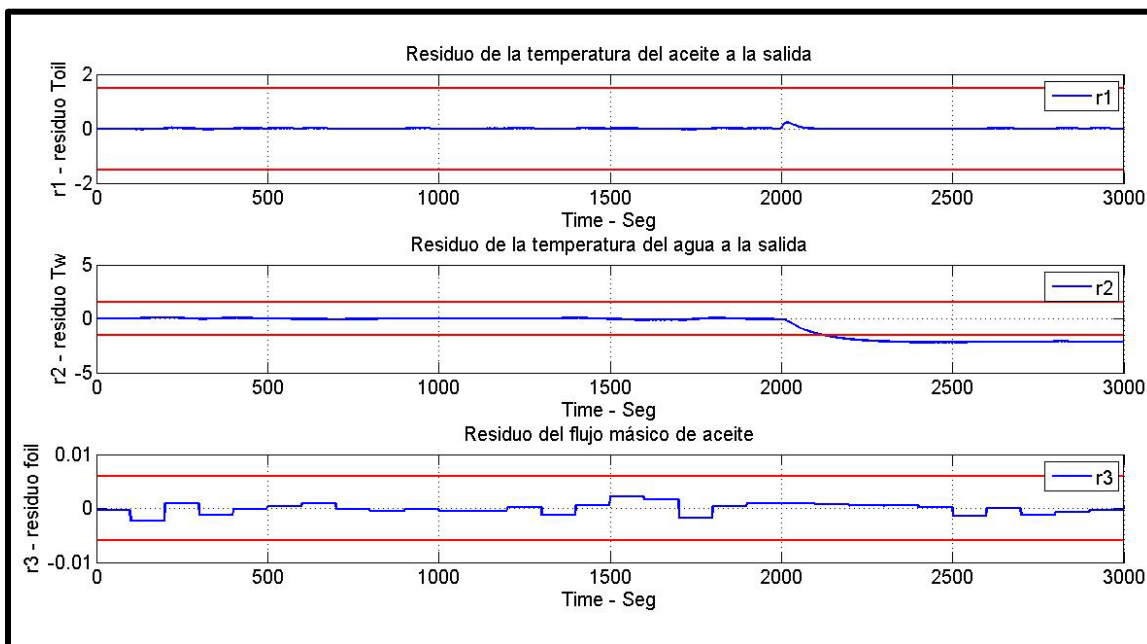


Figura B.6.25 - Comparación de los residuos generados ante una falla de lectura inferior a la real en el sensor de temperatura del aceite a la entrada

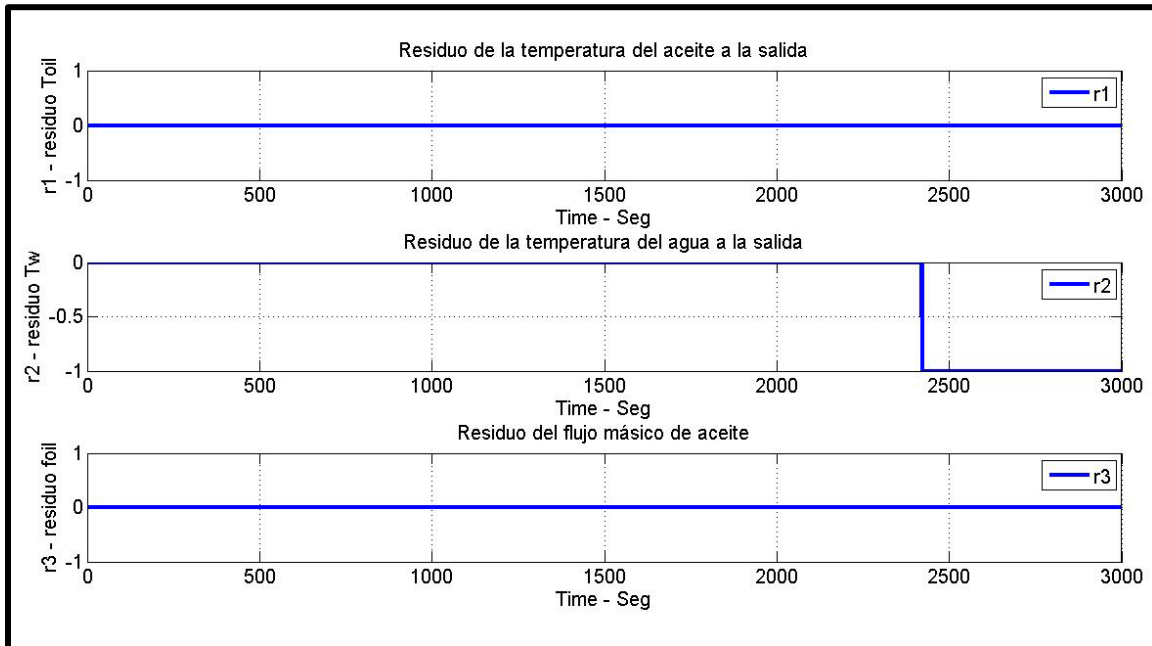


Figura B.6.26 - Residuos filtrados por el umbral, generados debido a una falla de lectura inferior a la real, en el sensor de temperatura de aceite a la entrada del tubo interno.

B.9 - Falla de ensuciamiento en la pared del tubo interno del intercambiador de calor.

La siguiente falla se realiza bajo condiciones semejantes a las fallas anteriores descritas previamente. La falla se induce en el coeficiente global de transferencia de calor, se simula un ensuciamiento de la pared del tubo interno con lo cual se ve afectada la transferencia de calor, dicha falla se introduce en la simulación como un factor de ensuciamiento caracterizado con una señal rampa con una pendiente de 2.79×10^{-11} iniciando a partir de un ensuciamiento equivalente a un periodo de 190 días (aproximadamente 6 meses), la simulación de esta falla tiene una duración de 86400 segundos, equivalente a 1 día de operación, es decir aproximadamente un día, los resultados pueden verse en las gráficas de las **Figura B.6.27**, **Figura B.6.28** y **Figura B.6.29**.

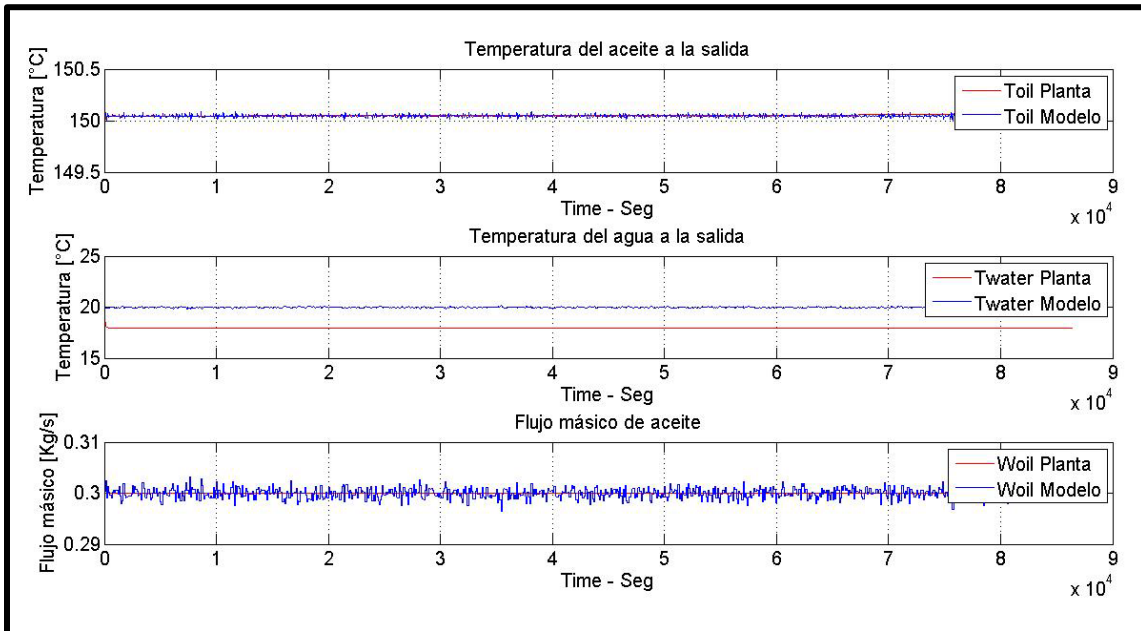


Figura B.6.27 - Comparación de las señales de salida del intercambiador de calor ante una falla por ensuciamiento en la pared del tubo interno del intercambiador de calor

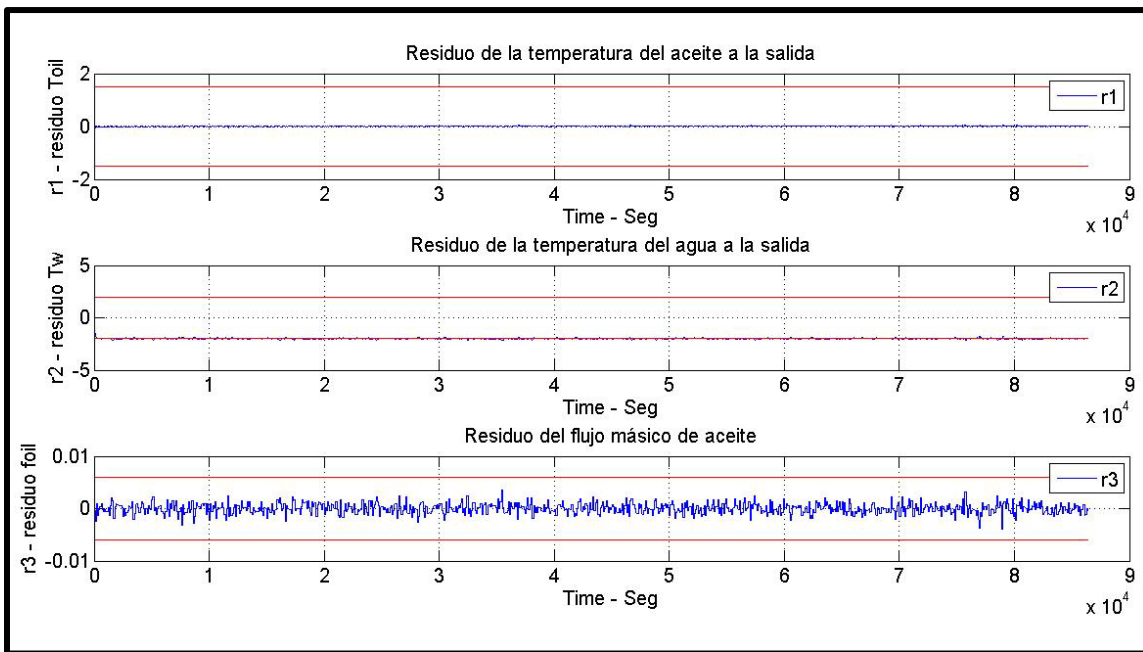


Figura B.6.28 - Comparación de las señales de salida del intercambiador de calor ante una falla por ensuciamiento en la pared del tubo interno del intercambiador de calor

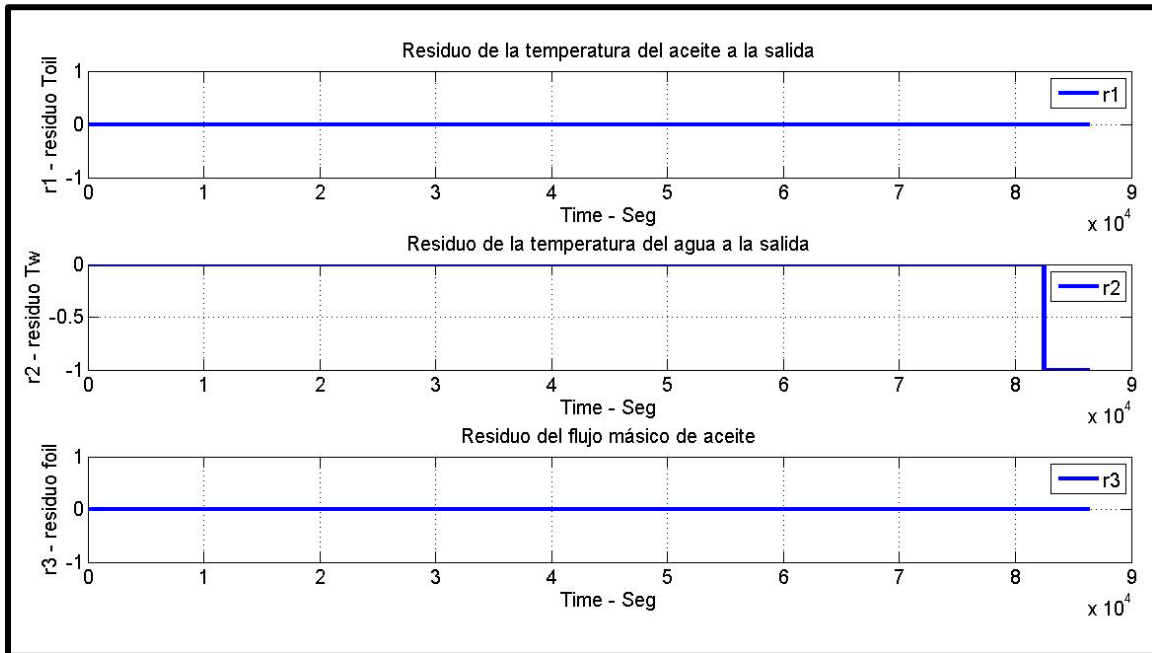


Figura B.6.29 - Residuos filtrados por el umbral, generados debido a una falla de ensuciamiento en las paredes externa e interna del tubo interno.

c) Apéndice C - Construcción de los árboles de fallas

Para el desarrollo de los árboles de fallas el conjunto de hipótesis de fallas se obtiene de la propagación de la falla mediante las relaciones causales (causa-efecto) establecidas en la **Tabla 4-8**. La variable fallada se localiza primero en la lista de consecuencias y se le asigna un valor cualitativo ([+], 0 o [-]). La propagación hacia atrás se realiza al asignar valores cualitativos a los correspondientes antecedentes. Por ejemplo, si una variable e_1 supera el umbral inferior (-1) y sus antecedentes son e_2 , $-e_3$; entonces e_2 debe de ser asignado un valor cualitativamente negativo ($[-][e_2]=[e_2^-]$, indicativo de inferior a lo normal) y a e_3 se le debe de asignar un valor cualitativo ($[-][-e_3]=[e_3^+]$, indicativo de superior a lo normal). Posteriormente estos nuevos antecedentes son buscados en la lista como consecuencias y se hace lo mismo para sus correspondientes antecedentes.

Una estructura en forma de árbol se desarrolla de continuar el método mencionado anteriormente, la cual culmina en vértices, dónde ya sea que los

parámetros son detectados como antecedentes, existen variables las cuales no tengan antecedentes (entradas al sistema) o el valor cualitativo de un antecedente esté en conflicto con un valor previo.

Consideremos un sistema hidráulico de dos tanques y su modelo en pseudo-Bond-Graph [31]. En el modelo en Bond-Graph, la presión es la variable de esfuerzo y el flujo másico se toma como la variable de flujo. Una bomba alimenta flujo Q_p a un tanque T_1 . El flujo del tanque T_1 al tanque T_2 se regula a través de una válvula V_b . Finalmente, el fluido es descargado a la atmosfera a través de la válvula V_o . Hay dos sensores de presión, P_1 y P_2 en los dos tanques. Asumimos que las tuberías están conectadas en el fondo de los tanques.

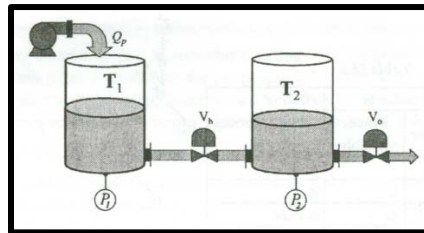


Figura 6.30 - Diagrama de un sistema de dos tanques acoplados

La presión producida en el fondo de los tanques se debe al almacenamiento de fluido. Por lo tanto, la capacidad de los tanques está dada por $C_{Ti} = A_i/g$, donde $i = 1,2$ y A se refiere al área de la sección transversal. Los antecedentes y consecuentes para este modelo están dados en la **Tabla 6-1**.

Consideremos un caso donde el nivel observado en T_1 es más alto de lo nominal mientras el nivel en T_2 es nominal, es decir, P_1^+ y P_2^0 . Empezamos propagando la falla es decir P_1^+ , y construimos el árbol de fallas mostrado en la **Figura 6.31**. Para construir el árbol de fallas empezamos encontrando la variable P_1 en la columna de consecuencias de la **Tabla 6-1** y encontrar el antecedente e_4 . Posteriormente usando e_4 como consecuencia buscamos su respectivo antecedente e_2 y así se continúa.

En el árbol de fallas los valores cualitativos se denotan usando '+' para más alto de lo normal y '-' para más bajo de lo normal. Los nodos que tienen conflicto se

representan con una cruz $[x]$ cerca de ellos. El conjunto de candidatos de falla inicial es C_{T1}^- , Q_P^+ , R_{Vb}^+ , C_{T2}^- , R_{V0}^+ , y P_0^+ . Dado que estamos trabajando con hipótesis de una sola falla, entre todos esos candidatos de fallas cualquier parámetro podría ser la causa de la falla.

Tabla 6-1 - Antecedentes y consecuentes del sistema de dos tanques

No	Antecedentes		Consecuentes
	Parámetros	VARIABLES de potencia	
1	Q_P		f_1
2	$1/C_{T1}$	f_2	e_2
3		e_2	e_1, e_3, e_4
4		e_4	P_1
5		$f_1, -f_3$	f_2
6	$1/R_{Vb}$	e_5	f_5
7		$e_3, -e_6$	e_5
8		f_5	f_3, f_6
9	$1/C_{T2}$	f_7	e_7
10		e_7	e_6, e_8, e_9
11		e_9	P_2
12		$f_6, -f_8$	f_7
13	$1/R_{V0}$	e_{10}	f_{10}
14		f_{10}	f_8, f_{11}
15		$e_8, -e_{11}$	e_{10}
16	P_0		e_{11}

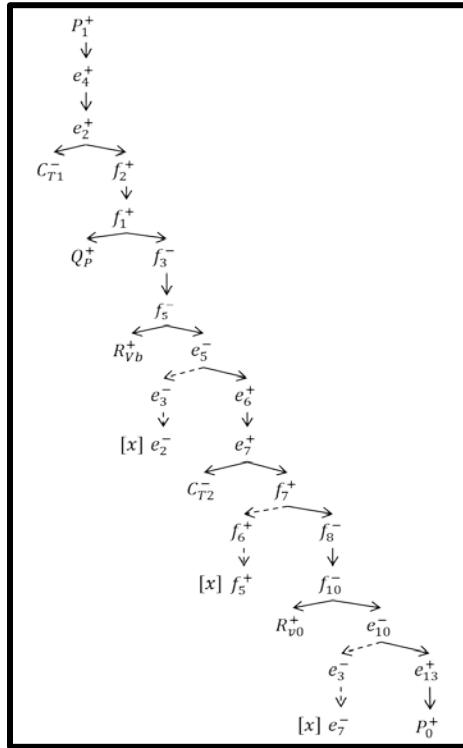


Figura 6.31 - Árbol de fallas inicial para dos tanques

Ahora bien, restricciones pueden ser agregadas al árbol o sugerencias para mediciones cualitativas para que la variable más apropiada pueda ser elegida. Tenemos el estado cualitativo P_2 , que es normal. Al mirar la **Tabla 6-1**, e_7 debe de ser normal, entonces parece haber un conflicto en el nodo para e_7^+ . Entonces el árbol puede ser reconstruido después de la resolución del conflicto y representado finalmente como se muestra en la **Figura 6.32**.

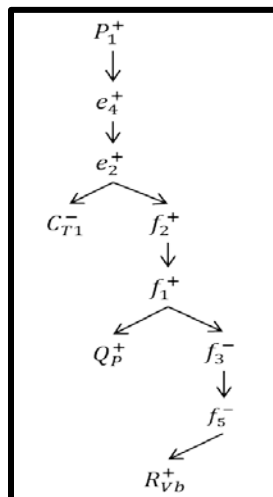


Figura 6.32 - Árbol de fallas final del sistema de dos tanques

Del árbol de fallas final, tres candidatos se obtienen: C_{T1}^- , Q_P^+ y R_{Vb}^+ , cuando se tiene una hipótesis de falla individual, es decir considerando que no puedan existir múltiples fallas al mismo tiempo, solo uno de ellos pueden considerarse como el causante de falla, es decir solo una a la vez.

Para discernir entre los candidatos de falla puede aplicarse un razonamiento cualitativo como uno entre otros métodos, usando información sobre la probabilidad de que ocurra una falla, descartando fallas que no estén consideradas dentro los parámetros que puedan fallar. Por ejemplo, la falla C_{T1}^- corresponde a un decremento en la capacitancia del primero tanque, lo cual es posible si algo callera dentro del tanque. Considerando que hay tapas con pequeños agujeros para que el aire fluya en cada tanque, esta posibilidad es descartada. De forma similar, si la bomba es controlada para entregar un flujo fijo y el sistema de control es robusto, o el flujo de salida de la bomba es medido, entonces la falla en la bomba puede ser descartada. Esto deja con un candidato de falla aislado, R_{Vb}^+ , lo cual corresponde a un bloqueo de la válvula entre los dos tanques.