

**“HERRAMIENTAS DE DETECCIÓN DE FALLAS Y
AISLAMIENTO EN ENTORNOS INDUSTRIALES”**

CHRISTIAN TRIVIÑO BERNATE
FREDDY SARMIENTO ALTAMAR

Monografía de Grado presentada como requisito para optar el Título de
Ingeniero Electrónico

Minor Automatización Industrial

Director
José Luís Villa Ramírez
Ph.D Ingeniería y Control Automático

UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE BOLÍVAR

CARTAGENA, JUNIO 2007

Nota de aceptación

Jurado

Jurado

Cartagena D..T. Y C., Junio de 2007

Señores

COMITÉ CURRICULAR

UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE BOLÍVAR

La ciudad

Respetados señores:

Con toda la atención me dirijo a ustedes con el fin de presentarles a su consideración, estudio y aprobación la monografía titulada “**HERRAMIENTAS DE DETECCIÓN DE FALLAS Y AISLAMIENTO EN ENTORNOS INDUSTRIALES**”, como requisito para obtener el título de Ingeniero Electrónico

Atentamente,

CHRISTIAN TRIVIÑO BERNATE

Cartagena D..T. Y C., Junio de 2007

Señores

COMITÉ CURRICULAR

UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE BOLÍVAR

La ciudad

Respetados señores:

Con toda la atención me dirijo a ustedes con el fin de presentarles a su consideración, estudio y aprobación la monografía titulada “**HERRAMIENTAS DE DETECCIÓN DE FALLAS Y AISLAMIENTO EN ENTORNOS INDUSTRIALES**”, como requisito para obtener el título de Ingeniero Electrónico

Atentamente,

FREDDY SARMIENTO ALTAMAR

Cartagena D..T. Y C., Junio de 2007

Señores

COMITÉ CURRICULAR

UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE BOLÍVAR

La ciudad

Respetados señores:

A través de la presente me permito entregar la monografía titulada **“HERRAMIENTAS DE DETECCIÓN DE FALLAS Y AISLAMIENTO EN ENTORNOS INDUSTRIALES”**, para su estudio y evaluación, la cual fue realizada por los estudiantes CHRISTIAN TRIVIÑO BERNATE y FREDDY SARMIENTO ALTAMAR, de la cual acepto ser su director.

Atentamente,

ING. JOSÉ LUIS VILLA RAMÍREZ
Ph.D Ingeniería y Control Automático

AUTORIZACIÓN

Yo, CHRISTIAN GIOVANNY TRIVIÑO BERNATE, identificado con la cedula de ciudadanía numero 73.008.543 de Cartagena, autorizo a la Universidad Tecnológica De Bolívar, para hacer uso de mi trabajo de monografía y publicarlo en el catalogo on-line de la biblioteca.

CHRISTIAN GIOVANNY TRIVIÑO BERNATE

AUTORIZACIÓN

Yo, FREDDY ENRIQUE SARMIENTO ALTAMAR, identificado con la cedula de ciudadanía numero 8.646.479 de Sabanalarga - Atlántico, autorizo a la Universidad Tecnológica De Bolívar, para hacer uso de mi trabajo de monografía y publicarlo en el catalogo on-line de la biblioteca.

FREDDY ENRIQUE SARMIENTO ALTAMAR

ÍNDICE

	Pág.
I. INTRODUCCIÓN	4
II. METODOLOGÍA DE IMPLEMENTACIÓN DE LOS SISTEMAS DE DETECCIÓN Y DIAGNÓSTICO DE FALLAS	8
1. Introducción	8
2. PASOS DE LA METODOLOGÍA DE IMPLEMENTACIÓN	10
2.a. <i>CÁLCULO DE RIESGO PARA LAS PLANTAS DENTRO DEL COMPLEJO INDUSTRIAL</i>	10
2.b. <i>JERARQUIZACIÓN DE LAS PLANTAS</i>	12
2.c. <i>CÁLCULO DE CRITICIDAD PARA LAS PLANTAS DEL COMPLEJO INDUSTRIAL</i>	12
2.d. <i>SELECCIÓN DE EQUIPOS QUE REQUIEREN SISTEMA DE DETECCIÓN Y DIAGNÓSTICO DE FALLAS.</i>	13
2.e. <i>EXISTENCIA DE PROBLEMAS RECURRENTE O DE IMPACTO</i>	13
2.f. <i>DETERMINACIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS DINÁMICAS DEL PROCESO E IDENTIFICACIÓN DE SEÑALES</i>	14
2.g. <i>CLASIFICACIÓN DE LA METODOLOGÍA O TECNOLOGÍA A SER IMPLANTADA</i>	14
2.h. <i>ANÁLISIS COSTO BENEFICIO RIESGO</i>	15
2.i. <i>IMPLANTAR SDDF, ANÁLISIS DE RESULTADOS, Y DOCUMENTAR</i>	15
3. RESUMEN DE LA METODOLOGÍA	16
4. EJEMPLO DE APLICACIÓN	18
III. EL PROBLEMA DE DETECCIÓN Y DIAGNÓSTICO DE FALLAS	21
5. Introducción	21
6. ESTRUCTURA DE UN SISTEMA DE DIAGNÓSTICO	24
7. ANÁLISIS CUALITATIVO DE FALLAS EN UN SISTEMA	25
7.1. <i>MODELO DEL PROCESO</i>	25
7.2. <i>PARÁMETROS DEL MODELO DEL TANQUE</i>	26
7.3. <i>TIPOS DE FALLAS</i>	26
7.4. <i>COMPORTAMIENTO DEL SISTEMA EN AUSENCIA DE FALLAS</i>	27

8.	ANÁLISIS DE FALLAS DEL SISTEMA EN LAZO ABIERTO	28
8.1.	FALLA DE LA BOMBA	29
8.2.	RESPUESTA DE LA VARIABLE DE PROCESO - FALLA EN LA BOMBA (L.A.)	30
8.3.	FALLA EN EL TANQUE	31
8.3.1	RUPTURA EN EL TANQUE	32
8.3.2.	TAPONAMIENTO EN EL TANQUE	32
8.4.	COMPORTAMIENTO DEL NIVEL ANTE UNA FALLA EN EL TANQUE	33
8.5.	FALLA EN EL SENSOR	34
8.6.	COMPORTAMIENTO DEL NIVEL ANTE UNA FALLA EN EL SENSOR	35
9.	ESTUDIO DEL SISTEMA EN LAZO CERRADO	36
10.	MODELO DE LA SIMULACIÓN LAZO CERRADO (L.C.)	37
11.	COMPORTAMIENTO DEL NIVEL ANTE UNA FALLA	38
11.1	FALLA EN LA BOMBA	38
11.2	FALLA EN EL TANQUE	39
11.3	FALLA EN EL SENSOR	41
11.4	TODAS LAS FALLAS EN EL PROCESO EN LAZO CERRADO	42
12.	METODOLOGÍAS	43
12.1	DETECCIÓN DE FALLOS BASADO EN MODELOS	45
12.2	DIAGNÓSTICO BASADO EN ESTADÍSTICA	46
12.3	DIAGNÓSTICO DISCRETO BASADO EN MODELOS	48
12.4	DIAGNÓSTICO BASADO EN INTELIGENCIA ARTIFICIAL	49
IV.	EL IMPACTO ECONÓMICO EN LAS EMPRESAS, DEBIDO AL NO USO DE SISTEMAS CONFIABLES DE DETECCIÓN DE FALLAS	
13.	Introducción	50
14	PERSPECTIVAS INDUSTRIALES	52
V.	CONCLUSIONES	54
VI.	PERSPECTIVAS Y TRABAJOS FUTUROS	56
VII	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	57

I. INTRODUCCIÓN

En la actualidad, el manejo de la seguridad en los procesos industriales, exige buscar mecanismos con altos niveles de confiabilidad, por esto, se ha incrementado la necesidad de implementar sistemas que nos ayuden a detectar y aislar fallas que ocurran durante el desarrollo del proceso. Ésto con el fin de determinar más precisamente cuales son las acciones correctivas a tomar, evitar su propagación y si es posible, aislar la falla en forma automática.

En la mayoría de los procesos industriales se producen paradas de planta no programadas, debido a las fallas en los equipos que conforman el sistema de automatización (sensores, transmisores, actuadores), trayendo como consecuencia pérdidas en la producción convirtiéndose en un problema económico para la empresa. Anualmente, en los Estados Unidos este tipo de situaciones anormales en las industrias petroquímicas le generan unas pérdidas de al menos \$10 billones de dólares, estas pérdidas se pueden reducir empleando diversas técnicas para la detección de fallas. (Basado en informes de Honeywell-led ASM Consortium)

Existen ciertos criterios para evaluar la eficiencia de las distintas técnicas de detección de fallas, en función de elegir la más adecuada para resolver un problema en particular. Las más importantes son:

1. Rapidez de la detección
2. Sensibilidad frente a fallas incipientes
3. Falsas alarmas por unidad de tiempo
4. Fallas que no se detectan (omitidas)
5. Identificación incorrecta de fallas

Un método utilizado tradicionalmente en detección de fallas (DEF) consiste en la utilización de componentes físicos redundantes que cumplan idénticas funciones. Mediante el empleo de actuadores, sensores y componentes repetidos, distribuidos espacialmente en toda la planta, se garantiza una cierta protección en presencia de una falla localizada. Otras técnicas de desarrollo más recientes eliminan la necesidad de la redundancia física, basándose en el hecho de que señales de naturaleza diferente, procedentes de distintos sensores pueden emplearse en un esquema de comparación, estableciendo entre ellas relaciones funcionales.

En general, no es posible disponer de un modelo perfectamente preciso y completo de un sistema físico. Es usual que los parámetros del mismo varíen con el tiempo de manera incierta, y la característica de las perturbaciones (entradas desconocidas) y el ruido de medición no pueden modelarse con exactitud. En consecuencia, siempre habrá una diferencia entre el proceso real y su modelo, aún en ausencia de fallas. Estas discrepancias provocan dificultades metodológicas en las aplicaciones de la detección de fallas, siendo la fuente de falsas alarmas y de alarmas omitidas que degradan el desempeño del sistema de detección y aislamiento. Para evitar estos inconvenientes, éste debe hacerse robusto, o sea insensible y hasta invariante frente a incertidumbres de modelado. A veces, sin embargo, esta reducción de la sensibilidad frente a perturbaciones trae aparejada una disminución de sensibilidad a las fallas.

Otra de las soluciones a los problemas de la seguridad en los procesos industriales y la reducción en las pérdidas económicas que sufre la empresa, es la implantación de sistemas que detecten y diagnostiquen fallas en los elementos que actúan en el proceso.

Esto trae consigo la necesidad de diseñar una metodología en los mantenimientos de equipos que sean críticos para el proceso, permitiendo de esta manera establecer los requerimientos necesarios como base para el análisis de los mismos, con el fin de fijar prioridades en sistemas complejos.

Este requerimiento se basa principalmente en herramientas y técnicas de confiabilidad, como es el caso del cálculo de riesgo para las plantas del sistema, así como también el cálculo de criticidad de equipos, entre otros.

En un sistema de control, para lograr un análisis completo del fallo, se deben realizar ciertos procedimientos de diagnóstico con el fin de no sólo detectar el fallo y a su vez aislarlo del sistema sino también conocer la magnitud que representa éste para la empresa. Por lo tanto, el diagnóstico del fallo se puede dividir en tres etapas según su profundidad: detección del fallo, aislamiento del fallo, identificación y estimación del fallo.

El objetivo principal de este trabajo es el de realizar un estudio inicial de los diferentes modelos que existen en la actualidad para la detección y aislamiento de fallas en los entornos industriales, de tal forma que sirva como base para otros estudios sobre el tema.

Este trabajo está dividido principalmente en 3 secciones fundamentales.

La primera parte (sección II), presenta una metodología que permite evaluar la necesidad o no de la implantación de sistemas de detección de fallos y aislamientos, con el fin de fijar prioridades en sistemas complejos y optimizar recursos (humanos, económicos y tecnológicos).

La segunda parte (sección III), muestra el problema y la estructura de un sistema de detección y diagnóstico de fallas, además se realiza un análisis cualitativo de las fallas. Asimismo, se empleará una tabla que reunirá las principales metodologías, cada una con sus respectivas citas bibliográficas, esto con el propósito de direccionar hacia la fuente principal y se realizará una breve descripción de dichas metodologías.

La tercera parte (sección IV), determina el impacto económico en las empresas, debido al no uso de sistemas confiables de detección de fallas en los elementos de mayor criticidad en el proceso y se caracteriza la perspectiva que se encuentra en los sistemas de Detección y Aislamiento de Fallos en entornos industriales.

II. METODOLOGÍA DE IMPLEMENTACIÓN DE LOS SISTEMAS DE DETECCIÓN Y DIAGNÓSTICO DE FALLAS

Esta sección trata la metodología de implantación para los sistemas de detección y diagnóstico de fallas, se realiza una explicación con respecto a una aplicación de un tanque, contextualizando esta metodología.

1. Introducción.

La complejidad de los procesos industriales y la exigencia de buscar mecanismos para mantener altos niveles de confiabilidad y seguridad, han creado la necesidad de producir sistemas que permitan en línea detectar y aislar fallas incipientes que ocurren durante la operación de los mismos.

La búsqueda de criterios para la implantación de los sistemas de detección y diagnóstico de fallas en los complejos industriales, ha creado la necesidad de diseñar una metodología que permitirá establecer los requerimientos necesarios como base para el análisis de los mismos, con el fin de fijar prioridades en sistemas complejos y optimizar recursos (humanos, económicos y tecnológicos). Este requerimiento se basa principalmente en herramientas y técnicas de confiabilidad como es el caso del cálculo de riesgo para las plantas del sistema, así como también el cálculo de criticidad de equipos, entre otros.

Antes de describir dichas herramientas y teorías se define a continuación los conceptos de falla, detección de fallas, diagnóstico de fallas y aislamiento de fallas.

- ✓ Falla: desviación no permitida de, al menos, una propiedad característica o parámetro de un sistema de su condición aceptable, usual o estándar. Un fallo es la aparición de un modo de fallo.

- ✓ Detección de fallas: determinación de la presencia de fallas en el sistema así como el instante de su aparición.

- ✓ Aislamiento de fallas: determinación del tipo, localización e instante de detección de una falla. Se realiza después de la etapa de detección.

- ✓ Diagnóstico de fallas: determinación del tipo, tamaño, localización e instante de aparición de una falla. Incluye la detección, el aislamiento y la estimación de la falla.

A continuación se presenta una posible metodología a seguir en la implantación de los sistemas de detección y diagnóstico de fallas. Igualmente se hace una descripción de cada uno de los pasos de dicha metodología

En concordancia con Aranguren [1], la cual en su “Estudio y Diseño de las Normas, Ingeniería, Metodologías y Tecnologías de los Sistemas de Detección y Diagnóstico de Fallas (SDDF), para los Elementos de los Sistemas de Automatización del Centro de Refinación Paraguaná (CRP), PDVSA”, plantea una metodología de 9 pasos (paso “2.a” hasta paso “2.i”) que se esboza a continuación.

2. PASOS DE LA METODOLOGÍA DE IMPLEMENTACIÓN

Esta metodología se encuentra dividida en 9 pasos, los cuales determinarán los equipos que se le va a aplicar los métodos de diagnóstico y detección de fallos. Los pasos son los siguientes:

2.a. CÁLCULO DE RIESGO PARA LAS PLANTAS DENTRO DEL COMPLEJO INDUSTRIAL.

El riesgo es una medida de las pérdidas económicas, daños ambientales o daños ocurridos a seres humanos, y está dado en términos de la probabilidad de ocurrencia de un evento no deseado (frecuencia) y la magnitud de la pérdida o daño (consecuencias).

Es decir,

Riesgo = f (Frecuencia, Consecuencia)

Y está definido como:

$$RIESGO = \sum_{i=1}^n P_{fi} * f_{fi} * C_{fi}$$

Donde,

P_{fi} : es la probabilidad de falla del evento.

f_{fi} : es la frecuencia del evento.

C_{fi} : es el costo asociado a esa falla.

Supongamos que se necesita determinar el riesgo de cada una de plantas de un Complejo Industrial. Como explicamos anteriormente el riesgo está definido por la ecuación anterior donde,

P_{fi}: es la probabilidad de que ocurra una parada no programada en cada planta del Complejo Industrial, y esta dado por 1- R. Donde,

R: llamado confiabilidad. Representa la probabilidad que tiene un sistema para cumplir con su función de diseño durante un período especificado de tiempo (también se define como la probabilidad de cero fallas en un sistema). La Confiabilidad esta expresada de la siguiente manera (caso particular de Poisson):

$$R = e^{-\lambda t}$$

Donde

λ : es una constante que $\in [0, +\infty)$, y se define como la tasa de fallas del sistema, en nuestro caso representa la tasa de fallas de la planta (*i*).

$$\lambda = \frac{1}{TPPF}$$

TPPF: es el tiempo promedio para fallar y está dado como

$$TPPF = \frac{\sum_{i=1}^N TPF_i}{N}$$

Donde,

TPF: es el tiempo para fallar o tiempo en servicio de la planta i .

N: es el número de fallas de la planta i .

t: es el tiempo total del sistema.

f_{fi} : es la frecuencia de falla de la planta i .

C_{fi} : es el costo asociado a las pérdidas de oportunidades generado por la parada no programada de la planta i .

i : es un entero que va desde 1 hasta n .

2.b. JERARQUIZACIÓN DE LAS PLANTAS:

Una vez determinadas las pérdidas de oportunidad que producen las paradas de planta no programadas y por ende el impacto económico que éstas generan en las unidades de producción, se ordenan de mayor a menor riesgo los resultados obtenidos en cada una de las plantas del Complejo Industrial descrito en el paso anterior.

Después de clasificadas se procede con el análisis de criticidad de los equipos por planta, respetando el orden de prioridad.

2.c. CÁLCULO DE CRITICIDAD PARA LAS PLANTAS DEL COMPLEJO INDUSTRIAL:

El análisis de criticidad es una herramienta que permite identificar y jerarquizar, en función de su impacto global e importancia, a los equipos dentro de una planta, con el objetivo de fijar prioridades en el momento de planificar el mantenimiento preventivo basado en tiempo, basado en condición, y correctivo.

Criticidad = Frecuencia de fallas * Consecuencia de fallas

2.d. SELECCIÓN DE EQUIPOS QUE REQUIEREN SISTEMA DE DETECCIÓN Y DIAGNÓSTICO DE FALLAS.

Luego de definirse el nivel de criticidad de cada uno de los equipos por planta y clasificarse de acuerdo a las bandas de criticidad, se determina que los equipos que requieren monitoreo, detección y diagnóstico de fallas son aquellos clasificados de alta criticidad, ya que al fallar producen un impacto en la producción, seguridad de personas y/o bienes y daños ambientales.

Y los equipos clasificados de mediana criticidad, que cuando fallan producen un impacto en la calidad de la producción y/o balances de masas.

2.e. EXISTENCIA DE PROBLEMAS RECURRENTES O DE IMPACTO:

En aquellos casos donde se encuentran problemas recurrentes o de impacto (seguridad, costos de mantenimiento o pérdida de producción) en las plantas, se realizará un análisis causa raíz del problema. Si en este análisis no se determina fácilmente la causa raíz del problema entonces se evaluará si la implantación de un sistema de detección y diagnóstico de fallas ayuda a detectar y diagnosticar cómo y quién ocasiona la falla, de lo contrario se procederá a realizar un análisis de reingeniería.

El análisis causa raíz, es una metodología sistemática utilizada para investigar la causa origen de cualquier problema, sin importar las disciplinas que pudieran estar involucradas en dicha investigación. Esta metodología, básicamente responde a la pregunta: “Qué lo causó?” y la respuesta consecutiva a esta pregunta, establece un diagrama en bloques (causa-efecto), posibles, los cuales deberán ser validados por soportes fehacientes.

Esta metodología inicialmente responde a las preguntas: qué, cuándo, dónde y escenario, no responde al cómo, ni al quién?. Esta metodología puede considerarse como un método sistemático para la detección y diagnóstico de fallas post-morten.

2.f. DETERMINACIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS DINÁMICAS DEL PROCESO E IDENTIFICACIÓN DE SEÑALES.

Una vez clasificados los equipos de alta y mediana criticidad (por ejemplo: columna de destilación, hornos, compresores), se determinará las características dinámicas de cada uno de estos procesos, tales como: linealidad, variabilidad, retardo, ruido, entre otros. También se analizará e identificará el número de señales disponibles por variable, con el objeto de determinar si existe redundancia física o no en la medición de las mismas.

Todo esto con la finalidad de poder seleccionar la metodología o tecnología de detección y diagnóstico adecuada.

2.g. CLASIFICACIÓN DE LA METODOLOGÍA O TECNOLOGÍA A SER IMPLANTADA.

De acuerdo al número de señales disponibles por variable y a las características dinámicas del proceso se seleccionará la metodología / tecnología a implantar:

- Si se dispone de más de una señal por variable, entonces se puede aplicar el método basado en redundancia física. Este método permite detectar fallas especialmente en transmisores. Para el diagnóstico de la falla se requiere el apoyo de otros métodos, como por ejemplo (Transformada Discreta de Fourier), estadísticos (Gráficos de Control Estadístico, Intervalos de

Confianza, Función de Distribución Normal, Pruebas de Hipótesis, entre otros.) y/o métodos emergentes (Redes Neuronales, Lógica Difusa o Sistemas Expertos.

Cuando no es posible utilizar el método de redundancia física, cabe la posibilidad de utilizar métodos de redundancia analítica, los cuales se tratan con más detalle en la Sección II.

2.h. ANÁLISIS COSTO BENEFICIO RIESGO (ACBR).

Una vez determinado la metodología o tecnología de detección y diagnóstico de fallas a ser implantado, se debe realizar un análisis costo beneficio riesgo, con el objetivo de tomar en cuenta la posibilidad de ocurrencia de daños materiales, tanto a la instalación como a propiedades de terceros, así como la pérdida de producción durante los períodos de parada para reparación de los daños. Si este valor es mayor que el costo de las medidas para minimizar el riesgo, esta última es económicamente justificable. Si la metodología seleccionada no es justificable, entonces, no se implanta el sistema de detección y diagnóstico de fallas, de lo contrario se implanta el sistema de detección y diagnóstico de fallas, se analizan los resultados y se documenta el análisis de la variable o proceso monitoreado por el mismo.

2.i. IMPLANTAR SDDF, ANÁLISIS DE RESULTADOS, Y DOCUMENTAR:

El SDDF se puede implantar en los Sistemas de Control Distribuidos y/o Sistemas de Control Supervisorio para el monitoreo de las variables alta y medianamente críticas del proceso. Los resultados generados por este sistema serán analizados por los Ingenieros de Mantenimiento, Técnicos Instrumentistas de la planta y podrán ser utilizados para la planificación del Mantenimiento Preventivo Basado en Condición (MPBC). Una vez analizados

los datos se procede a guardar el registro de las fallas encontradas, de manera que puedan servir como patrones para el diagnóstico en futuras implantaciones o mejoras. Finalmente se documentan los resultados obtenidos.

3. RESUMEN DE LA METODOLOGÍA

En resumen los pasos anteriores se representarán ilustrativamente de la siguiente manera:



Relacionándose unos pasos con otros, definiremos las características principales en cada ítem.

Para el paso  tenemos lo siguiente:

- Definir el tipo de fallas.
- Para cada tipo de fallas se debe dimensionar TPF, N , t , f_{ci} , c_{fi} , además se debe calcular la variable Riesgo (la cual es una medida económica).

Para el paso  :

- ✓ Jerarquizar las fallas de acuerdo al riesgo en cada planta.

Para el paso **C** :

- ✓ Para cada equipo de esa planta se fijan prioridades basados en la criticidad del equipo.

Frecuencia de Fallos x Consecuencias de Fallos

Para el paso **D** :

- ✓ Escoger los equipos más críticos.

Para el paso **E** :

- ✓ Se realiza el análisis de Causa-Raíz.

Para el paso **F** :

- ✓ Se determina el modelo del equipo.

Para el paso **G** :

- ✓ Se define la metodología a utilizar (ver Sección III).

Para el paso  y  :

- ✓ Se realiza el análisis económico que representa para la empresa, se tiene en cuenta el análisis costo-beneficio riesgo. Finalmente, se implementa el sistema de detección y diagnóstico de fallas, si el análisis económico así lo determina.

4. EJEMPLO DE APLICACIÓN

Utilizando el ejemplo representado en la figura 1, se presenta la forma de cómo emplear la metodología descrita, algunos datos del proceso se han escogido arbitrariamente.

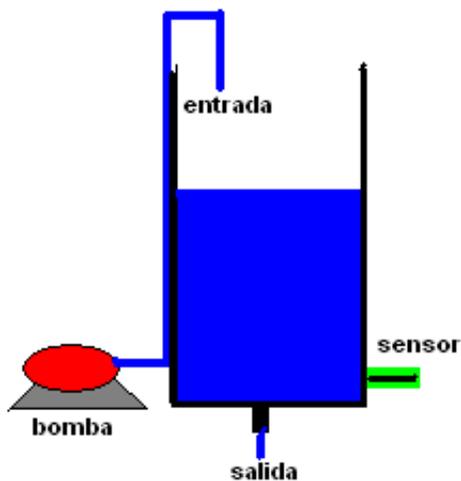


Fig 1. Sistema de Control

A. PARA EL PASO A (tipo de fallas)

- ✓ Rebose => Riesgo 1
- ✓ Quede sin agua => Riesgo 2

B. PARA EL PASO B (jerarquía de fallas de acuerdo al riesgo)

- ✓ Riesgo 1 > Riesgo 2

C. PARA EL PASO C (frecuencia de fallas x consecuencia de fallas)

- ✓ El sistema de control falla ---- 10 x 1
- ✓ Falla el sensor ----- 100 x 0.001
- ✓ Falla la Bomba ----- 5 x 0

Nº de veces que sucede la falla en un equipo x Porcentaje en el cual dicha falla se propaga hacia la situación de riesgo analizada.

D. PARA EL PASO D (equipo más crítico)

- ✓ De acuerdo al paso anterior el equipo más crítico es el Controlador.

E. PARA EL PASO E (análisis Causa-Raíz)

- ✓ Error en la programación ←----→ Fallo.
- ✓ Falla de la etapa de potencia ←----→ Error en la salida ←----→ Fallo general.

F. PARA EL PASO F (modelo del tanque)

- ✓ Modelo del tanque.

G. PARA EL PASO G (metodología a implementar)

- ✓ Ver Sección III.

Con base en este ejemplo, se puede visualizar la forma práctica cómo se implementa esta metodología, y cabe aclarar que para este caso, se analizan los pasos de la “A” a la “G”, los cuales son los que nos determinan qué equipo representa un riesgo mayor a la empresa, dándole a éste la importancia necesaria para realizarle un diagnóstico de fallos.

Como se puede observar el equipo que representa mayor riesgo en el ejemplo es el controlador, aplicándole a éste la metodología de detección de falla.

En la sección III se realiza un análisis con las referencias de los métodos disponibles para abordar el tema de diagnóstico y detección de fallas.

III. EL PROBLEMA DE DETECCIÓN Y DIAGNÓSTICO DE FALLAS

La tercera sección explica inicialmente el problema y la estructura de un sistema de detección y diagnóstico de fallas, además se realiza un análisis cualitativo de las fallas en un proceso determinado y se desarrolla una síntesis de los principales métodos de diagnóstico y detección de fallas

5. Introducción.

El diagnóstico, la supervisión y la seguridad se encuentran en casi todos los productos tecnológicamente avanzados. Esto, incluye automóviles, aviones, robots, maquinas controladas numéricamente entre otras. Existe ahora una tendencia para extender la funcionalidad de los sistemas de diagnóstico y supervisión para manejar más casos en mayores situaciones operativas. Existen muchas razones para ésto, que incluyen lo económico, la seguridad y el mantenimiento.

Iserman [2] define la tarea del diagnóstico como la determinación de la clase, sitio, tamaño y tiempo de una falla determinada.

Un término estrechamente relacionado a “diagnóstico” es FDI (Fault Detection and Isolation) = Detección de Fallas y Aislamiento, como lo usan [3], [4] y [5], en donde

- Detección de Fallo
Detectado cuando ha ocurrido un fallo.
- Aislamiento de Fallo
Aislar el fallo, es decir, determinar el origen de los fallos.

La FDI (Detección y Aislamiento de Fallos) es comúnmente usada como sinónimo de diagnóstico, según Gertler [6].

Cuando se diseña un sistema de diagnóstico se dan parámetros importantes como el porcentaje de falsa alarma, la cual hace referencia a cuán frecuente el sistema muestra una falla en un ambiente libre de fallos y la probabilidad de detectar fallos.

Para llevar a cabo el diagnóstico, necesitamos alguna forma de redundancia en el sistema y una forma de lograr esto es introducir “un hardware redundante”. Una forma de implementar este tipo de redundancia es duplicando o triplicando (Modulador de Redundancia Triple) el componente a diagnosticar.

La redundancia del hardware es de una forma directa pero puede tener o presentar algunas desventajas:

- Un hardware extra puede ser muy costoso.
- El hardware extra consume mucho espacio. El peso de los componentes también puede ser de alguna importancia.
- Algunos componentes no se pueden duplicar, por ejemplo en un sistema para detectar escapes en una tubería no es posible su duplicación en la tubería.

Para sobrellevar estas desventajas intrínsecas de la redundancia por hardware, se ha introducido en la literatura el concepto de redundancia analítica.

En Chow y Willsky, en [3] caracteriza la redundancia analítica de las siguientes dos formas:

✓ **Redundancia directa o estática.**

La relación entre las salidas espontáneas de los sensores. Es decir, cuando un sensor completamente deja de prestar sus funciones por motivo de alguna falla presente. Empleando el ejemplo de la Sección I, de los tanques podemos asumir que falle el sensor de nivel completamente es decir no envíe ninguna señal al monitor, en este caso se identifica mediante redundancia estática el fallo de este sensor.

✓ **Redundancia Temporal**

La relación entre los registros de salidas de un sensor y las entradas de un actuador. Basado en estas relaciones se pueden comparar las salidas de sensores disímiles en diferentes tiempos. Por ejemplo, en el caso del tanque analizado anteriormente, si se observa que el sensor de nivel se encuentra disminuyendo paulatinamente, mientras que el bombeo de agua se encuentra al máximo y el desagüe se encuentra en perfecto estado, se puede asumir que la falla presente se encuentra localizada en el sensor de nivel, es decir, se comparan las salidas del sensor, con las entradas del actuador y la relación de esta nos permite tomar la decisión de adjudicarle la falla al equipo que no se encuentra operando dentro del margen que debería operar en condiciones similares.

Los fallos que actúan sobre un sistema se pueden dividir en 3 tipos de fallos:

1. Fallos en el Sensor. (Instrumental)
2. Fallos del actuador.
3. Fallos en el sistema: Fallo que actúa en el sistema o en el proceso que queremos diagnosticar.

6. ESTRUCTURA DE UN SISTEMA DE DIAGNÓSTICO

Fig 2. Estructura de un Sistema de Diagnóstico

La estructura de un sistema de diagnóstico como se puede visualizar en la figura 2, consiste en el análisis de los datos principales obtenidos de las señales del actuador y las del sensor, estas señales deben estar presente en el sistema de monitoreo, adquisición y supervisión del proceso. Tenemos definidas las variables de la estructura de la siguiente forma:

R(t) : Variable de referencia en unidades estándar, (SET POINT).

X(t) : Variable medida.

Y(t): Salida del proceso

U(t): Señal de control

Luego de culminar el paso anterior simultáneamente se realiza el diagnóstico de alguna falla que se encuentre presente en el sistema, aplicando cualquier mecanismo para su diagnóstico ya sea empleando modelos, estadísticas o bases de datos previamente constituidas.

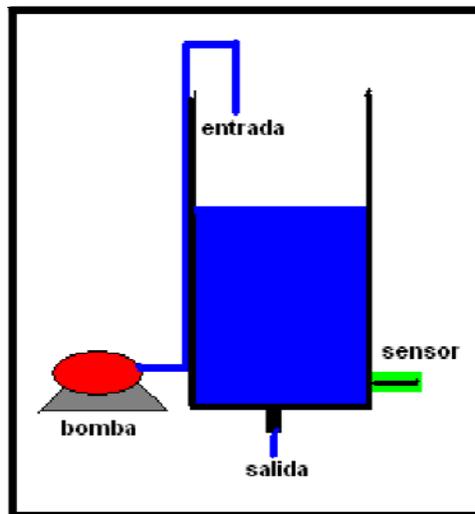
7. ANÁLISIS CUALITATIVO DE FALLAS EN UN SISTEMA

En esta sub-sección se realiza un análisis cualitativo de la incidencia de las fallas en el comportamiento de la variable medida

Mediante el software Simulink, modelamos el ejemplo del tanque representando algunas de las diferentes fallas que pueden ocurrir en ese proceso. Cabe destacar que estas fallas se simulan con el objeto de visualizar cómo cambia la variable de proceso y crear algo de intuición para atender las diferentes metodologías de detección y diagnóstico.

Es muy importante conocer el comportamiento del sistema en ausencia de fallas, es decir en estado normal.

7.1. MODELO DEL PROCESO



$$dh / dt = 1 / A \cdot Qi - (K \cdot h) / A \cdot \sqrt{2gh} ; h_{medido} = h$$

Fig 3. Modelo del sistema.

7.2. PARÁMETROS DEL MODELO DEL TANQUE (Ver figura 3)

$$A= 10 \text{ m}^2$$

$$K= 1 \text{ s / m}$$

$$h_{\max}= 0.2 \text{ m}$$

$$g= 10 \text{ m / s}^2$$

$$Q_i= 1 \text{ m}^3/\text{s}$$

7.3. TIPOS DE FALLAS

Las fallas como señales tienen diferentes tipos de comportamiento, de acuerdo a éste los podemos clasificar de la siguiente forma:

- **Falla abrupta:** es aquella falla cuyo efecto aparece repentinamente (por ejemplo, modelado mediante un pulso). Este tipo de señal será la implementada, para representar la **falla en la bomba**.
- **Falla Intermitente:** es aquella cuyo efecto se aparece en repetidas ocasiones (por ejemplo, modelado mediante una señal escalón). Esta forma de falla se implementa para representar la **falla en el sensor**.
- **Fallo incipiente:** Fallo cuyo efecto aparece progresivamente (por ejemplo, modelado mediante una rampa). Esta forma de falla se implementa para representar la **falla en el tanque**.

Las anteriores fallas se relacionan con el proceso del tanque debido al comportamiento de las señales que se presentan en los elementos. Son de vital importancia, la correcta elección de estas señales, ya que estas son las que se van a introducir para la simulación del sistema.

- ✓ Falla en la bomba: La bomba no bombea => f_b .
- ✓ Falla en el tanque: Ruptura en el tanque – Salida Obstruida => f_t .
- ✓ Falla en el sensor: Sensor desactivado => f_s .

Variables:

Q_i : Caudal de entrada [m³ / s]

F_b : Falla en la bomba => en la simulación un 1 significa ausencia de falla y 0 para representar una falla.

$F_t = h$: Falla en el tanque

F_s : Falla en el sensor

7.4. COMPORTAMIENTO DEL SISTEMA EN AUSENCIA DE FALLAS

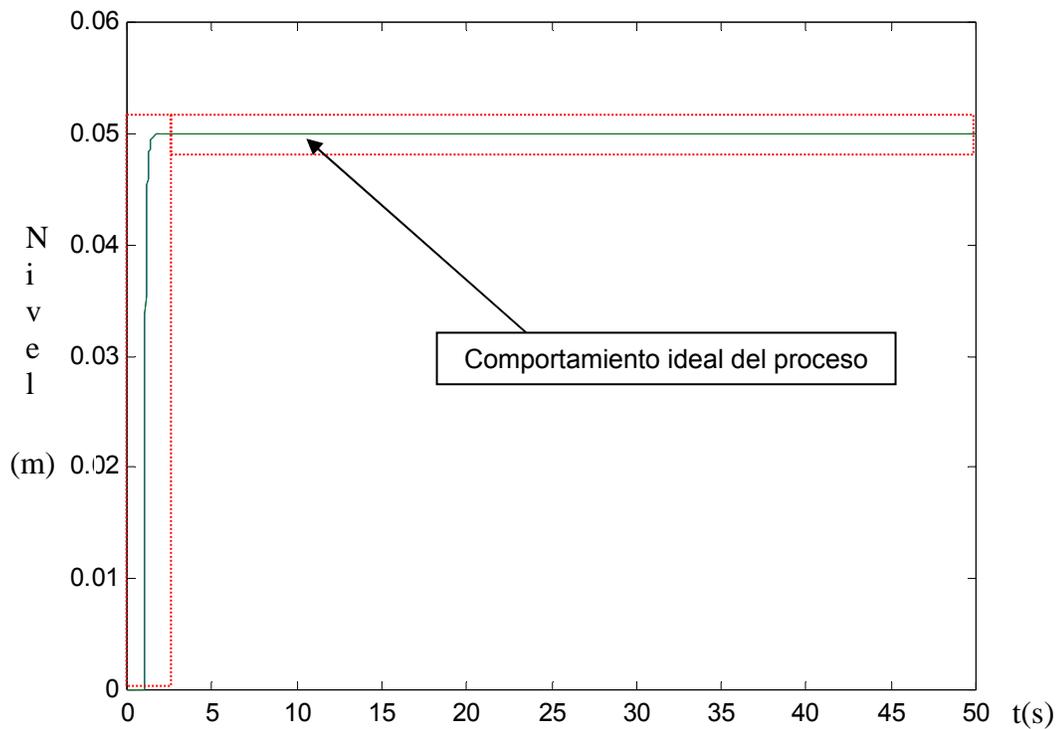


Fig 4. Comportamiento del sistema en ausencia de fallas

Como se observa en la figura 4, se puede analizar el comportamiento ideal del sistema enmarcado en un cuadro de color rojo, se puede observar como el sistema se mantiene en el nivel preestablecido (0.05 mts) sin ningún

inconveniente, ya que el sistema carece de la presencia de fallas en los diferentes componentes que integran al proceso.

8. ANÁLISIS DE FALLAS DEL SISTEMA EN LAZO ABIERTO

El modelo matemático del sistema con las señales correspondientes a las fallas estudiadas es descrito por las siguientes ecuaciones:

$$\frac{dh}{dt} = \frac{1}{A} \cdot Q_i \cdot f_b - \frac{K \cdot h}{A} \cdot f_t \cdot \sqrt{2gh} \quad ; \quad h_{medido} = h \cdot f_s$$

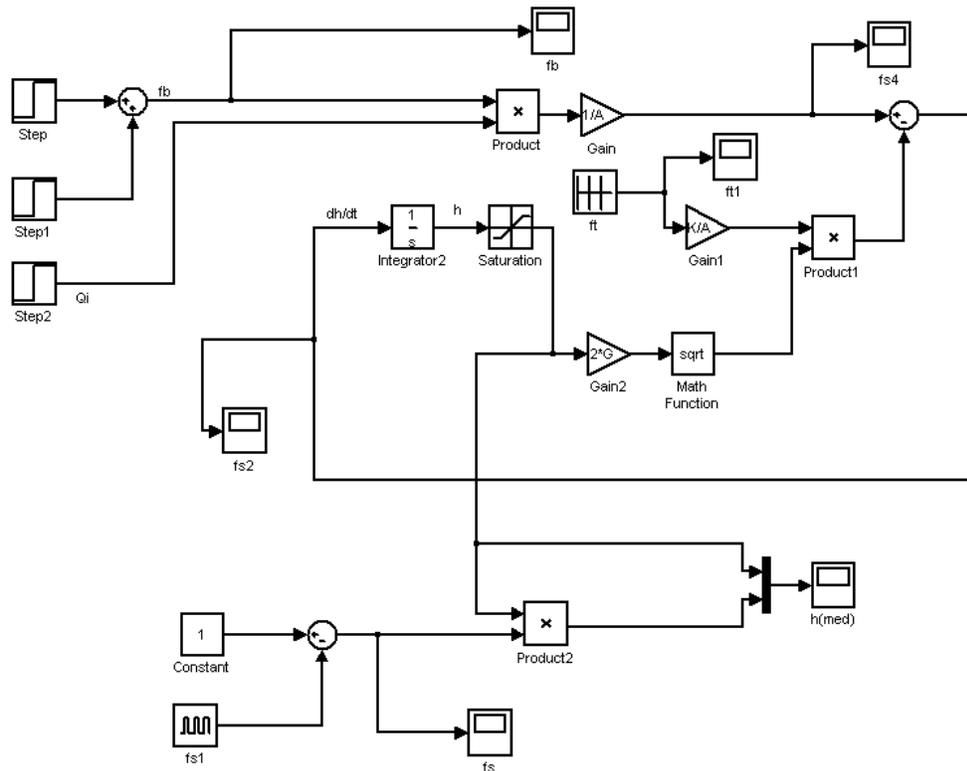


Fig. 5 Simulación en Lazo Abierto (L.A.)

Cabe señalar, que el proceso se efectúa en lazo abierto tal como se ha implementado en la figura 5 y posteriormente en lazo cerrado, todo esto con el propósito de comparar las incidencias que se pueden presentar en ambos casos.

8.1. FALLA EN LA BOMBA

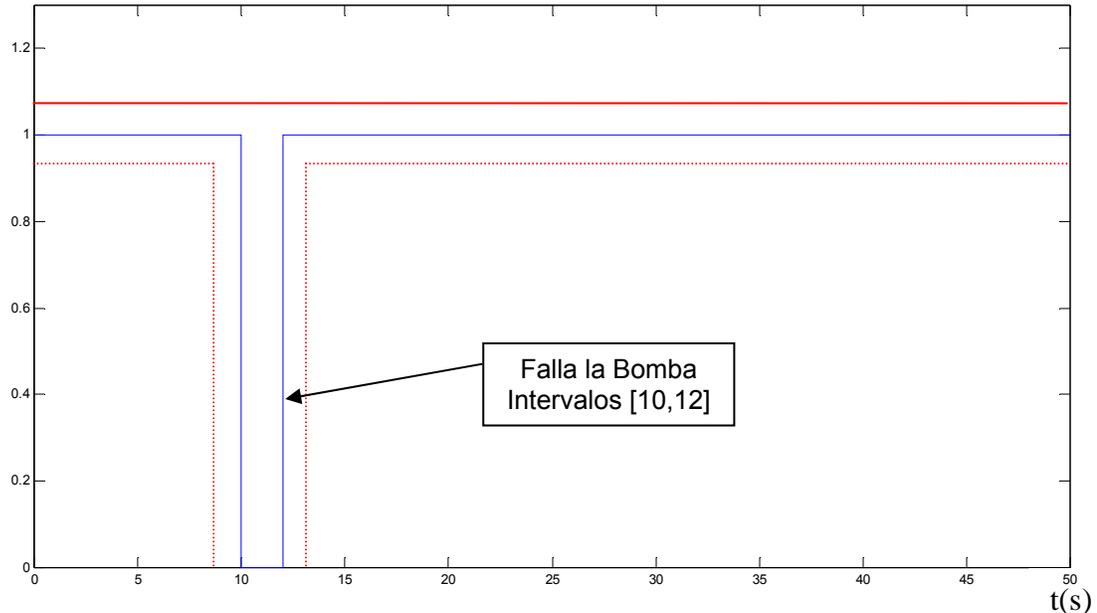
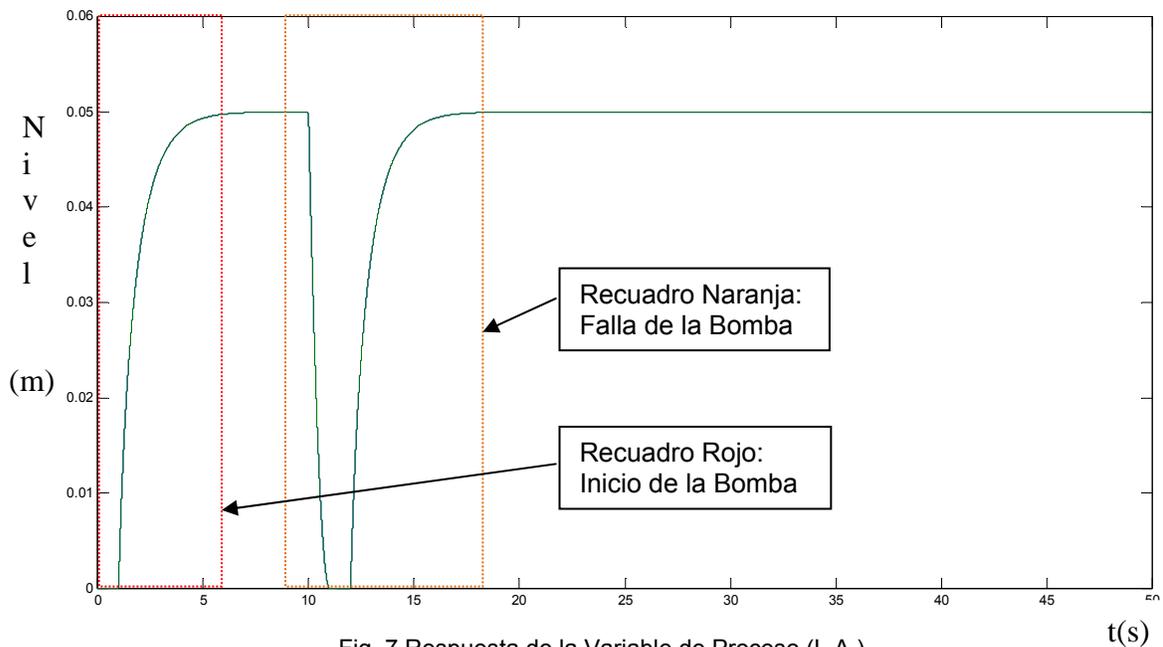


Fig. 6 Falla en la bomba – Debido a una Desconexión Accidental de la Alimentación (L.A.)

En la figura 6 se observa la falla que se le introduce al sistema por motivo de alguna desconexión accidental de la alimentación, esta falla se le aplica al modelo con el fin de conocer cómo se comporta el proceso ante este tipo de fallas. La duración de la falla tiene un tiempo estimado de dos segundos a partir del decimo, fuera de este tiempo se asume que la bomba se encuentra en perfecto funcionamiento.

8.2. RESPUESTA DE LA VARIABLE DE PROCESO - FALLA EN LA BOMBA (L.A.)



En la figura 7, se observa el inicio de la bomba se encuentra comprendido entre los intervalos de 1 segundo a los 3.6 segundos, ésta se mantiene estable hasta los 10 segundos (Ver recuadro Rojo).

Luego de pasado este tiempo se produce una falla intempestiva producida por la falta de alimentación de la bomba, lo cual produce que ésta pierda su correcto funcionamiento durante dos segundos, se puede observar como la señal de nivel va hacia cero, lo que a su vez caracteriza que esta falla sea más fácil para su detección, otra aspecto importante para demarcar son los tiempos que tarda el sistema en restablecerse, estos dependen meramente de la extinción de la falla, ya que la duración del sistema para restablecerse es casi inmediato, debido a características propias del modelo (Ver recuadro Naranja).

8.3. FALLA EN EL TANQUE

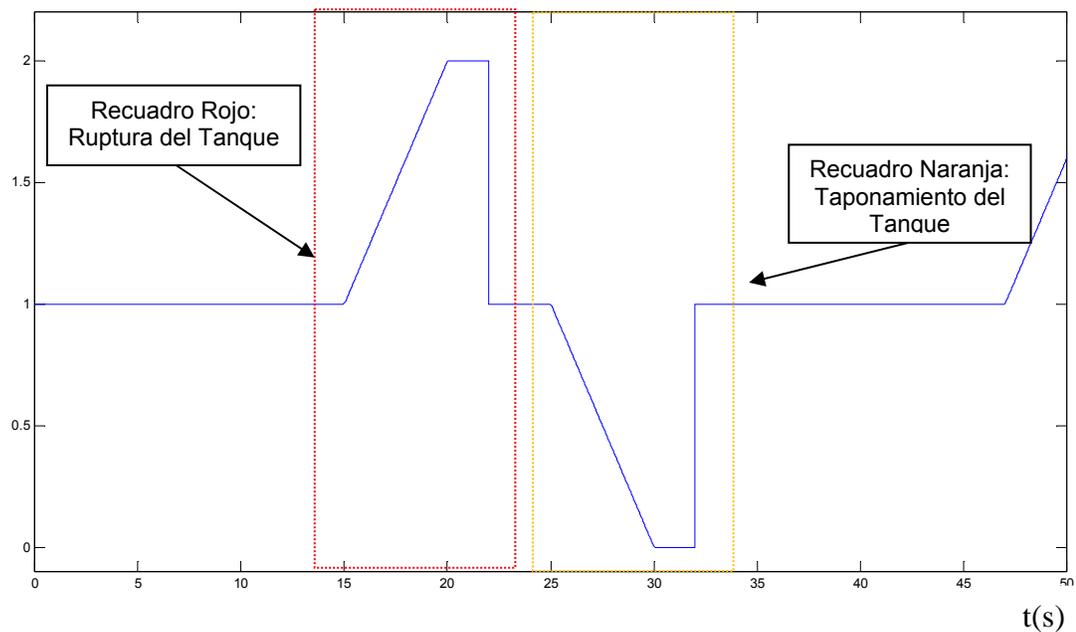


Fig. 8 Falla en el tanque (L.A.)

La señal mostrada en la figura 8, nos representa la falla que se le introduce al sistema, para lograr un análisis de cómo afecta el tanque al proceso general. Se analizan los parámetros de las diferentes fallas, éstas se pueden clasificar de la siguiente manera:

- ✓ Ruptura en el tanque => Se representa en la figura 8 con un dos (Ver Recuadro Rojo).
- ✓ Taponamiento en la salida => Se representa en la figura 8 con un cero (Ver Recuadro Naranja).

La señal en forma rampa se utiliza para describir un efecto progresivo tal como se menciona en el ítem 7.3.

8.3.1. RUPTURA EN EL TANQUE

Para los ítems anteriores se colocaron tiempos diferentes con el fin de separar las fallas en una misma gráfica, para el caso de la ruptura en el tanque (ver figura 8 - Recuadro Rojo), esta falla se vería reflejada en el proceso con el aumento en la salida del líquido almacenado, desde el segundo quince hasta el segundo veinte. Mediante la gráfica se simula un incremento de 1 a 2 en la salida del tanque, es decir hasta el segundo veintidós, después de este tiempo se arregla la falla es decir vuelve a 1.

8.3.2. TAPONAMIENTO EN EL TANQUE

Nuevamente en el segundo veinticinco hasta el segundo treinta existe un taponamiento en el tanque, lo cual se ve reflejado con una disminución en la salida del líquido pasando el sistema de 1 a 0. De igual forma, los tiempos que representan el rebose completo del tanque sería hasta el segundo treinta y dos, donde la entrada del líquido supera a la salida debido a la falla presente en esta última, este rebose se mantiene durante dos segundos después del segundo treinta.

Aquí solo tenemos representada la falla que se le va a introducir al sistema ahora en la grafica siguiente (ver figura 9) veremos cómo esta falla repercute en todo el proceso.

8.4. COMPORTAMIENTO DEL NIVEL ANTE UNA FALLA EN EL TANQUE

Luego de haber analizado la falla de una forma individual, se muestra cómo la falla en el tanque afecta a todo el proceso.

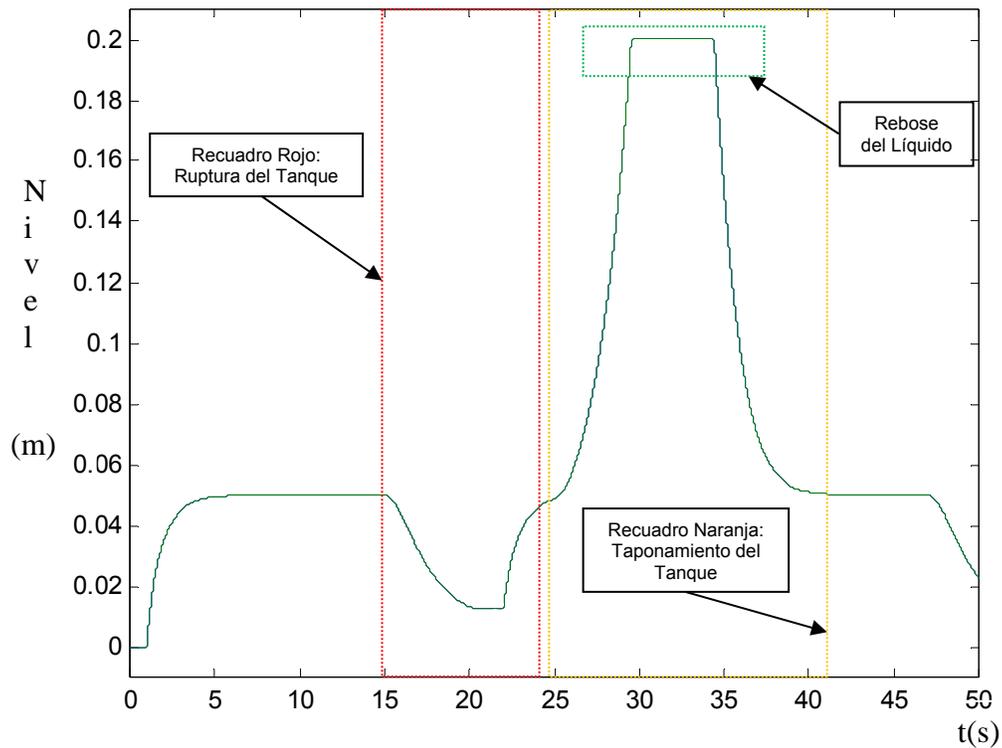


Fig. 9 Comportamiento del nivel ante una falla en el tanque (L.A.)

Analizando la señal de la falla en el tanque y comparándola con la falla introducida al sistema, se puede observar en la figura 9 que ésta comienza en el instante de los quince segundos como se observa en el recuadro rojo, en donde en el proceso se refleja como una disminución en el nivel del tanque, producto de la ruptura del mismo.

El siguiente paso de análisis, es el instante en donde el tanque se restablece durante cinco segundos y en el segundo veinticinco se tapona (Ver Recuadro

Naranja), llenándose continuamente hasta que se presenta el rebose del liquido, lo que se muestra en la grafica como una saturación tal como se observa en el recuadro verde.

8.5. FALLA EN EL SENSOR

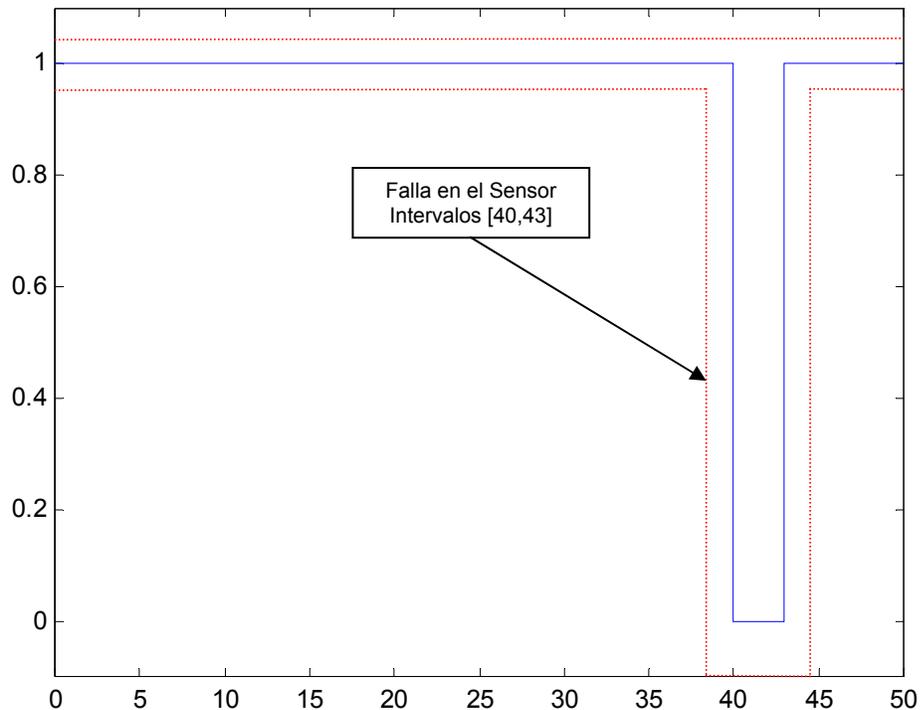


Fig.10 Falla en el Sensor (L.A.)

Para efectos de simulación de la falla presente en el sensor, se implementó una señal de entrada tipo pulso tal como se observa en la figura 10. El comportamiento del sistema cuando se presenta una falla de este tipo, se representa de la siguiente forma; con un valor unitario, el sensor se encuentra en operación normal, mientras que cuando en la señal se observe un cero, ésto nos indica que el sensor se encuentra averiado entre los segundos 40 y 43.

Para analizar las fallas que se pueden presentar en el sistema de una forma separada y más didáctica, se le han dado tiempos de inicio diferentes, para evitar que éstas se traslapen, permitiéndose poder observarlas y realizar sus respectivos análisis por separado.

8.6. COMPORTAMIENTO DEL NIVEL ANTE UNA FALLA EN EL SENSOR

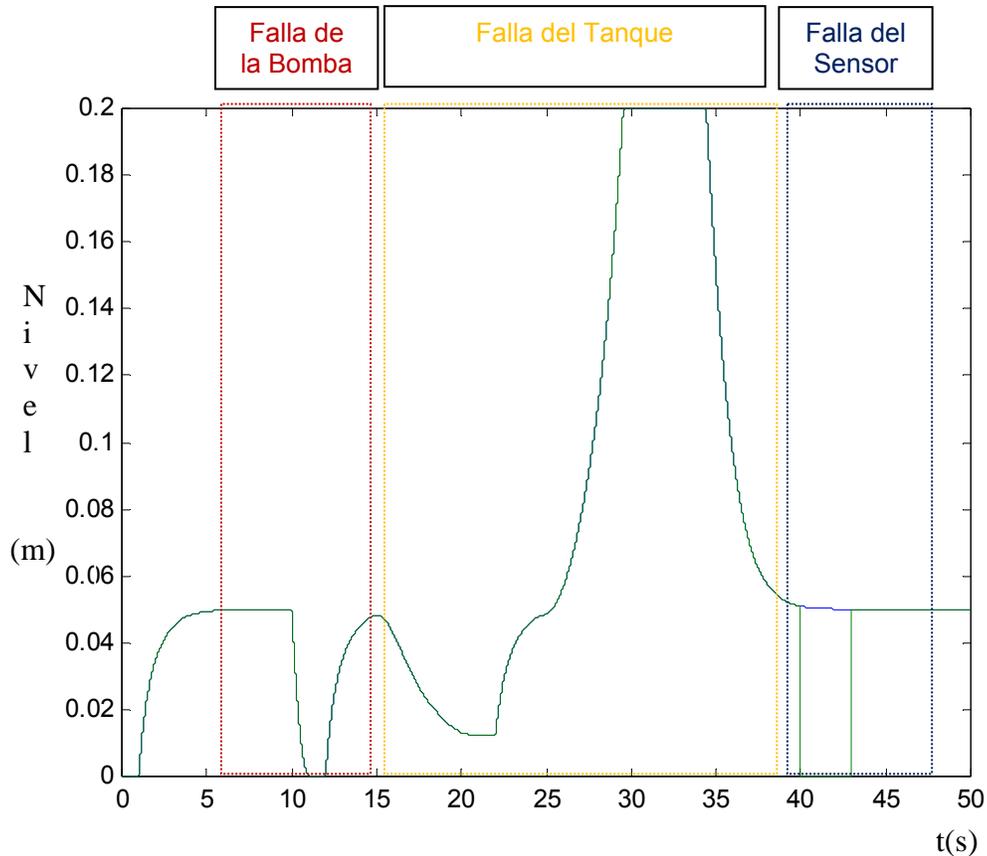


Fig.11 Falla el Sensor en el Proceso (L.A.)

En la figura 11 se observa como la falla en el sensor (segundo 40 al 43), en un sistema de control con lazo abierto, no repercute en el proceso. Debido a que el modelo no se encuentra retroalimentado con una señal, que le permita conocer si existen cambios a la salida, con el fin de modificar su entrada. Este esquema de control no le afectan los errores que se produzcan en los sensores, ya que la entrada será la misma aunque la salida varíe producto de las fallas. Es decir, el actuador no conoce la acción a tomar, ya que

carece de información de la salida, y estará en el mismo punto con falla o sin ésta.

En esta figura observamos las tres fallas que se le aplican a los procesos divididos mediante recuadros para su fácil identificación.

9. ESTUDIO DEL SISTEMA EN LAZO CERRADO

Con el objetivo de estudiar el comportamiento de la variable de proceso en lazo cerrado se implementa un PID, para que cumpla la función de mantener al sistema en un valor predeterminado mediante la retroalimentación de su salida. Para la obtención de sus parámetros se utiliza un método estándar de sintonización, arrojando los valores correspondientes:

$$K_p = 8$$

$$K_i = 16$$

$$\text{Set Point} = 0.05 \text{ [mts]}$$

$$h_{\max} = 0.2 \text{ [mts]}$$

En la figura 12 se presenta la implementación en Simulink del sistema controlado.

$$Q_i = k_p \cdot e(t) + k_i \int e(t) dt$$

$$e(t) = \text{Set Point} - h_{\text{medido}}$$

En base a estas ecuaciones se representa el modelo en lazo cerrado reemplazando el caudal de entrada en lazo abierto, por la sumatoria de los parámetros que contiene el controlador.

10. MODELO DE LA SIMULACIÓN LAZO CERRADO (L.C.)

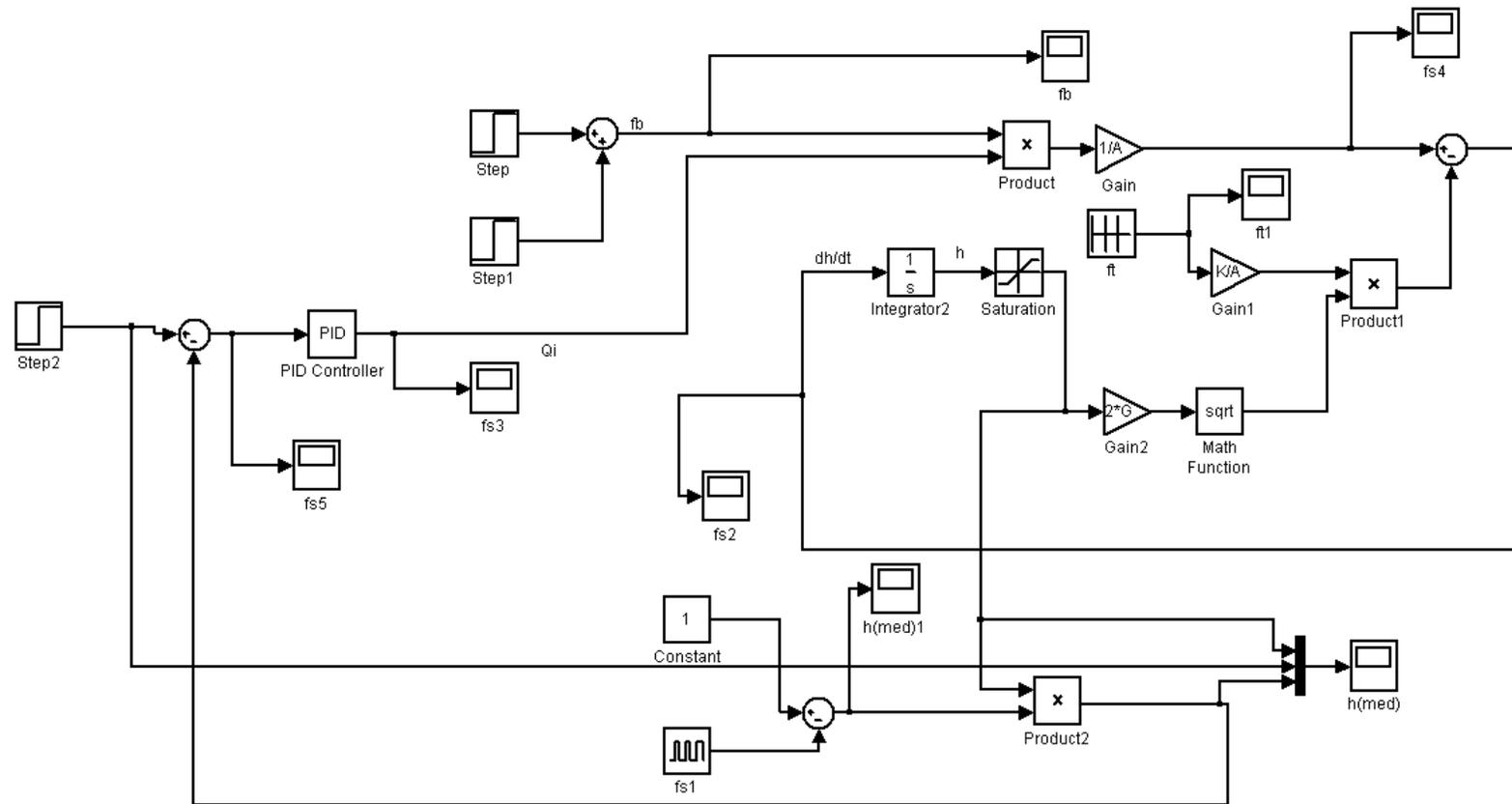


Fig. 12 Simulación en Lazo Cerrado (L.C.)

Luego de haber analizado cómo se comporta el sistema de control a lazo abierto, se procede a visualizar el comportamiento en lazo cerrado analizando las incidencias que este provoca en el sistema, siguiendo el procedimiento utilizado en la sub-sección anterior, se analizarán las fallas por separado viendo como éstas repercuten en el proceso.

11. COMPORTAMIENTO DEL NIVEL ANTE UNA FALLA

11.1. FALLA EN LA BOMBA

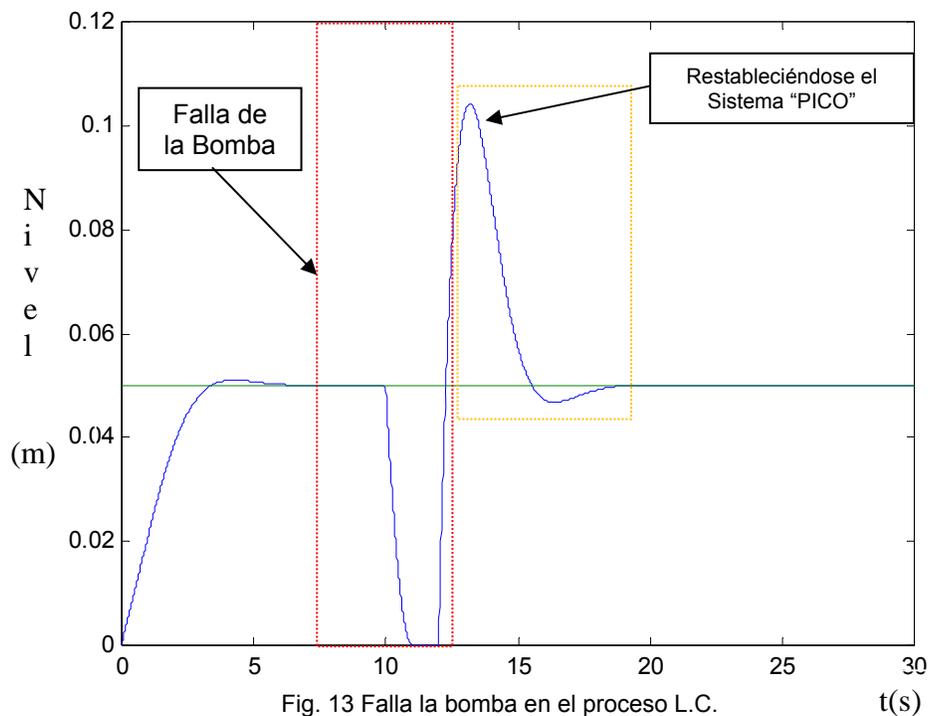
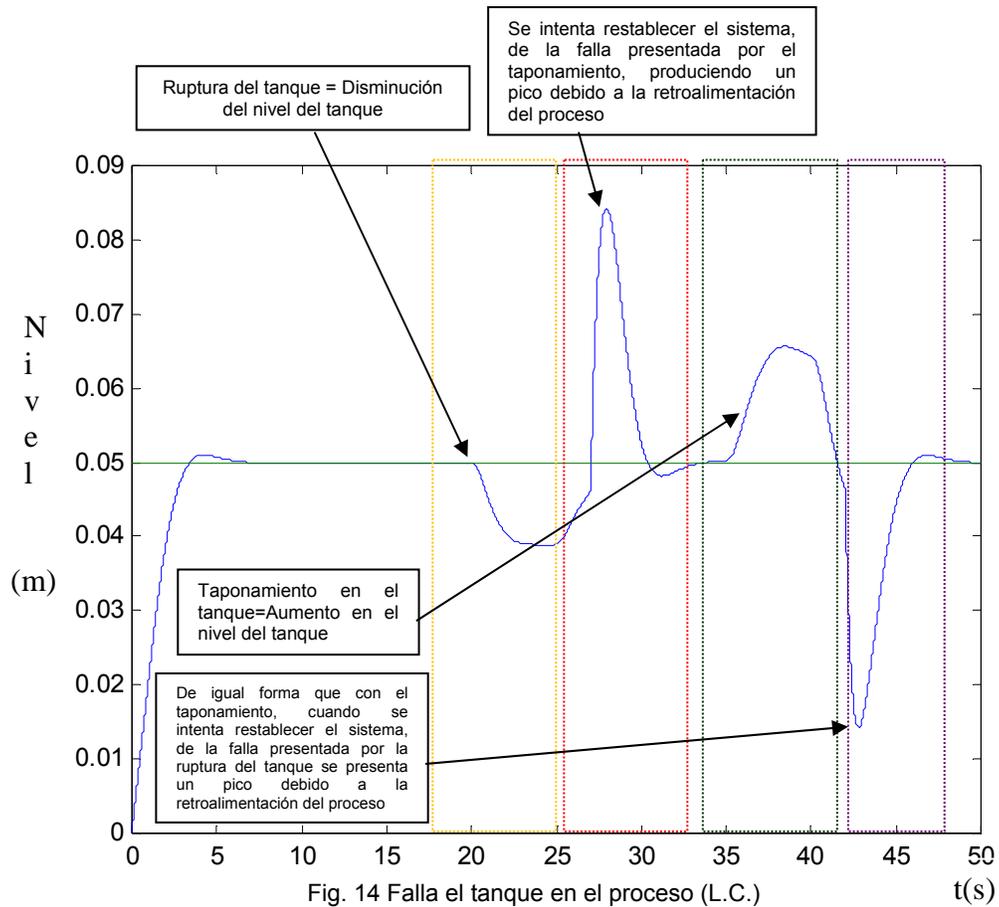


Fig. 13 Falla la bomba en el proceso L.C.

En la figura 13 se puede visualizar que el sistema siempre trata de estar en el valor asignado (0.05) por el operador. Pero cuando se produce una falla, en este caso en el segundo diez [falla la bomba], y comienza restablecerse a partir del segundo doce, en la configuración de lazo cerrado el sistema produce un pico, después de que se sucede este pico el sistema logra restablecerse. Este pico es supremamente peligroso para los equipos ya que puede averiarlos o el proceso se puede descontrolar durante el tiempo que demore el mismo. Además, una falla en la bomba es considerada una falla

crítica para el proceso, ya que esta repercute en todo el sistema por ser una parte activa que actúa sobre las diferentes variables en lazo cerrado, comparándola con la figura 7, se observa que en lazo abierto la falla en la bomba la duración es mucho menor ya que no posee una retroalimentación que le exija unos parámetros en los cuales éste debe permanecer, mientras que en lazo cerrado, existe una retroalimentación y el sistema siempre trata de ajustarse a los parámetros de sintonía.

11.2. FALLA EN EL TANQUE



De igual manera, simulando solo la falla en el tanque se observan las dos situaciones de ruptura y taponamiento, representadas en la figura 14.

Para el caso de la ruptura, de la misma forma que en lazo abierto, la falla se presenta en el segundo veinte, disminuyendo el nivel preestablecido hasta el segundo veinticinco, en el momento en que el sistema trata de restablecerse, la situación que se presenta por ser un sistema de control con lazo cerrado es la misma que con la falla en la bomba explicada con anterioridad, y es el pico que se presenta cuando el sistema trata encontrar su estado normal. De igual forma sucede con la situación de taponamiento en el segundo treinta y cinco hasta el segundo cuarenta en donde se produce el pico de la señal, y luego se restablece el sistema en el segundo cincuenta. Cabe mencionar, que la situación en el tanque comparándola con la figura 9, se observa que en lazo abierto, una falla en el tanque en ambas situaciones (taponamiento y ruptura) llegan a sus extremos (rebose y vaciado) mientras que en lazo cerrado por su característica de retroalimentación el sistema automáticamente trata de corregir la falla y no permite que las situaciones lleguen a sus extremos.

11.3. FALLA EN EL SENSOR

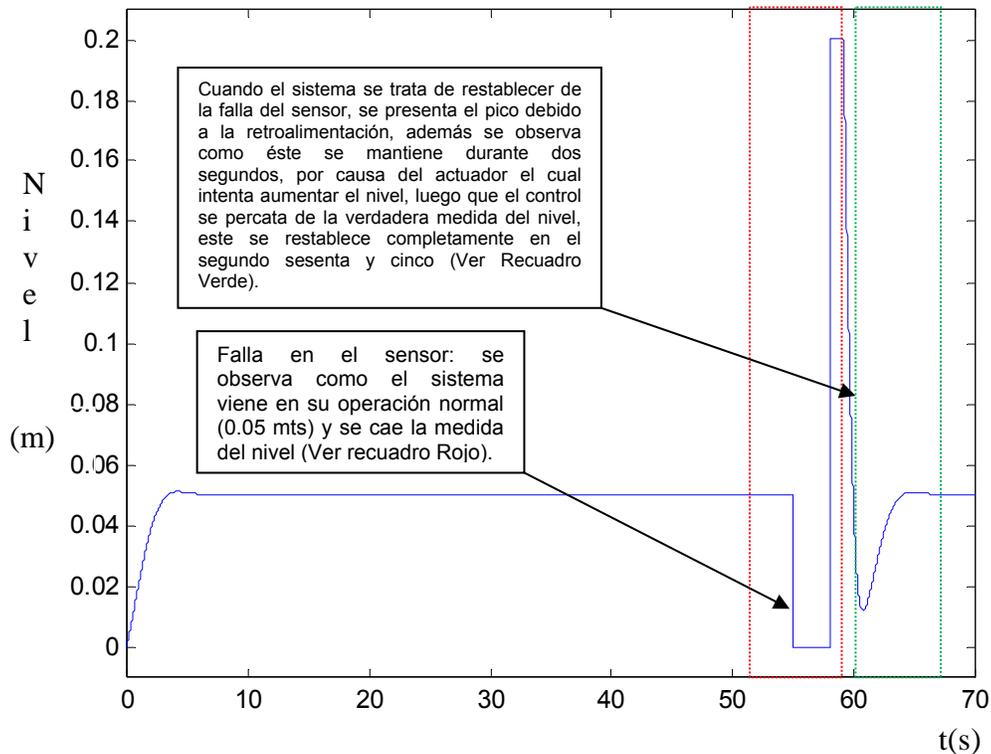


Fig. 15 Falla el sensor en el proceso (L.C.)

En la simulación de esta falla se observa en la figura 15, cómo el proceso se ve afectado por la falla en el sensor, ya que el sistema se encuentra en lazo cerrado, y debido a que posee este sistema de control los actuadores se verán afectados por fallas en los sensores. Es decir, por causa de la retroalimentación que existe en el proceso, al presentarse una falla en los equipos que están sensando las diferentes variables, estos provocan modificaciones en todo el sistema. De igual forma se presentan los picos cuando el sensor se intenta recuperar.

11.4. TODAS LAS FALLAS EN EL PROCESO EN LAZO CERRADO (L.C.)

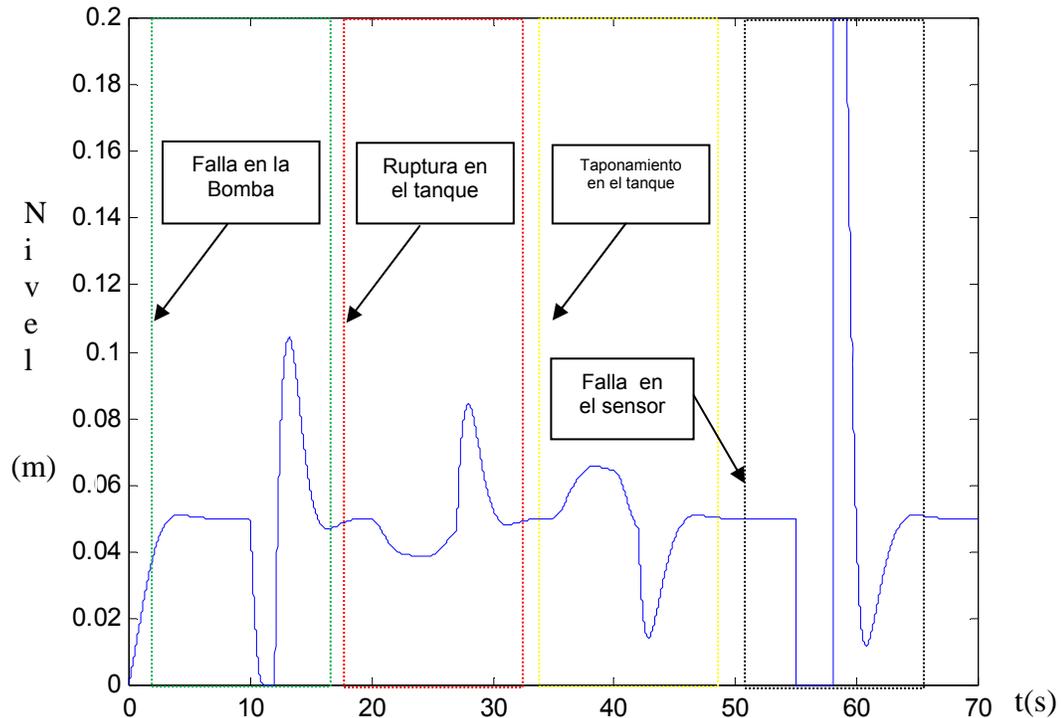


Fig. 16 Fallas en el proceso en lazo cerrado (L.C.)

En la figura 16, se muestra la simulación de todo el sistema en lazo cerrado, se puede observar el comportamiento de cada uno de los elementos del sistema en el momento que se presenta una falla y la manera de cómo el sistema se comporta. Tal como se muestra en la figura 16 se observan que los picos más elevados son los que se presentan en la falla del sensor y en la falla del actuador tomándole al sistema mayor tiempo en la recuperación de la falla. Por tal motivo, los sensores y actuadores son muy esenciales en este tipo de proceso ya que la comunicación entre ellos es primordial para el correcto funcionamiento del sistema y buscan obtener la salida deseada ante la presencia de fallas.

Habiendo realizado un análisis cualitativo del comportamiento de las señales ante posibles fallas del proceso, en la siguiente sub-sección se presenta uno de los principales resultados de este trabajo, donde se sintetizan las principales metodologías para el diagnóstico y la detección de fallas.

12. METODOLOGÍAS

Existen diversas metodologías como se puede observar en la tabla 1, cada una de estas tiene como objetivo principal el de realizar un diagnóstico al proceso y detectar una falla presente en éste. La siguiente tabla (ver tabla 1) propone como principales divisiones el Diagnóstico basado en Modelos Continuos, el Diagnóstico basado en Métodos Estadísticos, el Diagnóstico Discreto y el Diagnóstico basado en Inteligencia Artificial. A su vez, la información bibliográfica que se coloca en cada recuadro es con el fin de que investigaciones posteriores puedan ampliar cada una de estas metodologías.

HERRAMIENTAS DE DETECCIÓN DE FALLAS Y AISLAMIENTO EN ENTORNOS INDUSTRIALES

METODOLOGÍA	DIVISIÓN	SUB-DIVISIÓN	SUB-DIVISIÓN	APLICACIONES	BIBLIOGRAFÍA
Diagnóstico continuo basado en modelos	✓ Métodos de diagnóstico cuantitativo	✓ Generación de Residuos	<ul style="list-style-type: none"> ✓ <i>Limit Trend Checking.</i> ✓ <i>Análisis de Señales</i> ✓ <i>Basado en Modelos de Procesos.</i> ✓ <i>Estimación de Parámetros</i> ✓ <i>Ecuaciones de Paridad</i> ✓ <i>Observadores</i> ✓ <i>Filtro de Detección de Fallas</i> 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ <i>Sistemas de Regulación de Potencia de Reactores Nucleares.</i> ✓ <i>Sistemas de Tanques</i> 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ <i>Neuwmann, [7].</i> ✓ <i>Isermann [8]</i> ✓ <i>Gertler, [6]</i> ✓ <i>Chen [9]</i> ✓ <i>Patton, [10]</i> ✓ <i>Commault, C. Dion, J.-M. Sename, O. Motyeian, R,[11].</i>
		✓ Evaluación de Residuos	-	-	<ul style="list-style-type: none"> ✓ <i>Frank, [5]</i> ✓ <i>Isermann, [12]</i>
	✓ Métodos de Diagnóstico Cualitativo o Semi-cualitativo	✓ Generación de Residuos.	<ul style="list-style-type: none"> ✓ <i>Observadores Cualitativos</i> ✓ <i>Detección de Fallos utilizando envolventes</i> 	-	<ul style="list-style-type: none"> ✓ <i>Zhuang, [13].</i> ✓ <i>Bonarini, [14], Puig, [15].</i>
Diagnóstico basado en estadística	✓ Generación de Residuos	<ul style="list-style-type: none"> ✓ <i>Modelo completamente conocido</i> ✓ <i>Modelo parametrizado</i> 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ <i>Filtros Kalman</i> ✓ <i>Filtros RLS</i> 	-	<ul style="list-style-type: none"> ✓ <i>Baseville and Nikiforov, [16]</i>
Diagnóstico discreto basado en modelos	✓ Diagnóstico Basado en Modelos	-	-	-	<ul style="list-style-type: none"> ✓ <i>Colsole and Torasso, [17]</i>
Diagnóstico Basado en Inteligencia Artificial	<ul style="list-style-type: none"> ✓ <i>Redes Neuronales.</i> ✓ <i>Algoritmos Genéticos</i> ✓ <i>Lógica Difusa</i> 	-	-	<ul style="list-style-type: none"> ✓ <i>Manipuladores Robóticos.</i> 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ <i>Betta, Giovanni Liguori, Consolatina [18]</i> ✓ <i>Vemuri, Arun T. Polycarpou, Marios M. Diakourtis, Sotiris A [19].</i>

Tabla. 1 Metodologías para la detección y diagnóstico de fallos

A continuación se presentan en forma muy general las diversas metodologías referentes a los sistemas de detección de fallos de la tabla 1:

12.1. DETECCIÓN DE FALLOS BASADO EN MODELOS.

En síntesis, la tarea consiste en la detección de fallos en los procesos, los actuadores y los sensores usan dependencias entre diferentes señales medibles. Estas dependencias se expresan en modelos matemáticos como se demuestra en la figura 17, la cual ilustra la estructura básica de la detección fallos basada en modelos.

Fig. 17 Esquema general del proceso de detección y diagnóstico de fallos basado en modelos

Basado en señales de entrada U y señales de salida Y , los métodos de detección generan residuos " r ", parámetros estimativos ó estados estimados , que se llaman "características". Por la comparación de las características normales, los cambios de las mismas se detectan, los cuales guían al análisis de síntomas.

12.2. DIAGNÓSTICO BASADO EN ESTADÍSTICA.

Existen básicamente dos formas para generar residuos, las cuales están basadas en un modelo:

- **El modelo completamente conocido.** En este caso, esencialmente se pone en marcha el modelo en paralelo con el sistema y se computa el residuo como la diferencia, lo cual, en un ambiente estadístico esto se logra mediante un filtro Kalman.
- **El modelo parametrizado.** Los parámetros en un modelo asumen ser una estructura de regresión lineal y se estiman recursivamente. En este sentido, la salida de un modelo estimado, se compara luego con el sistema, y el filtro que lleva a cabo esta operación es RLS (Recursive Least Squares).

Para un cabal entendimiento de la detección de cambios vía la estadística, se necesita solamente saber que el filtro de Kalman y el RLS toman las señales medidas y las transforman en una secuencia de residuos tal como se señala en la figura 18:



Fig 18. Esquema del Diagnóstico Basado en Estadística

Un filtro purificador toma la entrada observada U_t y la salida Y_t y la transforma en una secuencia de residuos ε_t .

En un mundo perfecto, los residuos serían “cero” antes de un cambio y “no-cero” después. Ahora bien, puesto que las mediciones de los ruidos y los procesos de perturbación son problemas fundamentales en el enfoque estadístico de la detección de cambios, el valor real de los residuos no se pueden predeterminar, por lo cual, se ha de confiar en su comportamiento por promedio.

Por otro lado, un detector de cambio estadístico en línea, es un instrumento que toma una secuencia de variables observadas y en cada tiempo toma una decisión binaria si el sistema ha sufrido un cambio, pero se hace necesario considerar las siguientes mediciones críticas:

- **Término medio entre las falsas alarmas (MTFA)**, para responder a la pregunta: ¿Cuán a menudo se tienen alarmas cuando el sistema no ha cambiado?
- **Término medio de detección (MTD)**. ¿Cuánto tiempo hay que esperar después que se de un cambio hasta que se de la alarma?
- **Promedio de duración de la función, ARL (θ)**. Una función que generaliza MTFA y MTD. ¿Cuánto tiempo toma antes que se tenga una alarma después de un cambio de tamaño θ ?

12.3. DIAGNÓSTICO DISCRETO BASADO EN MODELOS

La idea básica del diagnóstico discreto basado en modelos, es la de comparar ciertos valores medidos de un artefacto o instrumento que se va a diagnosticar, con los valores predeterminados por un modelo con respecto a ese instrumento. Cualquier diferencia entre los valores medidos y los predeterminados, se conocen como discrepancias, también llamados “síntomas” por algunos autores.

Es preciso determinar algunos conceptos básicos antes de entrar a diagnosticar un instrumento:

- i. D es el instrumento a ser diagnosticado.
un instrumento está compuesto de componentes
- ii. Supongamos que $COMP = \{c_1, \dots, c_n\}$ es el conjunto de componentes de D.
- iii. Para cada componente c_i en COMP hay un conjunto de comportamientos $BM_i = \{\text{correcto}, \text{fallo}_{i_1}, \dots, \text{fallo}_{i_m}\}$.

Para cada componente existe un comportamiento “correcto” y un número de comportamientos defectuosos. El comportamiento del instrumento D se puede representar como la consecuencia de los modos de comportamiento de sus componentes. Es preciso considerar también que para cada componente c_i en COMP existe un conjunto de comportamientos $BM_i = \{\text{correcto}, \text{desconocido}, \text{fallo}_{i_1}, \dots, \text{fallo}_{i_m}\}$. Se hace necesario también considerar los símbolos denominados abducibles y no-abducibles, en donde la unión de todo el conjunto de comportamientos se denominan abducibles: $ABDSYM = BM_1 \cup \dots \cup BM_n$ y los no-abducibles $NONABDSYM = CONS_{\alpha_1} \cup \dots \cup CONS_{\alpha_n}$ y para este último caso, es la unión de todo el conjunto de consecuencias lo que se determina no-abducible [21].

Se puede afirmar que la resolución de un problema de diagnóstico de un instrumento es equivalente a identificar los comportamientos de sus componentes que explican las observaciones llevadas a cabo, y para ello se usan dos tipos de explicaciones: una débil y otra fuerte. En síntesis, resolver un problema de diagnóstico (DP) para un instrumento D equivale a identificar los comportamientos de los componentes en D.

12.4. DIAGNÓSTICO BASADO EN INTELIGENCIA ARTIFICIAL.

Aquí se revisa el comportamiento actual con el que se considera normal, el cual es obtenido a través de un sistema experto o cualquier técnica basada en inteligencia artificial. Estos métodos se utilizan frecuentemente cuando la información disponible sobre el sistema se encuentra principalmente en forma de experiencia y no se cuenta con modelos matemáticos precisos. Se explican de una forma breve algunas de las técnicas empleadas por esta metodología, como lo son:

Redes neuronales, Marcu, [20], representan modelos no lineales multi-entrada y multisalida. El tipo de redes neuronales que se utilizan son una estructura mixta de perceptrón dinámico multi-capa. El entrenamiento del modelo se realiza aplicando “backpropagation” dinámico.

Lógica Difusa, Chen and Patton, [9] representa un conjunto de observadores analíticos lineales cuyas salidas son fusionadas siguiendo los modelos difusos propuestos por Tagaki-Sugeno. Utilizando esta técnica un sistema con dinámica no lineal se describe mediante un conjunto de modelos que linealizan el comportamiento en torno a unos puntos de funcionamiento.

IV. EL IMPACTO ECONÓMICO EN LAS EMPRESAS, DEBIDO AL NO USO DE SISTEMAS CONFIABLES DE DETECCIÓN DE FALLAS

Esta cuarta sección trata de demostrar qué tan necesarios son los sistemas de detección de fallas, además muestra una perspectiva muy general respecto hacia dónde va la industria con sus temas de diagnóstico y detección de fallas.

13. Introducción

A comienzos de los años setenta, la automatización de los procesos industriales ha experimentado un desarrollo formidable, lo que ha permitido reemplazar los controladores PID analógicos de aquel entonces por complejísimas interconexiones de múltiples sensores y actuadores con sofisticados sistemas computacionales para el control en tiempo real.

Como consecuencia de estos avances, la operación de los procesos así automatizados plantea también importantes desafíos. Uno de ellos ha sido el apropiado adiestramiento en estas tecnologías. Sin embargo, aún con operadores bien entrenados no es posible enfrentar en forma segura y confiable la operación de procesos muy complejos, que incluyen cientos de lazos de control automático y miles de variables de proceso, si no se dispone de herramientas apropiadas. Entre estas herramientas se cuentan sistemas de apoyo al operador que monitorean el proceso y la instrumentación, detectando el mal desempeño de un lazo de control, saturaciones en variables manipuladas, grandes variaciones en las variables controladas, etc.

Para detectar y diagnosticar automáticamente estas anomalías, generalmente denominadas “fallas”, estos sistemas de apoyo descansan en el análisis estadístico de los equipos que presentan más fallas, complementado con sistemas expertos basados en reglas que capturan el conocimiento de ingenieros y operadores del proceso.

Ahora, si no se posee un sistema robusto para la detección de fallas en equipos críticos para el proceso, la empresa se puede ver comprometida en el momento que uno de éstos falle, ocasionando diferentes situaciones tales como: una parada no programada, pérdida de la producción, y en el caso más crítico, hasta pérdidas humanas.

En la actualidad, existen industrias que han quedado un poco atrás en lo pertinente a la modernización de sus sistemas de control como bastión fundamental en el éxito de las empresas. En algunos casos, se han incrementado los tiempos de respuesta a fallas determinadas por efecto de la ausencia de sistemas que las detecten, ocasionándole a la empresa aumentos en las horas extras de labor para cumplir con la producción.

Las fallas en las industrias, muy a menudo, tienen consecuencias que van más allá del solo costo de reemplazo o reparación de los equipos averiados. Por lo general, los costos asociados a la reducción de la producción, y en el peor de los casos, de la parada de unidades o de toda una planta, superan los costos de reemplazo de uno o varios equipos. Por ende, una forma eficiente, confiable y a la vez que le reduzca pérdidas económicas representan para la empresa un reto y una responsabilidad que es posible afrontar con el uso de la tecnología adecuada y disponible en el mercado.

Mediante la implementación de un modelo de detección de fallas, es posible minimizar el riesgo de un fallo y/o sus consecuencias, a la vez que también representa una herramienta para el control de calidad convirtiendo a la empresa más competente en el marco global.

14. PERSPECTIVAS INDUSTRIALES

Existen muchos aspectos relacionados con la seguridad, el diagnóstico y la supervisión industrial. Comúnmente el diagnóstico se usa sobre la base de un componente, es decir, cada motor, bomba, válvula, transformador y así sucesivamente es tratado individualmente. El diagnóstico consiste en cualquier localización de la falla después de producida la falla, o una de detección algorítmica dada una alarma para una falla posible. Existen muchos problemas con el método que se usa hoy en día.

La localización de la falla después de la misma se hace completamente fuera de línea y está totalmente separada del sistema de control. Usualmente se usan costosos sensores que necesitan complicados procesos de señales. Esto conduce al hecho que los resultados son comprendidos solamente por un especialista.

Un problema con la detección algorítmica usada hoy en día, es que se crean demasiadas alarmas y algunas de éstas son falsas alarmas. Aún más, es difícil y muy costoso diseñar estos detectores algorítmicos puesto que son hechos individualmente para cada proceso. Los clientes no desean pagar una gran suma por un detector algorítmico de fallas. A menudo la industria no quiere tomar estos riesgos y los costos, lo que a su turno entorpece los buenos sistemas de alarmas.

Por tal razón, los vendedores de sistemas de control tienen un gran reto y es el de proveer herramientas que faciliten las funciones del sistema de diagnóstico de una forma que no resulte tan costosa ni a su vez incomprensible para los operadores, los cuales son las personas encargadas de supervisar los cambios de las variables en el proceso.

Los encargados de desarrollar sistemas de control avanzado tienen como tarea diseñar sistemas de diagnóstico y aislamiento que le permitan a los clientes obtener las siguientes informaciones:

- Que hacer para reducir el impacto sobre la producción cuando una falla ha ocurrido.
- Que hacer para eliminar la falla.
- Como regresar la producción a lo normal después de presentada la falla.

En el futuro se espera un desarrollo hacia los sistemas integrados de diagnóstico que usan información proveniente de más de un componente para llegar a conclusiones sobre fallas usando información redundante. Los sistemas industriales ABB, han investigado métodos como el “Procesador del Modelo de Diagnóstico”. Hay varios beneficios con este método. Es posible señalar qué está fallando con un alto grado de veracidad y evitar falsas alarmas. También proporciona una posibilidad para sugerir acciones que permitan eliminar la falla. El inconveniente que presenta este método es su elevado costo en la etapa de la configuración y en su validación.

V. CONCLUSIONES

En la actualidad y debido a la creciente complejidad de los procesos y sistemas de control, se incrementa la necesidad de proveer a los mismos de un alto grado de confiabilidad. Para ello, es útil contar con sistemas que permitan detectar precozmente posibles fallas del proceso, informando mediante un disparo de alarma la ocurrencia de una situación anormal en la planta. Focalizando nuestra atención en la detección y aislamiento de fallas en sistemas de control automático, hallamos un vasto campo de estudio, con numerosos aspectos aún por analizar.

Primeramente se implementó una metodología para la implementación de los Sistemas para la Detección de Fallos en Procesos Industriales. Esta metodología facilita la implantación del Mantenimiento Preventivo Basado en Condición, lo cual redundará en la reducción de costos de mantenimiento y la disminución de paradas de planta no programadas causadas por fallas en los sistemas de automatización

Como ya se dijo, la eficiencia de la Detección de Fallas, está estrechamente relacionada con la posibilidad de rechazar o al menos atenuar las perturbaciones que pueden aparecer en la planta. En este trabajo se presentó un análisis cualitativo de las fallas, utilizando una simulación de un proceso de un tanque, observando los diversos comportamientos que tiene la variable de proceso ante diversos tipos de fallas.

Uno de los principales resultados de este estudio, es que se muestran los principales sistemas de detección en entornos industriales los cuales actualmente están cobrando importancia, y a la vez estos están siendo objeto de constantes estudios produciendo modelos más robustos y con menos errores. Se realizó un cuadro que posee las principales metodologías, con sus respectivas subdivisiones, plasmando en cada metodología sus referencias bibliográficas.

Otro tema que se trató en este documento fue la importancia que tienen los sistemas de diagnóstico y detección de fallas para disminuir las pérdidas económicas en las industrias. Además, se analizó el impacto que las industrias tienen careciendo de estos sistemas.

VI. PERSPECTIVAS Y TRABAJOS FUTUROS

Las siguientes perspectivas se presentan como base de apoyo a futuros trabajos de investigación. Se tiene como perspectiva a futuras investigaciones, profundizar en cada una de las metodologías aquí propuestas. Otra investigación interesante, sería analizar en el campo industrial el desempeño de alguna metodología para la detección y diagnóstico de fallas, teniendo en cuenta el aislamiento de la misma. Es fácilmente deducible que futuros investigadores en este campo se decidan por cualquiera de estas dos posibilidades, puesto que es indiscutible, que en el sector industrial la detección de los fallos y su correcta corrección contribuye a minimizar los gastos que las empresas industriales tendrían en caso contrario.

VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.

- [1] Aranguren, Sandra. (2001), Estudio y Diseño de las Normas, Ingeniería, Metodologías y Tecnologías de los Sistemas de Detección y Diagnóstico de Fallas (SDDF), para los Elementos de los Sistemas de Automatización del Centro de Refinación Paraguaná (CRP), PDVSA. Tesis de Maestría. Universidad de los Andes. Facultad de Ingeniería. Mérida-Venezuela, 2001.
- [2] R. Isermann. (1984), Process fault detection based on modeling and estimation methods-A survey. *Automatica*, 20:387-404, 1984.
- [3] E. Y. Chow and A. S. Willsky. (1984), Analytical redundancy and the design of robust failure detection systems. *IEEE Trans. on Automatic Control*, AC-29(7):603-614, 1984.
- [4] R.J Patton. (1994), Robust model-based fault diagnosis: the state of the art. In *IFAC Fault Detection, Supervision and Safety for Technical Processes*, pages 1-24, Espoo, Finland, 1994.
- [5] P.M. Frank. (1991), Enhancement of the robustness in observer-based fault detection. In *IFAC Fault Detection, Supervision and Safety for Technical Processes*, pages 99-111, Baden-Baden, Germany, 1991.
- [6] J. Gertler. (1991), Analytical redundancy methods in fault detection and diagnosis. In *IFAC/IMACS Symp. SAFEPROCESS*, Baden-Baden, Germany, pages 9-21, 1991.

[7] D. Neumann. (1991), Fault diagnosis of machine-tools by estimation of signal spectra. In IFAC Fault Detection, Supervision and Safety for Technical Processes, pages 147-152, Baden-Baden, Germany, 1991.

[8] R. Isermann. (1991), Fault diagnosis of machines via parameter estimation and knowledge processing. In IFAC Fault Detection, Supervision and Safety for Technical Processes, pages 43-55, Baden-Baden, Germany, 1991.

[9] Chen J. y Patton R.J. (1999), Robust model based fault detection for dynamic systems, Kluwer Academic Publishers, 1999.

[10] R.J Patton. (1994), Robust model-based fault diagnosis: the state of the art. In IFAC Fault Detection, Supervision and Safety for Technical Processes, pages 1-24, Espoo, Finland, 1994.

[11] Commault, C. Dion, J.-M. Sename, O. Motyeian, R. (2002), Observer-Based Fault Detection and Isolation for Structured Systems. IEEE Transactions on Automatic Control; Dec2002, Vol. 47 Issue 12, 2002.

[12] R. Isermann. (2004), Model-based fault detection and diagnosis - status and applications - *Institute of Automatic Control, Darmstadt University of Technology, IFAC, 2004.*

[13] Zhuang, Z. y Frank, P.M. (1997), Qualitative observer and its application to fault detection and isolation systems. Systems and Control Engineering 211, 253-262, 1997.

- [14] Bonarini, A. y G. Bontempi. (1994), A qualitative simulation approach to fuzzy dynamical models. *ACM Transactions on Modeling and Computer Simulation (TOMACS)* 4, 258-313, 1994.
- [15] Puig, V., Saludes J. y Quevedo J. (2003). Worst-case simulation of discrete linear time invariant interval dynamic systems. *Reliable Computing* 9(4), 251-290, 2003.
- [16] Basseville, M. y I.V. Nikiforov (1993). *Detection of abrupt changes: theory and applications*. Prentice Hall, Englewood Cliffs, N.J., 1993.
- [17] L. Console and P. Torasso. (1991), A spectrum of logical definitions of model-based diagnosis. *Comput. Intell.*, 7:133-141, 1991.
- [18] Betta, Giovanni, Liguori, Consolatina. (1998), An Advanced Neural-Network-Based Instrument Fault Detection and Isolation Scheme, *IEEE Transactions on Instrumentation & Measurement*; Vol. 47 Issue 2, 1998.
- [19] Vemuri, Arun T. Polycarpou, Marios M. Diakourtis, Sotiris A. (1998), Neural network based fault detection in robotic manipulators. *IEEE Transactions on Robotics & Automation*; Vol. 14 Issue 2, 1998.
- [20] Marcu, T., Matcovschi M.H. y Frank-P.M. (1999). Neural observer-based approach to fault detection and isolation of a three-tank systems. *Proceedings of European Control Conference*, 1999.
- [21] *Issues in Diagnosis, Supervision and Safety*, 1996, L. Nielsen, M. Nyberg, E. Frisk, C. Backstrom, A. Henriksson, I. Klein, F. Gustafsson and S. Gunnarsson, IDA Technical Report, 1996.