



INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL

CENTRO DE INVESTIGACIÓN EN CIENCIA APLICADA Y TECNOLOGÍA  
AVANZADA

“FILTRO DIGITAL DIFUSO EN TIEMPO REAL”

TÉSIS

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE  
DOCTOR EN CIENCIAS EN TECNOLOGÍA AVANZADA

**PRESENTA:**

JUAN CARLOS GARCÍA INFANTE

Director: Dr. José de Jesús Medel Juárez

Co-Director: Dr. José Luis Fernández Muñoz



MÉXICO D.F.

Noviembre del 2007



**INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL**  
**SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO**

*CARTA CESION DE DERECHOS*

En la Ciudad de México el día 03 del mes Diciembre del año 2007, el (la) que suscribe Juan Carlos García Infante alumno (a) del Programa de Doctorado en Tecnología Avanzada con número de registro A050170, adscrito al Centro de Investigación en Ciencia Aplicada y Tecnología Avanzada, manifiesta que es autor (a) intelectual del presente trabajo de Tesis bajo la dirección del Dr. José de Jesús Mede Juárez y cede los derechos del trabajo intitulado Filtro Digital Difuso en Tiempo Real, al Instituto Politécnico Nacional para su difusión, con fines académicos y de investigación.

Los usuarios de la información no deben reproducir el contenido textual, gráficas o datos del trabajo sin el permiso expreso del autor y/o director del trabajo. Este puede ser obtenido escribiendo a la siguiente dirección jcnet21@yahoo.com. Si el permiso se otorga, el usuario deberá dar el agradecimiento correspondiente y citar la fuente del mismo.

Juan Carlos García Infante

Nombre y firma



INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL  
SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO

ACTA DE REVISIÓN DE TESIS

En la Ciudad de México, D.F. siendo las 11:00 horas del día 28 del mes de noviembre del 2007 se reunieron los miembros de la Comisión Revisora de Tesis designada por el Colegio de Profesores de Estudios de Posgrado e Investigación de CICATA-IPN para examinar la tesis de titulada: "Filtro Digital Difuso en Tiempo Real"

Presentada por el alumno:

GARCÍA INFANTE JUAN CARLOS  
Apellido paterno materno nombre(s)

Con registro: 

A	0	5	0	1	7	0
---	---	---	---	---	---	---

aspirante de: DOCTORADO EN TECNOLOGÍA AVANZADA

Después de intercambiar opiniones los miembros de la Comisión manifestaron **SU APROBACION DE LA TESIS**, en virtud de que satisface los requisitos señalados por las disposiciones reglamentarias vigentes.

LA COMISIÓN REVISORA

Directores de tesis

DR. JOSÉ DE JESÚS MEDEL JUÁREZ

DR. JOSÉ LUIS FERNÁNDEZ MUÑOZ

DR. JOSÉ ANTONIO IRÁN DÍAZ GÓNGORA

DR. PEDRO GUEVARA LÓPEZ

DR. JOSÉ ANTONIO CALDERÓN ARENAS

EL PRESIDENTE DEL COLEGIO

CENTRO DE INVESTIGACIÓN EN CIENCIA  
DR. JOSÉ ANTONIO IRÁN DÍAZ GÓNGORA  
CICATA-IPN  
TECNOLOGÍA AVANZADA  
DEL IPN

## **Agradecimientos**

*El desarrollo de este proyecto y la culminación de este posgrado fueron posibles gracias a la oportunidad que me brindaron en el Centro de Investigación en Ciencia Aplicada y Tecnología Avanzada (CICATA), y al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT);*

*Agradezco a todos los que contribuyeron con sus experiencias y conocimientos: al Dr. José de Jesús Medel Juárez por la formación, consejos y dedicación para este proyecto; al Dr. Pedro Guevara López por sus recomendaciones y asesorías; al Dr. José Luis Fernández Muñoz por los comentarios, consejos y apoyo que me brindo. Agradezco al Dr. José Antonio Irán Díaz Góngora y al Dr. José Antonio Calderón Arenas por su amable colaboración y la confianza que me otorgaron.*

*A mis compañeros y amigos del posgrado por sus comentarios, consejos y darme la oportunidad de aprender de ustedes.*

*A todo el personal del CICATA por todas sus atenciones desde que ingrese a este posgrado.*

*A mi familia por que han estado conmigo desde siempre, de todos y cada uno de ustedes hay una pequeña parte en este proyecto.*

*A todos mis amigos por confiar y creer en mí.*

*A todas las personas que me brindaron su apoyo y confiaron en mí durante la realización de este proyecto.*

*Gracias*

**Dedicado,**

*con cariño sincero a:*

**Mi familia:**

**A mis padres:** *Jesús y Rocío, por que siempre me han apoyado y acompañado en cada etapa de mi vida.*

**A mis abuelitos:** *Salvador y Lupita, por creer en mi, por su confianza y motivación que me dan a cada momento.*

**A mis hermanas:** *Rocío y Laura, por el cariño que me han brindado y por todas las cosas que me han enseñado.*

**A mis tías, tíos, primas y primos:** *por que siempre me han otorgado su confianza y apoyo que me han servido para seguir adelante.*

**A Dios:** *Gracias, por caminar junto a mi.*

*“Existe un rincón del universo que con toda seguridad puedes mejorar, y eres tu mismo.”*

Aldous Huxley

## ÍNDICE GENERAL

---

Índice de figuras	I
Glosario	II
Simbología	IV
Resumen	V
Abstract	VI

### **1. Descripción del problema**

1.1 Introducción	1
1.2 Planteamiento del problema	2
1.3 Objetivo	3
1.3.1 Objetivos específicos	3
1.4 Justificación	3
1.5 Límites y alcances	4
1.6 Metodología	5

### **2. Estado del arte**

2.1 Introducción	6
2.2 ¿Qué es un filtro digital?	7
2.2.1 ¿Qué es un filtro digital adaptivo?	7
2.3 Filtro difuso en tiempo real	8
2.3.1 Orígenes del filtrado difuso	9
2.3.2 Interpretación de niveles de operación	9
2.3.3 Funciones de membresía	10
2.4 Principios de tiempo real para el filtro difuso	11

2.4.1 Clasificación temporal	12
2.5 Aplicaciones del filtrado difuso	13
2.6 Conclusiones	13
<b>3. Filtrado difuso en tiempo real</b>	
3.1 Introducción	14
3.2 Función de membresía	15
3.3 Filtro digital difuso	17
3.4 Elementos del filtrado difuso	18
3.5 Reglas base e inferencia	19
3.6 Propiedades en tiempo-real	22
3.7 Conclusiones	25
<b>4. Simulación</b>	
4.1 Características de la simulación	26
4.2 Descripción del sistema de referencia	26
4.3 Estimación de parámetros	28
4.4 Identificación de estados	29
4.5 Funcional de error	30
4.6 Conclusiones	31
<b>Conclusiones</b>	32
<b>Bibliografía</b>	34
<b>Anexos</b>	38



## Índice de Figuras

2.1 Proceso de operación de un sistema difuso	10
2.2 Funciones de membresía de un filtro difuso	11
2.3 Sistema de tiempo real	12
3.1 Proceso de filtrado: Descripción	15
3.2 Área de control $T_N$ formada por el producto entre las secuencias $\{y(k)\}, \{\hat{y}(k)\}$	17
3.3 Adaptación del proceso de filtrado	18
3.4 Elementos del filtrado difuso	19
3.5 Subprocesos operación	21
3.6 Proceso de filtrado descrito en forma equivalente por una tarea	24
3.7 Operación de filtrado global	24
4.1 Niveles de respuesta $y(k)$	27
4.2 Estimación de parámetros $a(k)$ , con índice de evolución $k$ acotado en $[1,1000]$	28
4.3 Acercamiento de la figura 4.2, para observar estimación de parámetros	28
4.4 Identificación interna del estado $x(k)$ a través del FDDTR	29
4.5 Acercamiento de la figura 4.4, para observar al estado identificado	29
4.6 Convergencia de identificación al parámetro $\gamma^*$ vista ilustrativamente por el funcional $J(k)$	30
4.7 Funciones de membresía de acuerdo al funcional de error $J(k)$ para las variables lingüísticas	30
4.8 Funciones distribución del funcional del error $J(k)$ por rango	31

## Glosario

**ARMA:** modelo autoregresivo de promedios móviles.

**Base de conocimiento (BC):** conjunto de reglas definidas las cuales clasifican los niveles de respuesta de un sistema.

**Convergencia:** es descrita por la trayectoria hacia la región o espacio de probabilidad en donde se encuentran definidas un conjunto de variables de un sistema.

**Criterio de adaptación:** elemento de error requerido para establecer la función de membresía.

**Entropía:** es el grado de desorden que tiene un sistema.

**Estabilidad:** en un sistema de control la estabilidad es descrita por tener sus entradas y salidas acotadas.

**Filtro Adaptivo:** es un filtro realimentado, que ajusta su nivel de ganancia de acuerdo a una función objetivo en relación a la dinámica del sistema en análisis y llevándolo a una región de operación deseada.

**Filtro Digital:** Un filtro digital es un dispositivo de software o hardware que puede ser empleado en un sistema para: eliminar los errores de respuesta, Extraer información específica, Predecir su comportamiento futuro o Reconstruir algunos de sus estados anteriores.

**FDDTR:** filtro digital difuso en tiempo real

**Función de membresía:** conjunto de valores establecidos que clasifican los niveles de respuesta de un filtro difuso en tiempo real.

**Hard:** es un tipo de sistema en tiempo real que tiene características de tipo determinístico.

**Inferencia de entrada:** es la interpretación de la respuesta natural de los niveles de operación de un sistema en un sentido métrico.

**Inferencia de salida:** es la selección de una respuesta específica basada en la inferencia de entrada.

**Lenguaje natural:** para un filtro esta descrito de forma métrica y tiene una convergencia alrededor de un punto.

**Mecanismo de inferencia:** es la acción experta con respecto a las reglas base para seleccionar el mejor parámetro.

**Nivel de operación:** es el grado en que se encuentra funcionando un sistema (alto, medio, bajo).

**Proceso:** son una serie de acciones sistemáticas dirigidas al logro de un objetivo.

**Proceso ó sistema de referencia:** es una señal, un proceso o sistema que se encuentra interactuando con un filtro.

**Región:** se establece como un rango acotado definido dentro del círculo unitario en donde el sistema se considera estable.

**Reglas base:** son un conjunto de condiciones preestablecidas, de acuerdo a una entrada al filtro hay una salida específica, empleando operadores lógicos (Si-Entonces).

**Retroalimentación:** es el ajuste automático de las ganancias de un filtro de tipo adaptivo.

**Sistema en lazo cerrado:** es un sistema con retroalimentación.

**Soft:** es un tipo de sistema en tiempo real que tiene características de tipo estadístico.

**Subproceso:** representa una actividad que se genera dentro de un proceso.

**Tarea:** conjunto finito de actividades básicas que se ejecutan potencialmente en una computadora.

**Variable lingüística:** son variables cuyos valores se representan de forma lingüística.

## Simbología

$a(k)$  Parámetro del sistema de referencia que interactúa con el filtro

$\hat{a}(k)$  Estimación a través del filtro del parámetro  $a(k)$

$c_i$  Tiempo de ejecución

$c(k)$  Proceso de inferencia

$d_i$  Límite máximo de tiempo

$e(k)$  Error entre los valores de las variables  $y(k)$  y  $\hat{y}(k)$

$f_i$  Tiempo de finalizado

$J(k)$  Funcional del error descrito por el error cuadrático medio

$l_i$  Tiempo de arribo

$s_i$  Tiempo de inicio

$T_N$  Área de control del filtro

$u(k)$  Entrada del sistema de referencia

$y(k)$  Señal deseada, es la señal de salida del sistema de referencia e interactúa con el filtro.

$\hat{y}(k)$  Es la señal de salida del filtro que da seguimiento a la señal deseada  $y(k)$ .

$\gamma_*$  Condición que se considera óptima

## RESUMEN

---

Una de las herramientas tecnológicas empleadas para interactuar con procesos dinámicos son los filtros digitales, los cuales tienen diferentes utilidades como: la eliminación de errores de un sistema, extracción de información específica, reconstrucción y predicción del comportamiento de un sistema. Los filtros digitales tienen distintas aplicaciones y pueden emplearse en diversos tipos de sistemas: control, medicina, instrumentación, electrónica, computación, comunicaciones, etc.

Los sistemas tecnológicos de filtrado van encaminados a ser desarrollados con capacidades que les permitan dar un seguimiento a los procesos de forma natural. En la vida real podemos encontrar procesos con dinámicas de operación que requieren de aplicaciones tecnológicas que tengan mecanismos expertos en su construcción interna para que puedan dar respuestas de una forma adecuada con respecto a las variaciones de los diferentes estados de operación del proceso, teniendo una caracterización del mismo en la estructura interna del filtro y por medio de un mecanismo de inferencia, realizar una selección de la respuesta más adecuada que permita llevar al sistema de filtrado de una condición previa hacia un estado de equilibrio con el proceso con el cual interactúa.

En la actualidad los sistemas de filtrado digital tienen diversas áreas de desarrollo, por lo cual el estudio de este tipo de tecnología es importante. La caracterización de sus respuestas y un mecanismo de inferencia que pueda determinar cuál es la acción más correcta en cada instante de tiempo es una de las necesidades que se deben resolver para que el filtrado digital en un futuro sea aplicado a sistemas con propiedades más avanzadas relacionadas con movilidad, velocidad, interoperabilidad, integración, etc.

Basado en lo anterior en este proyecto se realizó un estudio de los sistemas de filtrado digital, considerando emplear un filtro digital adaptivo ya que cuenta con elementos que aportarán ventajas como: la posibilidad de ajustarse automáticamente, la capacidad de tener altos niveles de convergencia. De forma paralela se ha estudiado sobre otras áreas como control difuso y sistemas en tiempo real, las cuales serán de utilidad para desarrollar la teoría del tema de este proyecto titulado “filtro difuso en tiempo real”.

A continuación se da una descripción breve del contenido de cada capítulo:

**Capítulo 1:** Se desarrolla la problemática del proyecto, contiene una introducción al trabajo, se plantea el problema, objetivos, justificación, alcances y la metodología del proyecto.

**Capítulo 2:** Se describe el estado del arte, conceptos y características de los temas que abarca el proyecto, que son los filtros digitales, filtros adaptivos, orígenes del filtrado difuso, los sistemas en tiempo real, aplicaciones.

**Capítulo 3:** Desarrollo teórico del filtro difuso en tiempo real, se describen las funciones de membresía, las reglas base e inferencia, propiedades y elementos del FDDTR.

**Capítulo 4:** Se presenta la simulación del filtro, se describe el sistema de referencia, se emplea el filtro de Kalman, se presentan las gráficas y resultados de la simulación.

**Palabras clave:** Filtrado digital, filtrado adaptivo, lógica difusa, tiempo real.

## ABSTRACT

---

One of the technological tools most used to interact with dynamical processes are the digital filters, which work for different utilities as: the error elimination of a system, get specific data, reconstruct and predict the system operation. Digital filters have many applications to use in many systems: control, medicine, instrumentation, electronics, computation and communications.

The filter technological systems are designed to be developed with capacities as the ability to follow a process in a natural way. In the real life we can find systems with dynamical operation that requires technological applications with expert mechanisms into its internal construction in order to give answers dynamically to the different operation states of a system, moreover, having a characterization of it into its own filter structure and using an inference mechanism to select the correct response to perform a system trajectory from a previous condition to a balance state with the interaction process.

Actually, the digital filters systems have many developing topic areas; therefore the study about this topic is important. The characterization of a filter responses and the inference mechanism in order to allow us to find a correct action at each time is one of the requirements to solve in order to apply the digital filters in the future into systems with more advanced properties related with mobility, velocity, interoperability, integration.

Based in the previous paragraphs this project is a study of digital filters systems, considering to apply an adaptive filtering, because it has important elements that will give advantages as: the possibility to adjust its parameters automatically, the capacity to have high convergence levels. Meanwhile, in a parallel way this study contains topics as fuzzy logic and real time systems, which will be useful to develop the theory of this project titled: "real-time fuzzy digital filter".

Below, there is a general description of the content of the chapters:

**Chapter 1:** develops the problematic of the project, has an introduction of the chapter, describes the problem, objectives, justification, limits of the project, and the project methodology.

**Chapter 2:** describes the state of art, concepts and characteristics of the topics of this document, what are digital filters, adaptive filters, fuzzy filtering origins, real time systems and applications.

**Chapter 3:** Theory structure of the real-time digital filter, membership functions description, rules and inferences, properties and elements of the RTFDF.

**Chapter 4:** presents the filter simulation, describes the system reference, uses a Kalman filter, and shows graphics and results of the simulation.

**Keywords:** Digital filter, adaptive filter, fuzzy logic, real time.

# Descripción del problema

## 1.1 Introducción

En los últimos 30 años se han aportado contribuciones significativas en el campo de procesamiento de señales. Los avances en el diseño de circuitos digitales han sido la clave tecnológica de desarrollo que ha traído gran interés en esta área de conocimiento. En la actualidad existen diversos tipos de aplicación en donde se requieren tecnologías dinámicas que puedan responder de acuerdo a la evolución natural de su funcionamiento como son: las señales biológicas en medicina, los sistemas de información, las comunicaciones, sistemas espaciales, control y automatización, entre otras [19].

Actualmente la tecnología de filtrado digital está encaminada al procesamiento de señales diversas en forma de tareas, cada vez requiriendo mayor eficiencia y capacidad de integrarse a diferentes sistemas, para ofrecer funciones y servicios de mayor alcance y flexibilidad, buscando que puedan ser implementados en procesos cada vez más complejos y a diversas escalas, en donde se pueda tener una interacción de tipo híbrida entre sistemas a través de un mecanismo de inferencia en el proceso de filtrado de tipo adaptivo, que tenga la capacidad de interpretar cada acción de un proceso de referencia y ofrecer una respuesta adecuada para retroalimentar al mismo, realizando los ajustes necesarios en sus parámetros para llevarlo a una región de operación indicada; donde es posible aportar mayor dinamismo en el funcionamiento de los mismos al poderse adaptar en cada espacio de tiempo a los diversos medios físicos que varían de forma continua y a sus condiciones cambiantes (climáticas, geográficas, horas pico, contingencia) con las que interactúan, para poder así responder de acuerdo a ellos, en tiempo real y que estén de acuerdo con las características de operación adecuada a cada instante temporal acotándolas en una región [8].

Los filtros digitales en general deben estar diseñados de acuerdo a un punto de equilibrio que corresponda a una región de estabilidad, para que pueda dar una respuesta apropiada basada en la dinámica y entorno del sistema de referencia con el que se encuentra interactuando [13, 15]. La señal que recibe un filtro digital desde un sistema de referencia debe ser emitida en base a la información que se percibe acerca de las condiciones del medio físico empleando sensores o actuadores y de acuerdo con ella simplemente debe adaptarse a los cambios del entorno de forma dinámica. Los sensores operan por efectos de la luz, calor, presión, radar y otras formas de energía.

Si los parámetros de un sistema cambian, el filtro estará estimando estos cambios y retroalimentándolos para que la respuesta esté actualizada, teniendo la certeza de que los parámetros estimados serán equivalentes con los actuales a lo largo del tiempo en un sentido de probabilidad, esto es realizado con el empleo de filtros adaptivos [13, 15].

La problemática que se requiere resolver en este proyecto es el desarrollo de un sistema de filtrado que sea capaz de inferir la respuesta más adecuada para retroalimentar a un sistema de referencia con el que se encuentre interactuando; de acuerdo con la dinámica del sistema mismo y de sus diversos niveles de operación, para que de esta forma el filtro tenga un seguimiento natural del mismo y de esta forma lo retroalimente para ajustar su operación a una condición adecuada [28, 31, 36]. Para realizar un filtro digital adaptivo con estas propiedades es necesario que este cuente con un mecanismo de inferencia por medio del cual el sistema de referencia sea clasificado y caracterizado de acuerdo a sus diversas variables y niveles, para esto, se buscará que la interacción de un sistema por medio del filtro sea lo más natural posible empleando la teoría de lógica difusa, tiempo real [5, 12, 39]. Este trabajo traerá ventajas que se mencionan a continuación:

1. *Resulta una solución más robusta para los diversos sistemas.*
2. *Mayor capacidad de servicios y funcionalidades.*
3. *Uso de un menor número de procesadores.*
4. *Reducción del tamaño de sistemas con múltiples funciones.*
5. *Procesamiento basado en la evolución natural del sistema de referencia.*

## **1.2 Planteamiento del Problema**

La mayoría de los sistemas empleados en la práctica son estáticos. Esto quiere decir que no contemplan la característica de operar de acuerdo a la dinámica natural de un proceso, de acuerdo a esto, únicamente pueden dar respuestas realizando mapeos de sistemas lineales y no lineales, pero al no tener la capacidad de ser adaptables, no es posible seguir la evolución natural de un proceso. Esta desventaja obstaculiza su empleo de forma más amplia en áreas tales como modelos dinámicos, predicción y control.

Con un filtro digital común no es posible realizar la caracterización de las variables y niveles de operación del sistema de referencia con el que interactúa; Por lo cual no tiene la capacidad de distinguir las etapas naturales de evolución que tiene un proceso, y reconstruir así sus dinámicas a diferentes niveles como en las señales biológicas ó señales de control. Para el desarrollo de un filtro difuso y plantear su mecanismo de operación, es necesario encontrar la región de operación del mismo para que de esta forma pueda caracterizar sus respuestas; también, se deben contemplar su descripción de funcionamiento en tiempo real y las características que tendrá para realizar la inferencia difusa al interactuar con un sistema de referencia.



## 1.3 Objetivo

El objetivo de este trabajo es el desarrollo de un Filtro Digital Difuso en Tiempo Real para encontrar la región de interacción y reconstrucción de sistemas del tipo ARMA.

### 1.3.1 Objetivos Específicos:

Describir las características de un FDDTR en el sentido de:

- ✦ Lógica difusa,
- ✦ Filtrado adaptivo,
- ✦ Filtrado en tiempo real.

## 1.4 Justificación

Dado que por un filtro digital no es posible tener una interacción, caracterización y reconstrucción de sistemas de referencia tipo ARMA con distintos niveles de operación para ofrecer diferentes niveles de respuesta, en este proyecto se realizará el desarrollo de las características de operación de un filtro digital difuso en tiempo real (FDDTR), que por medio del cual, se podrá lograr reconstruir sistemas de referencia con estas características, por medio de un mecanismo de inferencia que los caracterice y clasifique a través del FDDTR ofreciendo respuestas a distintos niveles de operación para retroalimentar al sistema de referencia.

El FDDTR será desarrollado en base a una retroalimentación interna y una base de conocimiento que contiene un conjunto de funciones que caracterizan el comportamiento de un sistema de referencia de acuerdo a la información que se tiene a la entrada del filtro, que es descrita como una señal deseada, para seleccionar la respuesta correspondiente, de esta forma, el filtro difuso ofrece una continua actualización de sus parámetros para adaptarse de forma dinámica a las especificaciones del sistema de referencia con el que interactúa.

El FDDTR, estará basado en un filtro de tipo adaptivo y por esto tendrá la característica de ser dinámico, también, tendrá propiedades de tiempo real, esto lo hará mas eficiente al manejar las características de tiempo en sistemas y procesos que deben tener una respuesta precisa en su operación, es por ello la importancia de realizar este proyecto que se enfoca en el desarrollo de un Filtro Difuso en Tiempo Real, y superar de esta forma las desventajas de los sistemas actuales aportándoles un sentido dinámico y de tiempo real.

## 1.5 Límites y alcances

El proyecto cuenta con una serie de límites que permiten acotar al FDDTR y dar sus propiedades fundamentales que lo describen, al considerar los conceptos de lógica difusa, filtrado digital, tiempo real, filtrado adaptivo, y de teoría de probabilidad.

- ✦ No se trabajará con filtros digitales tradicionales, servirán de base para el desarrollo.
- ✦ Solo se trabajarán con simulaciones y no con sistemas reales.
- ✦ Se usarán modelos con propiedades de estabilidad en espacios discretos.
- ✦ La interacción de los modelos será en forma discreta.
- ✦ Se considera que el FDDTR utiliza técnicas adaptivas.
- ✦ La base del conocimiento es dinámica.
- ✦ Las funciones de membresía son dinámicas y acotadas.
- ✦ Los intervalos de interacción son finitos y acotados.
- ✦ Las respuestas del FDDTR son acotadas en el sentido de Nyquist.
- ✦ Se desarrollará el FDDTR como un todo al considerar sus propiedades de: Lógica difusa, Tiempo Real, adaptabilidad en relación a la base del conocimiento.
- ✦ Se realizaran pruebas y simulación de un FDDTR.
- ✦ Se realizarán artículos de revista sobre el tema.
- ✦ Se realizarán artículos de congreso.

## 1.6 Metodología

Con base al método científico, que consiste en la realización de una serie de procesos específicos mediante un conjunto de reglas ordenadas y bien definidas que permitan obtener resultados fiables [10, 20, 55].

**Observación:** en este paso se verifica de una forma general las características de la problemática del proceso de filtrado actual, cuáles son sus límites y alcances.

**Recopilación de información:** se utilizará la técnica documental con la recopilación de información en revistas científicas, libros, entrevistas de acuerdo a los temas sobre filtros, lógica difusa y tiempo real, para determinar la solución del problema.

**Formulación de la hipótesis:** de acuerdo a la información recopilada y a los datos observados se plantea como hipótesis: es posible desarrollar un filtro difuso en tiempo real del tipo suave.

**Desarrollo Teórico:** en esta etapa se desarrolla las bases y fundamentos teóricos del filtrado digital difuso en tiempo real, para verificar teóricamente la formulación de la hipótesis.

**Verificación:** en esta etapa se puede comprobar la hipótesis al realizar pruebas y simulaciones en condiciones controladas, empleando en este caso como herramienta el programa de Matlab<sup>®</sup>, obteniendo graficas del funcionamiento del filtro, se observa el fenómeno, se verifican variables.

**Conclusión:** se generalizan los resultados y se emite una teoría.

**Comunicación:** divulgación de los resultados en congresos y revistas científicas.

---

# Estado del arte

## 2.1 Introducción

En el universo existen gran diversidad de especies o formas de vida de acuerdo a las ideas que han sido expuestas por el científico Stephen Hawking, las cuales presentan distintas características de comportamiento que favorecen sus condiciones de vida para que puedan tener adaptabilidad a su medio de desarrollo a lo largo de su existencia temporal o generacional [19, 27 y 30]. De tal forma que la inteligencia es abundante en todos los ámbitos de la naturaleza y puede ser visualizada de forma natural en aspectos tales como: *la apreciación de la realidad a través de nuestros sentidos, el reconocimiento de las cosas, el ordenamiento de pensamientos o ideas, la formación mental de imágenes entre otras de sus propiedades [3 y 6].*

Todas estas formas de inteligencia humana han servido al hombre en su deseo de lograr que sus herramientas sean más amigables para facilitar sus tareas diarias, y es por esto que busca extraer los conceptos de inteligencia necesarios encontrados en la naturaleza, para que sus sistemas o desarrollos se encuentren en armonía en un medio ambiente propio de su entorno, de tal forma que sus herramientas se adapten de manera aproximada a las diversas situaciones, necesidades, costumbres e interacciones que se tienen en un medio natural específico. Es decir, el hombre busca que sus herramientas tengan una interacción de acuerdo a él mismo y su medio de desarrollo [19, 29, 30 y 49].

La adaptación a situaciones distintas es congruente con la evolución de la ciencia y la tecnología. La sociedad cuenta con cambios que son cada vez más acelerados, donde se hace uso de múltiples tecnologías como lo es la computación flexible (concepto utilizado para describir a los sistemas computacionales que se adaptan a diversos ambientes); para ofrecer al usuario final una relación “natural” que esté de acuerdo a un ambiente específico [12 y 22].

Para lograr que dos o más sistemas puedan tener una participación activa y equilibrada, de acuerdo a sus diversas reacciones en relación a un objetivo, las cuales deben ser clasificadas y caracterizadas, requiriendo para ello de un mecanismo que deduzca sus cambios y permita responder de acuerdo a la dinámica establecida entre ellos, para lo cual puede ser utilizado el filtro digital difuso en tiempo real (cuyo concepto se ve más adelante), ya que a través de él es posible predecir los comportamientos de interacción y tomar las decisiones correspondientes por cada uno de ellos, para llevarlos a una región de equilibrio; es decir, que cuenten con una relación en la que ambos logren su objetivo específico de acuerdo a un criterio entre ellos definido ya sea de manera directa o indirecta [24 y 30].

El filtrado difuso es una herramienta de control relativamente nueva, la cual puede emplear los conceptos de inteligencia y ser aplicada en diversas áreas del conocimiento: información, espacial, comunicaciones, redes neuronales, medicina, sistemas de control, entre otros. Las capacidades que presenta este tipo de filtrado son las de interpretar y caracterizar el funcionamiento de un sistema para emitir la respuesta más apropiada, en un lenguaje natural.

Para profundizar más acerca del funcionamiento que tiene un filtro difuso, se realizará una descripción breve de lo que es un filtro digital, y de cuales son las características que componen a un filtrado difuso, así como sus propiedades de filtrado en tiempo real.

## 2.2 ¿Que es un filtro digital?

Un filtro digital es un dispositivo de software o hardware que puede ser empleado en un sistema para: *Eliminar los errores de respuesta, Extraer información específica, Predecir su comportamiento futuro o Reconstruir algunos de sus estados anteriores* [17 y 18].

Los principales expositores de esta área del conocimiento son Haykin y Gustafsson, los cuales consideran que un filtro digital puede ser programado en algún software de computadora o en un chip electrónico, pero que son algoritmos o un grupo de reglas que están encaminadas a extraer alguna propiedad del sistema en análisis [17 y 18].

En base a la información previa, procedemos a realizar la descripción de un filtro digital difuso en tiempo real.

### 2.2.1 ¿Qué es un filtro digital adaptivo?

De acuerdo con Haykin, es un filtro realimentado, que ajusta su nivel de ganancia expresada como  $a(k)$  de acuerdo a una función objetivo en relación a la dinámica del sistema en análisis y llevándolo a una región de operación deseada expresada como  $J(k)$ .

Esto significa que el filtro digital se va adaptando dinámicamente a las propiedades que tiene el sistema con el que interactúa en un entorno dinámico [2, 5].

Respecto de los filtros digitales tradicionales, esta clase de filtros, permite obtener un ahorro significativo en su operación ya que a través de sus algoritmos que se ajusta de forma automática, se logra casi su completa autonomía de operación, permitiendo al usuario final tener información verídica y a tiempo respecto del sistema en análisis.

En relación con la naturaleza, sus acciones han sido limitadas, ya que no cuentan con un lenguaje natural de descripción que les permita dar una respuesta "aceptable" por el

usuario final. Para ello se desarrollaron los filtros difusos, los cuales consideran estas limitaciones de los filtros adaptivos, para ser en ellos su principal propiedad [17, 18].

## 2.3 Filtro Difuso en Tiempo Real

Es un filtro digital de tipo adaptivo que utiliza la lógica difusa al error de convergencia respecto de la salida del modelo y una señal de referencia y el tiempo real en su operación de retroalimentación y convolución [17 y 18].

Una de las principales características de un filtro digital difuso a diferencia de un filtro convencional es que éste puede clasificar la dinámica de un sistema, para que pueda ofrecer una serie de respuestas a diferentes niveles, y poder tener una interacción que esté de acuerdo a las condiciones cambiantes del medio ambiente que lo rodea, a través del tiempo [11, 13, 41 y 45].

Un filtro difuso presenta las siguientes características de funcionamiento:

- a) Interacción dinámica con un modelo por medio de la realimentación,*
- b) Propiedades estadísticas para caracterizar su funcionamiento,*
- c) Mecanismo de inferencia para interpretar sus niveles de operación (seleccionar las ganancias del filtro) y determinar su respuesta,*
- d) Base de conocimiento para elegir la mejor ganancia para emitir una respuesta deseada (formada por el conjunto de funciones de membresía que quedan acotadas por la estabilidad del modelo considerado),*
- e) Filtrado para describir las dinámicas internas y externas del modelo de referencia,*
- f) Salida del filtro que converge a una señal de referencia y que es adaptable a las condiciones cambiantes de su entorno.*

En todo el proceso de filtrado se contemplan las condiciones de tiempo antes de que cambie a otro estado y dar una respuesta respecto del modelo de referencia dentro del tiempo especificado, incluyendo en ello su retroalimentación [7, 16 y 53].

### 2.3.1 Orígenes del Filtrado Difuso

Las ideas básicas de la lógica difusa se encuentran vinculadas con las aportaciones iniciales desarrolladas por Zadeh en 1965, respecto a los conjuntos difusos; siendo uno de

sus principales objetivos el de utilizar un razonamiento aproximado, que a diferencia de la lógica clásica, que requiere ideas precisas, logra establecer una relación por medio del lenguaje natural con el sistema con que esta interactuando. Es por esta razón, que la lógica difusa en los últimos diez años es aplicada para el desarrollo tecnológico de sistemas en los que se consideran distintos niveles de operación [1, 41, 40 y 60].

Diversas compañías en el ámbito internacional se han interesado en usar la lógica difusa en el desarrollo de sus productos y servicios para tener condiciones de operación más amigables y menos costosas para los consumidores; siendo estas, ventajas competitivas así como representativas para el mercado actual. Además, al utilizar la lógica difusa aplicada a los sistemas de control se logra obtener un ahorro de energía considerable, un manejo más adecuado de la información imprecisa, y la forma de interactuar con los sistemas es más robusta (porque cubre diferentes condiciones en su operación) ya que las acciones de control requeridas son establecidas por intervalos (conjunto de variables que tienen un valor de alcance máximo, por ejemplo la velocidad que se indica en un velocímetro de automóvil) a los que se les da el nombre de funciones de membresía [24, 52, 36 y 60].

En la actualidad los sistemas difusos se emplean como una herramienta para controlar el transporte subterráneo, sistemas industriales complejos, equipos electrónicos, sistemas de diagnóstico de enfermedades, entre otros sistemas a los que se les conoce como sistemas expertos (son una clase de los sistemas computacionales del área de inteligencia artificial que clasifican o deciden de manera independiente las acciones correspondientes a tomar en relación al sistema a observar o controlar) ya que tiene una relación “natural” con su entorno, y de acuerdo a este realiza acciones que afectan el desempeño del sistema que se desea controlar en un límite determinado [31, 38, 40, 44 y 60].

### **2.3.2 Interpretación de Niveles de Operación**

La lógica difusa hace uso de diversas variables lingüísticas que son elegidas con relación al sistema con que interactúa, en su mayoría estas variables son palabras que representan valores cualitativos y que al ser utilizadas en un procesador por medio de un teclado o sensores, son interpretadas por la computadora o sistema para ofrecer un control lo más preciso posible y llevarlo a una región de operación deseada en un tiempo específico [22, 24, 31, 37 y 60].

Un sistema difuso se considera estable (es decir que se mantiene operando sin modificaciones durante cierto tiempo específico), ya que todas las variables y respuestas se encuentran delimitadas por las restricciones del proceso con el que interactúa a través de la base del conocimiento.

El sistema difuso contiene todos los niveles de respuesta que puede dar el proceso, por lo cual todas las posibles respuestas estarán acotadas dentro de regiones predefinidas.

La clasificación de los niveles de respuesta que tiene un sistema difuso se realiza por medio de funciones de membresía que están constituidas por reglas que usan a los conectores lógicos SI (interpreta la señal de entrada), ENTONCES (deduce la salida), para conformar la base de conocimiento [41, 45, 46 y 44].

Por medio de una inferencia entre la señal deseada  $y(k)$  y la señal de salida del filtro  $\hat{y}(k)$  que se realiza a la entrada del sistema difuso obteniendo un error  $e(k)$  para identificar a la variable lingüística y se obtiene el nivel de operación (por ejemplo una variable lingüística puede ser la temperatura y sus niveles de operación son cálida, tibia, fría, o los grados que hay entre ellos) [1, 40, 46 y 60].

A continuación buscará en la base del conocimiento la regla que corresponda en cada caso, de esta forma se realizarán las operaciones correspondientes para que en la inferencia a la salida del sistema difuso se obtenga la respuesta más adecuada ya sea esta por medio del lenguaje natural o por una acción específica en un intervalo de tiempo predefinido, como se ve en la Figura 2.1

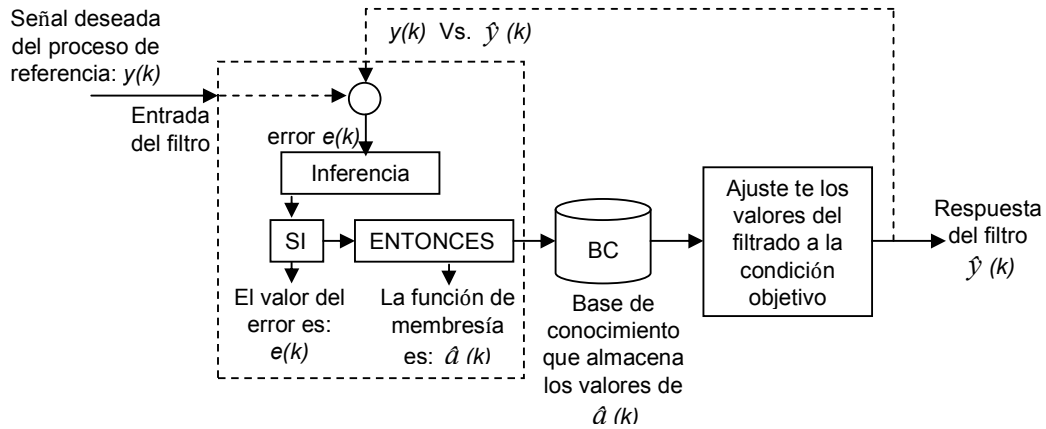


Figura 2.1 Proceso de operación de un sistema difuso

### 2.3.3 Funciones de Membresía

Para realizar la clasificación de las respuestas de un sistema por medio de la lógica difusa se puede caracterizar: a) por medio del conocimiento experto adquirido del sistema por su operador o controlador y b) de forma probabilística, al establecer los rangos de operación así como las funciones de distribución que acotan sus respuestas [31, 38, 44, 52 y 56]. En cualquiera de los dos casos se generan funciones de membresía (valores de  $\hat{a}(k)$ ) que estén de acuerdo con la función de operación del sistema por medio de una envolvente en la que quedan acotados los diferentes grados o niveles en que opera el sistema en análisis, y que en forma ilustrativa se observa en la Figura 1.2.



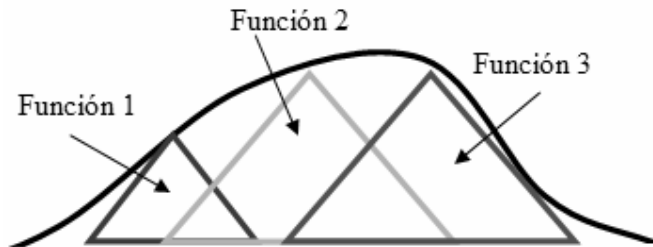


Figura 2.2. *Funciones de membresía de un filtro difuso*

## 2.4 Principios de Tiempo Real para el Filtro Difuso

Para poder establecer, diseñar y aplicar el filtrado en tiempo real a los procesos industriales y nuevas tecnologías en el campo de los sistemas de monitoreo, control e información, en donde son consideradas algunas condiciones y características específicas con una duración de tiempo específico, para lograr que sus respuestas o interacción sean realizadas de forma adecuada conforme al funcionamiento y dinámica del sistema en cuestión y así responder satisfactoriamente bajo un criterio de optimización seleccionado para actualizar al sistema, por ejemplo el lograr que la respuesta llegue a tiempo y de buena calidad [7, 16 y 21].

En la vida diaria se pueden encontrar diversos sistemas, los cuales, son capaces de poder cumplir con condiciones de tiempo específico, los primeros sistemas en tiempo real fueron empleados en la telefonía digital, estos sistemas ahora, se pueden encontrar en gran cantidad de aplicaciones como en la medicina, control de tráfico, procesos industriales, etc.

Un sistema en tiempo real de acuerdo con [16], es un sistema que tiene una interacción dinámica con un proceso físico, en relación con sus entradas, salidas y sus restricciones temporales, y que a partir de las cuales debe ofrecer respuestas correctas. En la Figura 1.3, se describen la región en la que una respuesta es correcta en el sentido de tiempo real [16, 21 y 51].

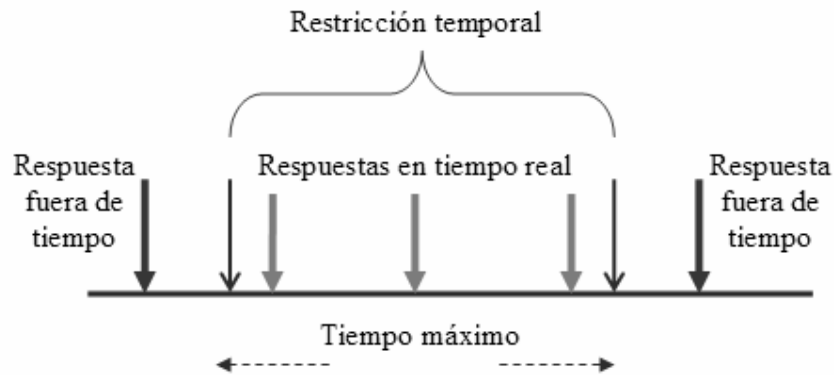


Figura 1.3. *Sistema de tiempo real.*

## 2.4.1 Clasificación Temporal

Los sistemas en tiempo real son clasificados de acuerdo a la duración en que son emitidas sus respuestas, tomando como base el intervalo temporal especificado para dar una respuesta en un proceso determinado, de esta forma pueden estar clasificados en determinísticos, probabilísticos e inflexibles [7, 16, 21, 23 y 26]:

En los sistemas en tiempo real determinísticos sus respuestas deben darse de forma obligatoria dentro de los periodos de tiempo especificados para el proceso, por ejemplo, en la medicina los marcapasos artificiales y los controladores de procesos industriales, tienen que cumplir con sus restricciones de operación temporales.

Los sistemas en tiempo real probabilísticos (es la categoría del filtrado difuso en tiempo real) presentan condiciones temporales acotadas en un sentido de distribución, sin embargo, si en alguna ocasión no se cumplieran en promedio los plazos de tiempo establecidos para responder, el sistema continuará funcionando de forma correcta siempre y cuando en el sistema este contemplada una variación de alcance máximo para sus tiempos de respuesta promedios; estos sistemas son conocidos también como estadísticos y se pueden aplicar en las comunicaciones cuando existen múltiples accesos compartidos y es necesario actualizar dinámicamente un número de sistemas conectados con situaciones cambiantes [16 y 23].

Los sistemas en tiempo real inflexibles son sistemas de tipo determinísticos o probabilísticas, pero que no cumplen con las restricciones de tiempo de acuerdo al caso, de forma tal que el sistema dejará de funcionar y no entregará ninguna clase de resultados congruentes, como ejemplo pueden encontrarse situaciones en donde un servidor de computadoras se satura, deja de dar respuestas [23 y 26].

## 2.5 Aplicaciones del Filtrado Difuso

El problema que resuelve este tipo de filtrado es su operación por niveles respecto de un grupo de criterios establecidos en relación al sistema de referencia con el que interactúa. Por lo cual no tiene la capacidad de distinguir la evolución natural del proceso, como en las señales biológicas ó señales de control.

Se puede tomar como ejemplo que al realizar un diagnóstico del funcionamiento del corazón utilizando electrocardiograma, que es el instrumento que mide las señales biológicas (y emplea filtros convencionales en su interior), se realiza un sondeo del estado del paciente en unos minutos, es decir una fotografía que sólo refleja las condiciones del paciente en un momento específico y bajo un criterio establecido, posteriormente estos resultados son impresos e interpretados por el médico especialista para determinar la problemática del paciente. Con un filtro difuso aplicado a este tipo de sistemas se podría sondear al corazón del paciente tomando en cuenta las variaciones de las condiciones del paciente en el progreso de la secuencia, de esta forma poder interpretarlas en tiempo real, y dar un diagnóstico más preciso.

## 2.6 Conclusiones

En este capítulo se han presentado las características que tiene un filtro digital difuso en tiempo real (FDDTR), se mencionaron algunas áreas para su aplicación, así como algunas ventajas de su utilización en la vida diaria. Se describieron también las características de lógica difusa y tiempo real que presenta el filtrado digital difuso, que son empleadas para el desarrollo del filtro difuso. El FDDTR en un futuro podría llegar a ser una herramienta importante capaz de ser empleada en diversos sistemas y procesos dinámicos que tengan características más complejas, como la descripción de sistemas que presentan diferentes niveles de operación y darles un seguimiento adecuado; es por esta razón que el siguiente paso en el desarrollo de esta teoría desde un punto de vista analítico es el determinar su operación como una red neuronal.

## Filtrado difuso en tiempo real

### 3.1 Introducción

Un sistema de filtrado difuso funciona en lazo cerrado, de esta forma el filtro va adaptando el conjunto de parámetros de manera dinámica (ver: [2, 18, 22 y 45]). Comúnmente, el criterio de adaptación está basado en el error de la señal  $|e(k)| \subseteq [0,1)$  ([18 y 22]) optimizando la velocidad en que es obtenida la estimación de la señal deseada. El error  $e(k)$ , está definido como la diferencia que existe entre las respuestas deseadas del proceso (que pueden ser descritas como:  $y(k) \in \mathbb{R}$ ) y la señal identificada  $\hat{y}(k) \in \mathbb{R}$  ([18, 22 y 45]) que es generada por medio de un esquema de identificación\* .

El criterio de adaptación (utilizando el concepto de lazo cerrado [45]) previamente seleccionado, es el primer elemento requerido para establecer la función de membresía, en donde se busca la señal identificada  $\hat{y}(k)$  que más se aproxima a la señal deseada  $y(k)$ , ajustando los parámetros del filtro dinámicamente en relación con la base del conocimiento, tal que el valor del error  $e(k)$  tiene una convergencia cercana a un círculo con radio  $\gamma > 0$ , previamente definido [37], que es una vecindad acotada respecto del valor real.

De forma conceptual, cada función de membresía se encuentra dentro de la función de distribución que describe al error  $e(k)$ . Es decir, la mejor aproximación que existe entre la función de membresía con respecto a la función de distribución en el sentido de Borel, es la forma triangular [4, 32, 48 y 60].

En general, el filtro difuso de acuerdo a los conceptos estudiados en [1, 2, 17, 18, 22, 24, 28, 34, 35, 37, 41 y 44] contienen los siguientes elementos:

1. *Inferencia de entrada*: la respuesta natural o lingüística del proceso de referencia es la entrada del filtro [31], la cual es transformada en un sentido métrico [4 y 48].

---

\* La diferencia que hay entre el estimador y el identificador es que el primero describe la evolución de los parámetros, y el segundo describe el estado de la velocidad [37].

2. *Reglas base*: Son métricas con rangos dinámicos respecto de las funciones de membresía acotadas por la función de distribución del error  $e(k)$ , empleando el conector de lógico *Si* (IF).
3. *Mecanismo de inferencia*: La acción experta con respecto a las reglas base es conocida como consecuencia, y emplea el conector lógico *Entonces* (THEN) para seleccionar al mejor parámetro o parámetros para ajustar al filtro y llevarlo a una respuesta deseada.
4. *Inferencia de salida*: Se transforma la salida del filtro en una respuesta natural o lingüística de acuerdo al proceso en que se encuentra contenido y así en relación a la base del conocimiento definida previamente.

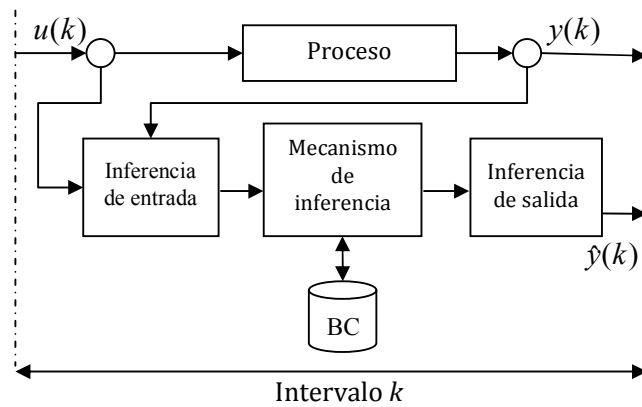


Figura 3.1. Proceso de filtrado: Descripción.

### 3.2 Función de Membresía

Un filtro difuso emplea una función de distribución respecto de la señal de error  $e(k)$  ([17, 18 y 37]), de tal manera que se pueda generar una función de membresía ([1, 3, 11, 14, 15, 41 y 44]) de acuerdo al rango de intervalos que es requerido para el algoritmo de adaptación ([2, 34, 35, 50 y 51]) y a la función objetivo, previamente establecida.

Cada función de membresía es ajustada de forma adaptable, teniendo en cuenta a la función objetivo y a la función de distribución del error, teniendo en cuenta los intervalos distribuidos uniformemente en donde se tiene descripción por  $n$ -ciles,  $n \in \mathbb{Z}_+$ , en cada tiempo con respecto a la densidad de la información en la inferencia difusa de entrada [48].

El criterio más utilizado en la literatura como función objetivo es el de la minimización del segundo momento de probabilidad del error, (ver: [11, 14, 17, 18 y 37]), él cual es expresado de forma recursiva:

$$J(k) = \left[ \frac{1}{k} \left( (k-1)J(k-1)^2 + e(k)^2 \right) \right]^{\frac{1}{2}}, \text{ con } k \in Z_+, J(k) \subseteq [0,1]. \quad (1)$$

De acuerdo a los conceptos de filtrado difuso [17 y 18], cada regla define una función de membresía que se encuentra limitada por una secuencia específica respecto de los rangos de operación en los cuales se considera correcta.

El objetivo que tiene el filtrado difuso como caja negra es dar una respuesta natural o lingüística descrita como  $\hat{y}(k)$  con respecto de la señal deseada  $y(k)$ ; limitada por la función de distribución del funcional de error  $J(k)$ , que de acuerdo a los operadores lógicos se determina la acción del filtro difuso utilizando a la base del conocimiento, y que a través de la inferencia de salida se tiene una respuesta natural o lingüística, entre las cuales podemos encontrar las palabras: bajo, medio, o alto.

La base de conocimiento en un sentido métrico [4] contiene al conjunto de parejas formadas por el producto entre conjuntos métricamente expresados por  $Y(k) \times \hat{Y}(k) \in \mathbb{R}^2$  y definido simbólicamente como  $T_N \in \mathbb{R}_{2[1,N]}^2$ , formado por el conjunto deseado  $Y(k) = \{y(k)\}$  y el conjunto de identificación  $\hat{Y}(k) = \{\hat{y}(k)\}$ :

$$T_N = \{(y(k), \hat{y}(k))\}_{k=1}^{2 \times N} \subseteq \mathbb{R}_{2[1,N]}^2. \quad (2)$$

Cada función de membresía establece el valor de correspondencia máximo que hay entre la salida  $\hat{y}(k)$  y la señal deseada  $y(k)$ , donde el valor óptimo se fija en el costo ínfimo para cada secuencia. De manera ilustrativa en la Figura 3.2, se observa que dentro del área de control (descrita como  $T_N$ ) se tiene un subconjunto de convergencia por pares ordenados.

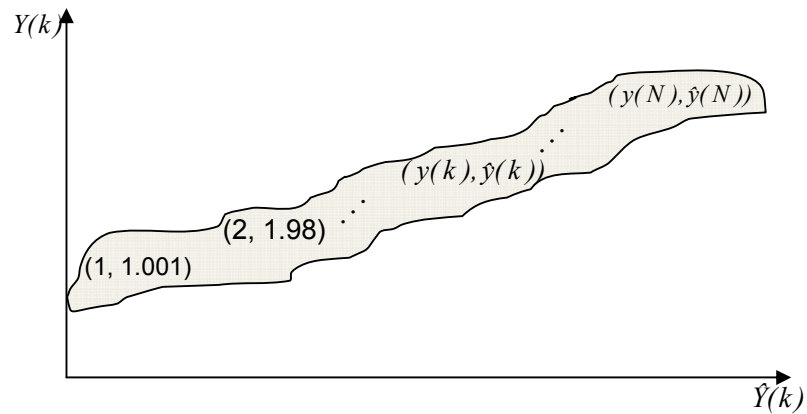


Figura 3.2. Área de control  $T_N$  formada por el producto entre las secuencias  $\{y(k)\}$ ,  $\{\hat{y}(k)\}$ .

Matemáticamente, la correspondencia de los pares está descrita por:

$$J_{\min} = \inf_N \{ \min J(y_0, \hat{y}) \}_{N} \cdot \quad (3)$$

### 3.3 Filtro Digital Difuso

La adaptación como una ley de realimentación modifica la señal de entrada al filtro (ver la Figura 3.3) de acuerdo al objetivo en donde la señal de salida de éste ( $\hat{y}(k)$ ) se busca que tienda a la señal deseada  $y(k)$ , realizando así los cambios en los parámetros del filtro.

El filtro difuso clasifica sus diferentes niveles de operación con respecto al conjunto de funciones de membresía, para dar el valor de la respuesta específica en un lenguaje natural de acuerdo con  $J_{\min}$ , que está limitado por el radio de un círculo y en un sentido métrico [4, 48].

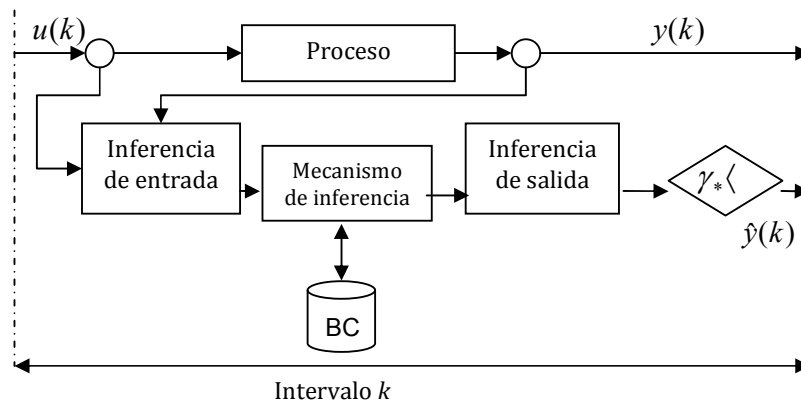


Figura 3.3. Adaptación del proceso de filtrado

La clasificación de la respuesta del sistema  $y(k)$  que realiza el filtro difuso, está determinada por el valor de las ganancias de sus parámetros de acuerdo a la función de distribución de  $J(k)$ , realizando una selección del criterio óptimo dentro de un conjunto de funciones de membresía disjuntas por pares [38]. Estas regiones permiten seleccionar a los mejores valores para ajustar la entrada del filtro, considerando los mecanismos de inferencia.

Dentro de la etapa de inferencia, la clasificación de las funciones de membresía (de acuerdo con [4, 48, 54 y 60]) se establece el funcional de error  $J(k)$ , en el sentido de Borel. Cada función de membresía se encuentra establecida dentro de la función de distribución del error, en un intervalo descrito como criterio (ver: (1)) basado en el sentido de Lebesgue [50], permitiendo que cada una de ellas sea expresada de forma recursiva de acuerdo con (ver: [17, 18, 32, 37 y 50]).

### 3.4 Elementos del Filtrado Difuso

En el filtrado difuso, la base de conocimiento contiene toda la información que el filtro requiere para ajustar sus ganancias de una manera óptima<sup>1</sup> y dar una respuesta correcta, cumpliendo con el rango de convergencia, dentro de un intervalo de tiempo (indexado con  $k \in Z_+$ ) de acuerdo con Nyquist [51], sin perder las propiedades de estabilidad [17 y 18], que son dadas por la respuesta observable obtenida a la salida del filtro.

De acuerdo con la Figura 3.3, se tiene:

<sup>1</sup> En un lenguaje natural, la convergencia esta alrededor de un punto, que es conocido como óptimo, pero con una descripción métrica (dentro del filtro), la convergencia es robusta porque está definida por intervalos.



$y(k)$ , es un valor medible que está clasificado en rangos de forma lingüística (descritos en un espacio de estados variable delimitado simbólicamente de forma natural con expresiones lingüísticas como alto, medio, bajo),

$T(k)$ , es el área de control descrita en pares formados por  $\hat{y}(k)$  y  $y(k)$ , que están limitados en un intervalo de tiempo (tiene una velocidad de cambio delimitada en el sentido expuesto en [37]),

$e(k)$ , es el valor definido por la diferencia entre  $\hat{y}(k)$  y  $y(k)$ , este valor está delimitado por el conjunto  $\{\gamma_i : \gamma_i > 0, \forall i \in Z_+\}$ ,  $\inf\{\gamma_i\} \rightarrow |\lambda^*|$ , tal que  $|\lambda^*| > 0$ ,  $\sup\{\gamma_i\} \rightarrow |\lambda^*|$ ,  $|\lambda^*| < 1$ , en donde  $\hat{y}(k)$  se busca que converja a  $y(k)$  de forma métrica, y que en un sentido lingüístico, ambos representan el mismo valor natural.

El siguiente diagrama a bloques descrito en la Figura 3.4, muestra la parte del filtro digital difuso en donde el universo de discurso afecta el rango de la respuesta de salida de  $\hat{y}(k)$ .

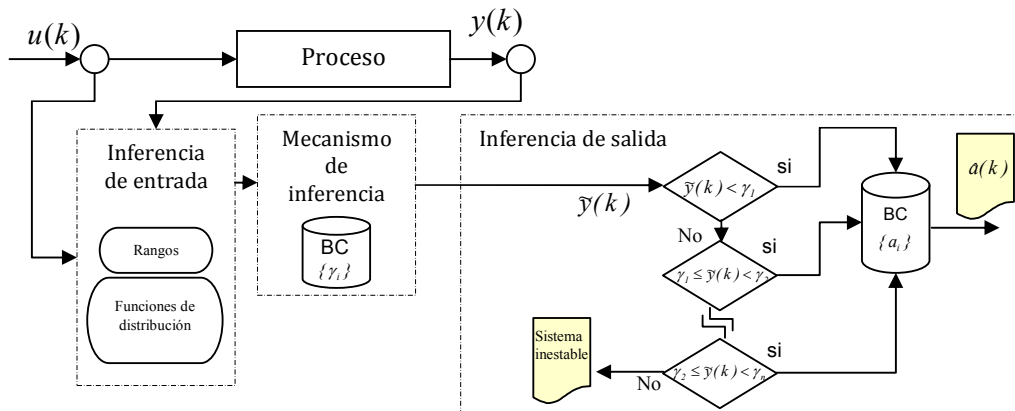


Figura 3.4. Elementos del filtrado difuso.

### 3.5 Reglas Base e Inferencia

El filtro difuso tiene propiedades estocásticas [34 y 35] que limitan las respuestas del proceso en un sentido de distribución (ver: [17, 18 y 28]), tal que esta se encuentra en un espacio de probabilidad, simbólicamente expresado como  $(\Omega, \mathfrak{F}, P)$ , donde  $\#(\mathfrak{F}) < \infty$  [17 y 18] y delimitando en consecuencia a la base de conocimiento [31].

Considerando las propiedades estocásticas tanto del sistema como del filtro y a la función de distribución del error  $J(k)$ , así como a las funciones de membresía descritas en el sentido de Borel [4] se busca disminuir el error de filtrado hacia una condición que se considera óptima (previamente descrita como  $\gamma_*$ ).

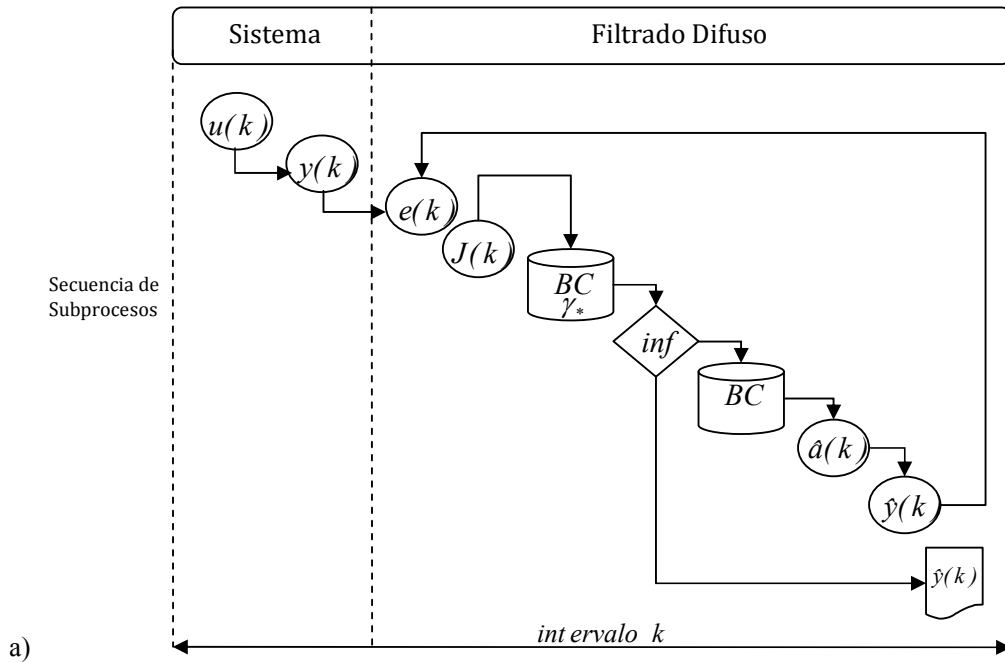
El conjunto de condiciones establecidas como reglas difusas (Si-Entonces) constituye la base de reglas y de inferencia (ver: [1, 3, 17, 18, 28, 34, 35, 41, 58 y 44]), que describen los objetivos de la base de conocimiento que a continuación se listan:

1. Clasificación automática de las condiciones del filtro, teniendo conocimiento de sus niveles de operación.
2. El conocimiento es generado conforme el área de control  $T_N$ , crezca.
3. Las reglas de adaptación modifican de forma dinámica la base de conocimiento, renovando y actualizando sus valores para cada iteración respecto al modelo de referencia  $y(k)$ , a la función de error  $e(k)$  y a las funciones de membresía descritas cada una de ellas por el espectro del  $n$ -cil (formado a partir de la función de distribución del error para cada intervalo de tiempo).

En el filtro difuso, la base de conocimiento tiene toda la información que emplea y genera, considerando por ejemplo: la respuesta de salida del sistema  $y(k)$  (conocida como la señal deseada), el error medible  $e(k)$ , el proceso de la señal de entrada  $u(k)$ , el proceso de inferencia  $c(k)$ , y también la información generada a partir del filtrado  $\hat{y}(k)$ . Que de acuerdo con esto, la base de conocimiento (o área de control) es descrita como:

$$T_{N_{Tot}} = \{(u(k), y(k), e(k), c(k), \hat{y}(k))\}_{k=1}^{5 \times N} \subseteq R_{5 \times [1, N]}^5 \quad (4)$$

El conjunto de reglas constituye la operación del sistema de filtrado de acuerdo a la lógica difusa y al filtrado digital, empleando como indicador de la acción a tomar a  $J(k)$ . De forma ilustrativa, el esquema del filtro difuso es:



b)

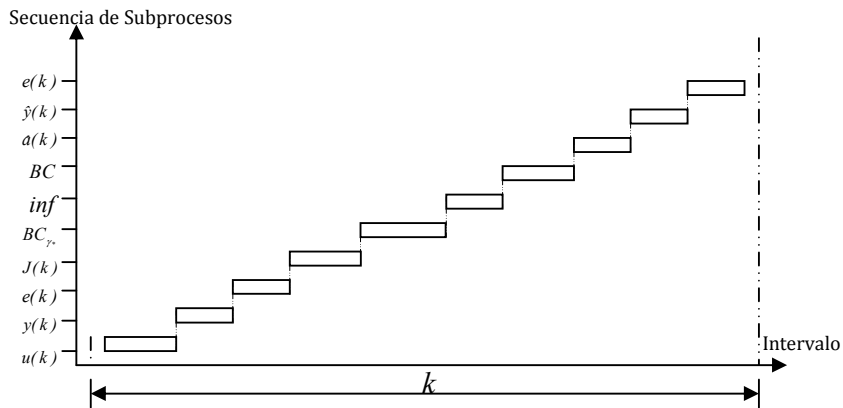


Figure 3.5. Subprocesos operación.

La Figura 3.5, en la sección a), describe de forma ilustrativa la secuencia del proceso a través de un diagrama a bloques, y en la sección b), se describe la secuencia de la sección a) como subprocesos acotados por los tiempos de filtrado.

### 3.6 Propiedades en Tiempo-Real

**DEFINICIÓN 3.1 (filtro digital difuso en tiempo real - FDDTR).** Un filtro digital difuso en tiempo real es un filtro adaptivo de acuerdo con ([4, 17, 18, 28, 37, 38 y 48]):

- a) *Extracción y emisión de información difusa a través de intervalos limitados con respecto a la respuesta del proceso descrita por intervalos, considerando en ellos los criterios de estabilidad descritos en (ver: [17, 18 y 28]).*
- b) *Extracción y emisión de información a través de intervalos de tiempo semiabiertos [4 y 48], sincronizados con el tiempo de evolución del proceso [17 y 18], considerando el criterio expresado en [37 y 38].*
- c) *El grupo de funciones de membresía forman el universo de discurso lingüístico (ver: [31, 54 y 60]), de acuerdo con las propiedades consideradas en los puntos a) y b), respectivamente.*
- d) *El conjunto de reglas difusas conforman la base de conocimiento dependiendo de la señal deseada difusa  $\hat{y}(k)$  con respecto al modelo de referencia  $y(k)$ , todas ellas expresadas en un sentido métrico [4 y 48].*
- e) *El algoritmo de adaptación actualiza los coeficientes del filtro si de acuerdo a la función de membresía correspondiente, el criterio de error establecido  $\gamma_*$  como nivel de convergencia, no se ha cumplido.*

**TEOREMA 3.1:** *El conjunto de entradas y salidas del FDDTR obedecen al criterio de estabilidad de acuerdo con [17 y 18] y [28], cuya entropía esta descrita por una región previamente definida [51].*

**PRUEBA:** *Por contradicción, si la energía básica del filtro no se encuentra limitada, entonces de igual forma la respuesta de salida no se encontrará limitada, y el sistema da una respuesta inestable en el sentido probabilístico de la entropía, considerando que la entropía respecto de [51], es:  $H(y_k) = [H(y_{k-1}) - y_k \ln y_k]$ .*

**TEOREMA 3.2:** *La velocidad de cambio de las señales de entrada y salida limitadas están descritas en intervalos semiabiertos con respecto a la frecuencia del tiempo evolución del sistema de referencia.*

**PRUEBA:** *Cada intervalo de tiempo semiabierto del FDDTR está limitado temporalmente en sus entradas y salidas en el sentido de [17 y 18], en otro caso, la entropía se incrementaría (ver: [51]), porque la información crecería y el sistema tendría un colapso, ya que existirían traslapes entre las señales.*

**TEOREMA 3.3** En un sentido temporal, el área de control  $T_N$ , limita las respuestas del filtro difuso ya que de lo contrario aparecería fuera de tiempo.

**PRUEBA:** El sistema de acuerdo a los criterios de Nyquist y Shannon [51], limita en intervalos de tiempo las propiedades del área control  $T_N$ , ya que en otro caso el tiempo de respuesta del filtro estaría fuera de contexto; esto quiere decir, que la respuesta ocurriría después del tiempo en que fuera requerida.

**NOTA 3.1:** El filtro digital difuso es un filtro digital adaptivo ([11, 14, 15, 17, 18 y 45]) y este requiere una señal deseada  $y(k)$  con respecto al universo de discurso para actualizar y ajustar su respuesta de acuerdo con la base de conocimiento  $T_N$ .

**DEFINICIÓN 3.2 (Análisis local y global).** Un FDDTR en un sentido temporal de manera local y global, tiene una calidad de respuesta de acuerdo a los criterios de estabilidad [8] y de entrega a tiempo [51].

**Características Globales.** Los intervalos de convergencia definidos por  $[0, \varepsilon \pm \alpha)$  con una medida superior a cero a través del funcional de error  $J(k)$  y considerando a [17 y 18] y (1), son parametrizadas temporalmente a la función de membresía con respecto a los valores de las variables lingüísticas ([1, 41 y 58]), sin perder de vista que  $|e(k)| < 1$ .

En base a los conceptos difusos, las características globales son especificadas en un sentido probabilístico de acuerdo con [44], en el que  $J(\tau_m) = \inf\{\min\{J_k\}\} \leq \varepsilon$  (ver: (3)), donde  $\{J_k\} \subseteq \{J_k\}$  y  $P(J_k \leq \varepsilon \pm \alpha) = 1$  sin perder su evolución natural.

$$\tau_{min} = 0.5 f_{máx}^{-1}. \quad (5)$$

**Características Locales.** Implica la estabilidad del proceso a través de sus parámetros  $\{a(k)_i\}$  actualizados en cada iteración o en cada variable difusa, sin perder de vista los tiempos de finalizado  $\{f(k)_i\}$  del FDDTR dentro de sus límites correspondientes  $[ld(k)_{i\_min}, LD(k)_i)$  en el sentido de Nyquist y Shannon de acuerdo con [37 y 38] en el límite menor, considerando que  $\mu[ld(k)_{i\_min}, LD(k)_i) < \tau_{min}$  (ver la Figura 7).

**NOTA 3.2.** Cada FDDTR como estimador de parámetros tiene una función de error limitada, donde  $\gamma$  es el límite del error definido por la varianza de las perturbaciones del sistema. En el caso difuso estas variaciones paramétricas se encuentran dentro del error que está limitado por  $\gamma$  representando las funciones de membresía correspondientes con el criterio elegido por el modelo de referencia [45].

**NOTA 3.3** El FDDTR ofrece una respuesta local estable si la estimación del conjunto de parámetros del sistema, se encuentra dentro del círculo unitario para cada intervalo  $k$ :

$$\{a_e(k)\}_i \subseteq [0 + \beta, 1 - \alpha), \quad k \in Z_+. \quad (6)$$

La Figura 3.6, muestra como se realiza la ejecución de la tarea del filtro difuso en forma global a través de intervalos de tiempo de acuerdo con la Figura 3.5 b):

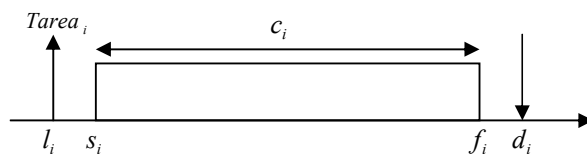


Figura 3.6. Proceso de filtrado descrito en forma equivalente por una tarea

El proceso de filtrado está delimitado de forma temporal en el tiempo de arribo ( $l_i$ ), tiempo de inicio ( $s_i$ ), tiempo de ejecución ( $c_i$ ), tiempo de finalizado ( $f_i$ ) y plazo máximo de tiempo ( $d_i$ ), por (5) al considerar a  $\tau_{mín}$ .

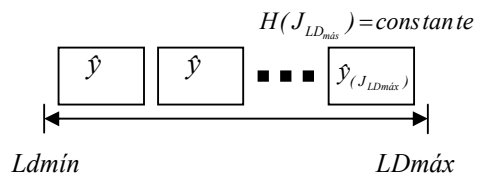
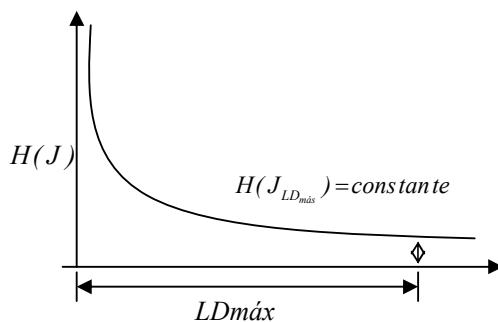


Figura 3.7. Operación de filtrado global

### **3.7 Conclusiones**

En este capítulo se realiza la descripción del FILTRO DIGITAL DIFUSO EN TIEMPO REAL (FDDTR), considerando los conceptos de lógica difusa y filtrado adaptivo, sin olvidar las propiedades de tiempo real requeridas para una operación integrada con un sistema real. Lo que caracteriza principalmente a este tipo de filtros es una base de conocimiento expresada de manera lingüística para acotar la región de operación del filtro de acuerdo a un conjunto de situaciones posibles a presentarse respecto al sistema real con el que interactué sin perder sus propiedades de estabilidad [3]. Los resultados están descritos en sentido formal, empleando un conjunto de conceptos que se encuentran en las referencias.



## Simulación

### 4.1 Características de la simulación

Para realizar la simulación del filtrado difuso en este caso se ha utilizado el filtro de Kalman [17 y 18] con una matriz de transición descrita por la base del conocimiento de acuerdo al criterio del funcional de error que están descritos en [4, 17, 18 y 48]. El sistema empleado para el desarrollo de esta simulación es de tipo soft (o probabilístico) usando un procesador AMD Sempron 3100, se contemplan sus tiempos de evolución media con intervalos  $k$ , de  $0.004 \text{ s} \pm 0.0002$ .

### 4.2 Descripción del sistema de referencia

El sistema está descrito en forma básica en un espacio de estados discreto:

$$x(k+1) = a(k)x(k) + w(k). \quad (7)$$

Y la salida del filtro es descrita:

$$y(k) = x(k) + v(k) : \quad x(k), w(k), v(k) \in R \quad (8)$$

Donde:  $\{x(k)\}$  es el conjunto de estados internos,  $\{a(k)\}$  es la secuencia de parámetros,  $\{w(k)\}$  es el conjunto de ruidos que perturban al sistema,  $\{y(k)\}$  es el conjunto de salidas del sistema,  $v(k)$  es el ruido de salida  $v(k) \subseteq N(\mu, \sigma^2 \leq \infty)$ .



Los diferentes niveles de operación están contruidos en un sentido de probabilidad, que está de acuerdo con la función de distribución del funcional del error descrito en el capítulo tres (1) con respecto a la respuesta de salida del sistema  $y(k)$  y la respuesta de Kalman de forma respectiva; ambas respuestas están limitadas por el segundo momento de probabilidad, estableciendo para cada nivel de los  $n$ -ciles una variable lingüística de forma natural, descrita como bajo, medio, alto. En la Figura 4.1, se muestran los niveles de respuesta con respecto al filtro de Kalman [17 y 18] en un proceso de asignación de matriz de transición respecto a la base de conocimiento y al grupo de inferencias matemáticas:

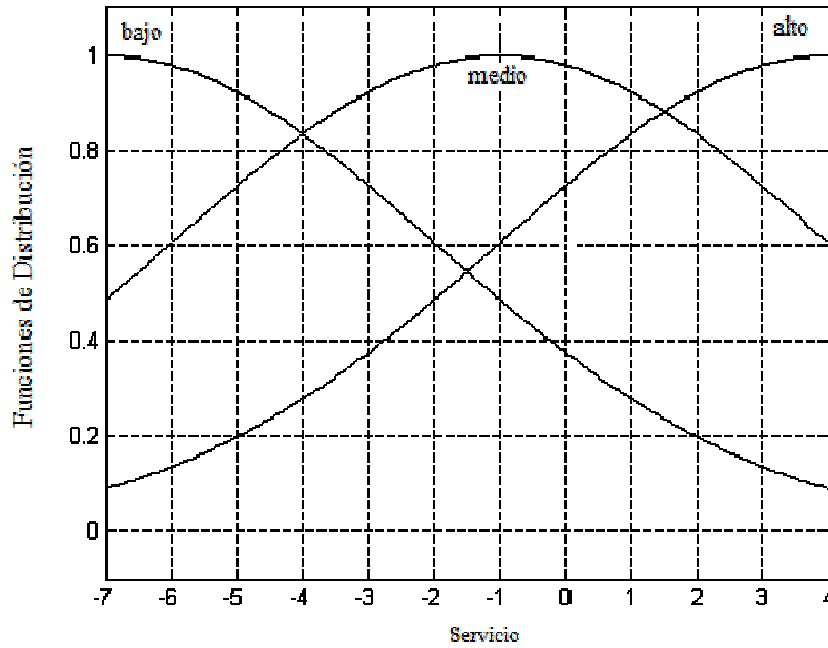
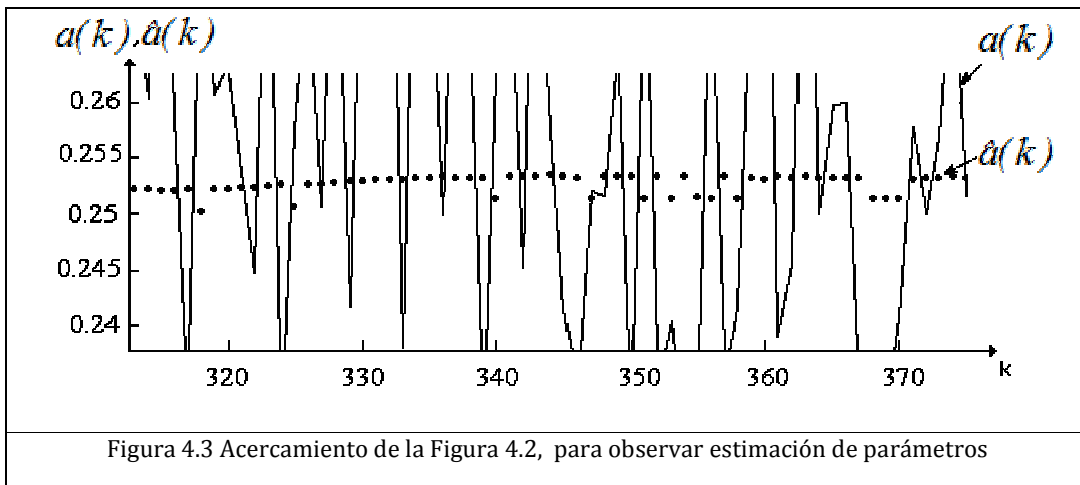
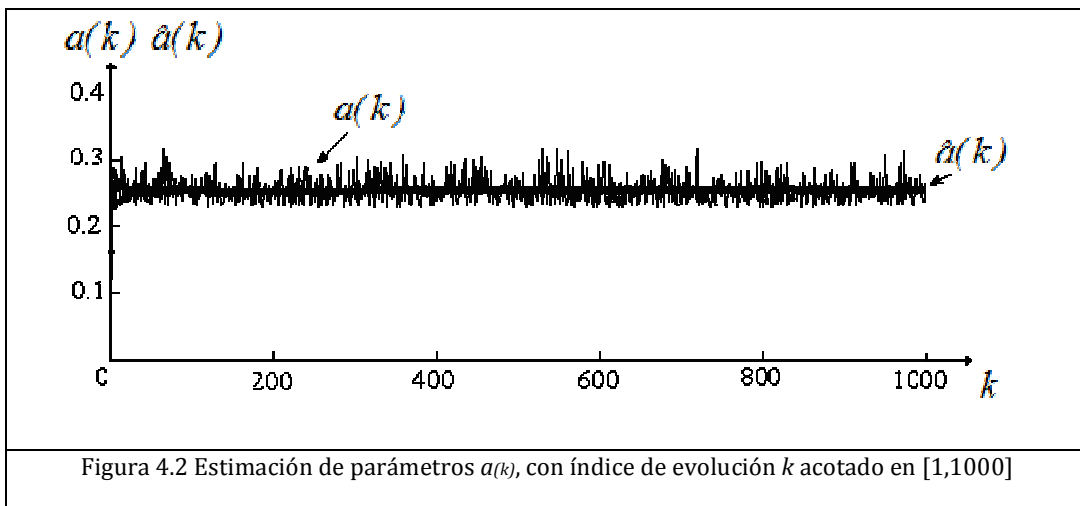


Figura 4.1 Niveles de respuesta  $y(k)$

El tiempo de evolución es menor al del proceso de referencia propuesto de 0.09 sg, cumpliendo con la condición descrita en (4).

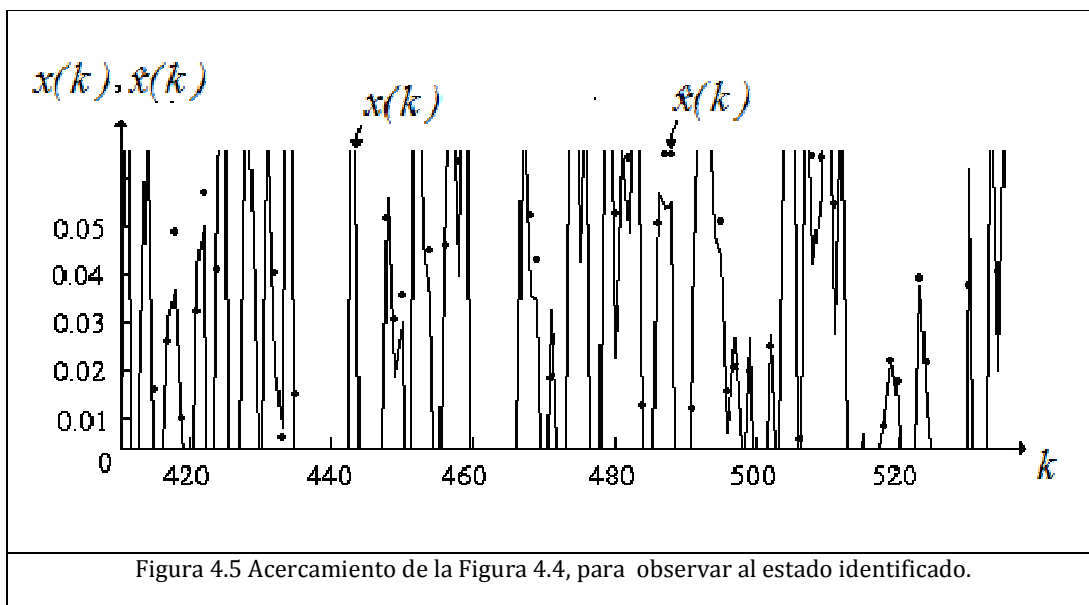
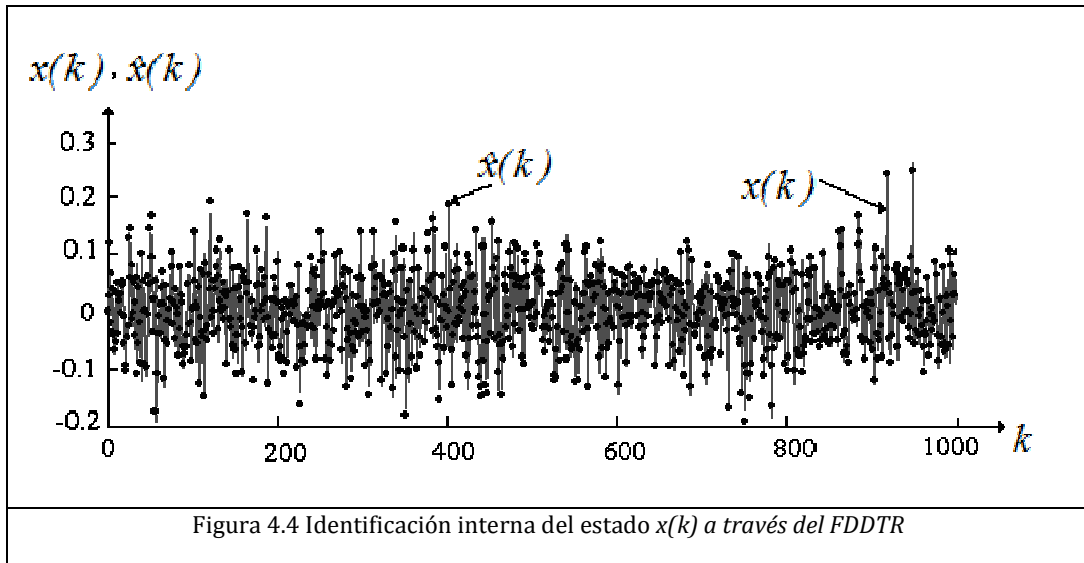
### 4.3 Estimación de parámetros

De acuerdo al error en los niveles de respuesta respecto a la señal deseada expuesta en la figura 4.1, se obtiene el parámetro de transición (que son las ganancias del filtro), para la estimación se ha empleado el modelo del filtro de Kalman. Estos parámetros en el filtro de kalman son considerados constantes; con el empleo del sistema difuso los valores de este parámetro se encuentran variando de forma dinámica a través del tiempo de acuerdo al sistema de referencia. Los resultados se muestran en las Figuras 4.2 y 4.3.



## 4.4 Identificación de estados

Considerando los resultados expuestos en la Figura 4.2 y se obtiene la identificación interna de  $x(k)$ , que es determinada de acuerdo la varianza y los cambios de los parámetros estimados. Los estados identificados tienen un alto nivel de convergencia mostrados en la Figura 4.4 y 4.5.



## 4.5 Funcional de error

En la Figura 4.6, se puede observar la gráfica del funcional de error descrito en (3) con respecto al filtro:

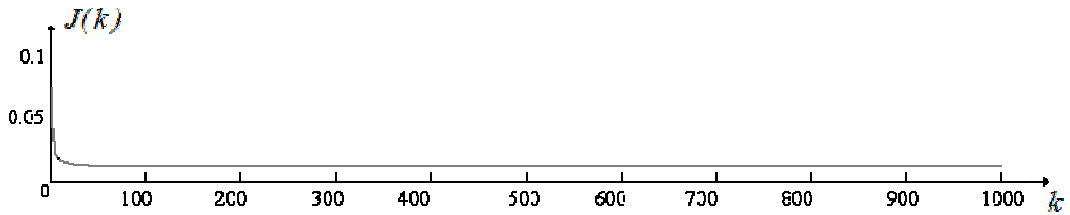


Figura 4.6 Curva de convergencia al parámetro  $\gamma^*$  vista ilustrativamente por el funcional  $J(k)$

De esta forma, se puede observar que el tiempo global de convergencia es de 0.08 sg., el cual es menor a la condición de evolución del sistema, teniendo en cuenta que  $LD_{max}$  está oscilando alrededor de 0.09 sg, de acuerdo con sus propiedades descritas previamente en las definiciones.

La Figura 4.8, muestra los niveles en un sentido de distribución, dentro de los primeros dos momentos de probabilidad y la Figura 4.7, muestra las funciones de membresía, clasificadas un sentido de probabilidad con respecto a  $J(k)$ :

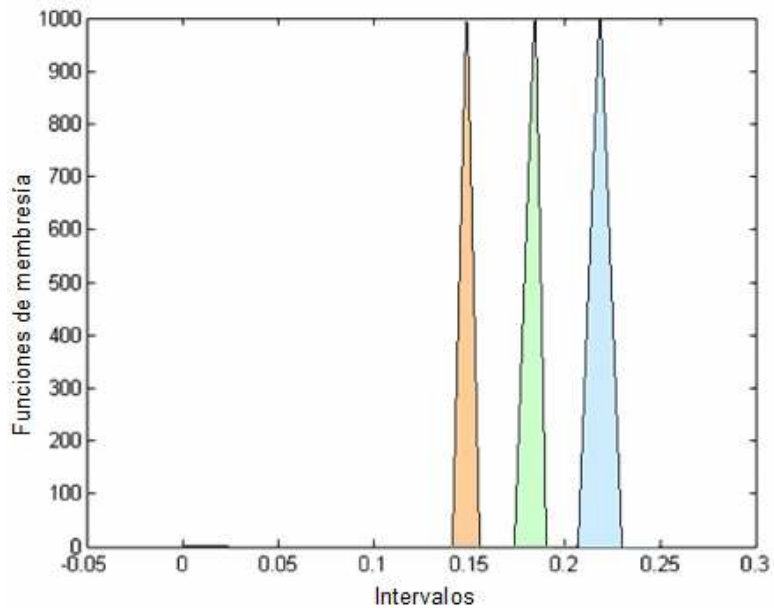


Figura 4.7 Funciones de membresía de acuerdo a  $J(k)$  para las variables lingüísticas

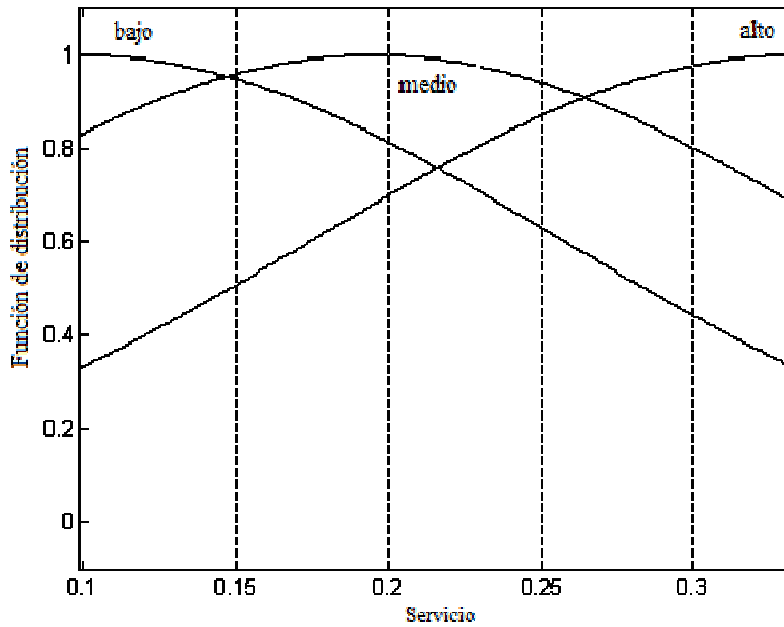


Figura 4.8 Funciones distribución de  $J(k)$  por rangos.

## 4.6 Conclusiones

Se mostró ilustrativamente como las señales de salida del FDDTR son clasificadas respecto a la señal deseada del sistema real de referencia, de acuerdo a las funciones de membresía establecidas para caracterizar su funcionamiento desde un sentido computacional de forma lingüística.

El FDDTR requiere de un grupo de reglas adaptables que accedan a la base del conocimiento (en un sentido matemático se utiliza el conector lógico Si *frase lógica 1 (adaptable)* y que de ella se tenga la respuesta a través del conector lógico Entonces *frase lógica 2*. Este tipo de filtrado considera la calidad de su respuesta en un lenguaje natural, y las restricciones temporales con propiedades adaptables.

Las propiedades del FDDTR fueron presentadas de forma esquemática utilizando al Matlab® como herramienta de simulación, observando que las funciones de distribución de las funciones de error acotan a las funciones de membresía por rangos ajustables a la evolución del proceso real y la convergencia del filtro con su proceso de adaptación.

## CONCLUSIONES

---

Dentro de la introducción a esta tesis se expuso la problemática que se requirió resolver en este proyecto, respecto al desarrollo de un sistema de filtrado que sea capaz de inferir la respuesta más adecuada para retroalimentar a un sistema de referencia con el que se encuentre interactuando; de acuerdo con la dinámica del sistema y de sus diversos niveles de operación, para que de esta forma el filtro tenga un seguimiento natural del mismo y de esta forma lo retroalimente para ajustar su operación a una condición adecuada. Para realizar un filtro digital adaptivo con estas propiedades fue necesario contar con un mecanismo de inferencia por medio del cual el sistema de referencia sea clasificado y caracterizado de acuerdo a sus diversas variables y niveles, para esto, se buscó que la interacción del sistema de referencia considerado por medio del filtro sea lo más natural posible empleando la teoría de lógica difusa y tiempo real. Este trabajo a lo largo de su desarrollo muestra una serie de ventajas respecto a otros filtros:

6. *Resulta una solución más robusta para los diversos sistemas.*
7. *Mayor capacidad de servicios y funcionalidades.*
8. *Uso de un menor número de procesadores.*
9. *Reducción del tamaño de sistemas con múltiples funciones.*
10. *Procesamiento basado en la evolución natural del sistema de referencia.*

De forma tal que al observar que la mayoría de los sistemas de filtrado, empleados en la práctica son estáticos. Esto quiere decir que no contemplan la característica de operar de acuerdo a la dinámica natural de un proceso adaptable a su medio; sería imposible seguir la evolución natural de un proceso. Esta desventaja obstaculiza el empleo de los filtros tradicionales, requeridos indiscutiblemente para la predicción y control.

Redundando en ello, con un filtro digital común no es posible realizar la caracterización de las variables y niveles de operación del sistema de referencia con el que interactúa; por lo cual no tiene la capacidad de distinguir las etapas naturales de evolución que tiene un proceso, y reconstruir así sus dinámicas a diferentes niveles como en las señales biológicas dentro de los sistemas de control. El desarrollo de un filtro difuso con su mecanismo de operación, permite encontrar la región de operación del mismo para que de esta forma pueda caracterizar sus respuestas; también, se deben contemplar su descripción de funcionamiento en tiempo real y las características que tendrá para realizar la inferencia difusa al interactuar con un sistema de referencia.

El presente proyecto de tesis da la solución al planteamiento del problema a través de sus capítulos III y IV. Sin olvidar que en el capítulo II se presentan el estado del arte básico para la realización de este proyecto de tesis. De forma que a continuación se presentan las conclusiones de los resultados obtenidos.

En el capítulo dos se han presentado las características que tiene un filtro digital difuso en tiempo real (FDDTR), se mencionaron algunas áreas para su aplicación, así como algunas ventajas de su utilización en la vida diaria. Se describieron también las características de lógica difusa y tiempo real que presenta el filtrado digital difuso, que son empleadas para el desarrollo del filtro difuso. El FDDTR en un futuro podría llegar a ser una herramienta importante capaz de ser empleada en diversos sistemas y procesos dinámicos que tengan características más complejas, como la descripción de sistemas que presentan diferentes niveles de operación y darles un seguimiento adecuado.

En el capítulo tres se realiza la descripción del FILTRO DIGITAL DIFUSO EN TIEMPO REAL (FDDTR), considerando los conceptos de lógica difusa y filtrado adaptivo, sin olvidar las propiedades de tiempo real requeridas para una operación integrada con un sistema real. Lo que caracteriza principalmente a este tipo de filtros es una base de conocimiento expresada de manera lingüística para acotar la región de operación del filtro de acuerdo a un conjunto de situaciones posibles a presentarse respecto al sistema real con el que interactúe sin perder sus propiedades de estabilidad. Los resultados fueron descritos en sentido formal, empleando un conjunto de conceptos que se encuentran contenidos en la bibliografía.

En el capítulo cuatro se mostró ilustrativamente como las señales de salida del FDDTR son clasificadas respecto a la señal deseada del sistema real de referencia, de acuerdo a las funciones de membresía establecidas para caracterizar su funcionamiento desde un sentido computacional de forma lingüística.

Se observó que el FDDTR requiere de un grupo de reglas adaptables que accedan a la base del conocimiento (en un sentido matemático se utiliza el conector lógico *Si frase lógica 1 (adaptable)* y que de ella se tenga la respuesta a través del conector lógico *Entonces frase lógica 2*. Este tipo de filtrado considera la calidad de su respuesta en un lenguaje natural, y las restricciones temporales con propiedades adaptables.

Se presentaron las propiedades del FDDTR de forma esquemática utilizando al Matlab® como herramienta de simulación, observando que las funciones de distribución de las funciones de error acotan a las funciones de membresía por rangos ajustables a la evolución del proceso real y la convergencia del filtro con su proceso de adaptación.

De acuerdo a la información que ha sido descrita, consultada y a los resultados obtenidos, se considera que el desarrollo a futuro basado en este proyecto será en el área de redes neuronales artificiales; una arquitectura de tipo neuronal con propiedades del filtro digital difuso en tiempo real proporcionará una mayor capacidad y funcionalidad en el desempeño de su procesamiento interno.

## BIBLIOGRAFÍA

---

- [1] Abdul, S., Fuzzy Logic and its uses, <http://www.doc.ic.ac.uk>, (2006).
- [2] Ali, H. S., Fundamentals of Adaptive Filters, Complex systems, (2003).
- [3] Amble, T., Logic Programming and Knowledge Engineering, Addison Wesley, (1987).
- [4] Ash, R., Real Analysis and Probability, Ed. Academic Press, USA, (1970).
- [5] Astrom, K., & Henmark, B., Adaptive Control 2<sup>nd</sup> edition, Addison Wesley, USA (1995).
- [6] Batyrshin, I. Entrevista con el profesor Zadeh, University of California. <http://www.disg.com.mx/bisc-global/> (2004).
- [7] Buttazo G., Hard Real-Time Computing System predictable scheduling algorithms and applications”, Kluwer Academic Publishers, USA.
- [8] Burns, R., Advanced Control Engineering, Butterworth, Oxford (2001).
- [9] Espasa, Multidiccionario de Lengua Española, Madrid (2005).
- [10] Fernández G., Metodología de la Investigación, Trillas, México (1981).
- [11] García, J., Medel, J., Guevara, L., Propiedades del Filtrado Digital Difuso en Tiempo Real, IEEE Congreso Internacional en Innovación y Desarrollo, Morelos, (2007).
- [12] García, J., Medel, J., Guevara, L., “Características de un Filtrado Digital Adaptivo”, Revista de Divulgación Aleph Zero, Num. 43 (2007).
- [13] García, J., Medel, J., Guevara, L., “Interacción de Sistemas por un Filtro Digital Difuso en Tiempo Real”, ISBN: 970-36-03769-9, Congreso Nacional Estudiantil Querétaro (2006).
- [14] García, J., Medel, J., Guevara, L., “Real-Time Fuzzy Digital Filter: Basic Concepts”. Congreso internacional de control, instrumentación virtual, y sistemas digitales. CIC-INDI, México DF (2006).
- [15] García, J., Medel, J., Guevara, L., “RTFDF Description for ARMA Systems”, ISSN: 1790-5109, ISBN: 978-960-8457-81-2, WSEAS International Conferences, Canada (2007).
- [16] Guevara López, P., Medel, J., Introducción a los sistemas en tiempo real, México, IPN (2003).



- [17] Gustafsson, F.: Adaptive Filtering and Change Detection, John Wiley & Sons, Ltd, (2000).
- [18] Haykin, S.: Adaptive Filtering, Prentice Hall, (2001).
- [19] Hawking Stephen, La Vida en el Universo, traductor: Michael Artime, <http://ciencia.astroseti.org/hawking/vida.php>.
- [20] Hernández, R., Fernández, C., Metodología de la Investigación, 3ra edición McGraw Hill, México (2003).
- [21] Huang, G., Zhu, K., Siew, C .: Real-Time Learning Capability of Neural Networks, IEEE Transactions on Neural Networks, (2006), Vol. 17, 863-878.
- [22] Jantzen, J., A tutorial on Adaptive Fuzzy Control, Technical University of Denmark, Dinamarca, (2002).
- [23] Jane, W., Liu, S., Real-Time Systems, Prentice Hall, New York (2000).
- [24] Kacprzyk, J., Multistage Fuzzy Control, Wiley, Inglaterra (1997).
- [25] Kuo, B., Sistemas de Control Automático, Prentice Hall, México (1996).
- [26] Laplante, P., Real-Time Systems Design and Análisis, IEEE Pres, New York (1997).
- [27] Lau, C., Neural Networks, IEEE Pres., New York (1991).
- [28] Leydesdorff, L., Canadian Journal of Communication, vol. **28**, 267-289, (2003).
- [29] Lineweaver, C. H. & Davis, T. M. Does the rapid appearance of life on Earth suggest that life is common in the Universe? (2002).
- [30] MacRoy, S., & Ali, S., Building Intelligent Dialog Systems, University of Wiscounsinn, Milwaukee.
- [31] Mamdani, E.: Applications of Fuzzy Algorithms for Control of Simple Dynamic Plant, Proc. IEEE, (1974), Vol. 121, 1585-1588.
- [32] Manuel, L.: Teoría de la Medida e Integral de Lebesgue, Universidad Nacional del Rosario (2003).
- [33] Marcek, D.: Stock Price Forecasting: Statistical, Classical and Fuzzy Neural Networks, Modeling Decisions for Artificial Intelligence, Springer Verlag, (2004), 41-48.
- [34] Margaliot, M., & Langhoz, G., Fuzzy Lyapunov based approach to the design of fuzzy controllers, IEEE Trans. On Sys., Man Cybern.
- [35] Margaliot, M., and Langholz, G.: New Approaches to Fuzzy Modeling and Control Design and Analysis, World Scientific (2000).

- [36] Medel, J., García, J. C., Guevara, P.: Real-time Fuzzy Digital Filters (RTFDF) Properties for SISO Systems, *Automatic Control and Computer Sciences AVT*, (2008).
- [37] Medel, J., and Guevara, P.: Caracterización de Filtros Digitales en Tiempo-real para Computadoras Digitales, *Computación y Sistemas*, (2004), Vol. VII, No. 3.
- [38] Medel, J., Poznyak, A., Guevara, P.: Real-time Multivariable Digital Filter using Matrix Forgetting Factor and Instrumental Variable. *Automatic Control and Computer Sciences AVT*, (2004), Vol. 38, No. 1, 40-53.
- [39] Microsoft Press, *Computer Dictionary Third Edition*, Washington (1997).
- [40] Montejo, M.: Lógica Difusa y Control Difuso, <http://www.redeya.com> (2006).
- [41] Morales, G.: Introducción a la Lógica Difusa, Cinvestav-IPN (2002).
- [42] Nikola, K.: Foundations of Neural Networks, Fuzzy Systems, and Knowledge Engineering, The MIT Press (1996).
- [43] Ogata, K., Ingeniería de Control Moderna, Prentice Hall, México (1980).
- [44] Passino, K. M., Fuzzy Control, Addison Wesley (1998).
- [45] Peter, B., and N. Stephan, *A brief course: Fuzzy logic and Fuzzy Control*, Johannes Kepler Universitat Linz, Alemania (2006).
- [46] Pedrycz, W., Fuzzy Sets Engineering, CRC, Florida (2000).
- [47] Principe, J., Euliano, N., & Lefebvre, W., Neural and Adaptive Systems, Wiley, USA (200).
- [48] Pugachev, V., Introducción a la Teoría de Probabilidades, Editorial MIR, Moscú (1973).
- [49] Rajen, B., and Gopal, M.: Neuro-Fuzzy Decision Trees, *International Journal of Neural Filters*, (2006), Vol. 16, 63-68.
- [50] Sánchez, C., *Integral de Lebesgue - Stieltjes*, Marchena, España (1998).
- [51] Shannon, M.: A Mathematical Theory of Communication, *Bell Systems Technical Journal*, (1948), Vol. 27, 379-423 and 623-656.
- [52] Schneider, M., and Kandel, A.: Fuzzy expert systems tools, Wiley (1996).
- [53] Stubberud, D., Retroalimentación y Sistemas de control, McGraw Hill, México (1981)
- [54] Takagi, T., and Sugeno, M.: Fuzzy Identification of Systems and its Applications to Modelling and control, *IEEE Transactions and Systems, man, and cybernetics*, (1986), Vol. 15, 116-132.

- [55] Tenorio, B., Metodología de la Investigación, Mc. Graw Hill, México (1996).
- [56] Terano, T., Asay, K., & Sugeno, M., Applied Fuzzy Systems, AP Professional, Cambridge (1989).
- [57] Von, C., Fuzzy Logic & Neurofuzzy Applications Explained, Prentice Hall, New York (1995).
- [58] Wang, L., Adaptive Fuzzy Systems and Control, Prentice Hall (1994).
- [59] Yamakawa, F.: Fuzzy Neurons and Fuzzy Neural Networks, (1989).
- [60] Zadeh, L.: Fuzzy Sets, Information and control, (1965), Vol. 8, 338-353.

## Estructura y construcción para simular el sistema de filtrado (FDDTR).

Se dan las condiciones iniciales de todas las variables expresadas en la simulación utilizando el programa de Matlab, de la siguiente forma:

```
clear all;
close all;

a=.23; %parametro del sistema de referencia
x(1)=0.02; %estado interno
y(1)=0.01; %salida del filtro
p1(1)=13.0; %variable del filtro
b1(1)=0.025; %variable del filtro
J1(1)=0.1; %funcional del error
aell(1)=0.25; %parámetro a estimar del filtro
k=.005; %constante
H(1)=0.001; %entropía
n=1000; %numero de secuencias
```

Se propone un sistema tipo arma  $x(i)$  y su salida correspondiente  $y(i)$ , con sus condiciones iniciales de la siguiente forma:

```
al(i)=a+abs(randn)*.002; %parámetro interno
in(i)=0.008*randn; %ruidos internos
out(i)=0.007*randn; %ruidos externos
x(i)=al(i)*x(i-1)+in(i); %dinámica interna
y(i)=x(i)+out(i); %señal observable
```

Se presenta el modelo del filtro de kalman para estimar sus parámetros e identificar los estados internos del sistema:

```
ins(i)=y(i-1);
p1(i)=inv((inv(p1(i-1)))+(y(i))*inv(i));
b1(i)=b1(i-1)+(y(i))*(inv(i));
aell(i)=p1(i)*b1(i)+sign(al(i-1)-aell(i-1))*J1(i-1);
d(i)=abs(al(i)-aell(i));
J1(i)=(1/i)*(J1(i-1)*(i-1)+d(i)*d(i));
ye(i)=aell(i)*y(i-1)+out(i)+sign(al(i)-aell(i))*J1(i);
dy(i)=abs(y(i)-ye(i));
I1(i)=(1/i)*(I1(i-1)*(i-1)+dy(i)*dy(i));
xe(i)=aell(i-1)*x(i-1)+k*(y(i)-ye(i));
```

Se determina la media y varianza de los datos del sistema de referencia para determinar sus niveles de operación:

```
Pye(i)=sum(ye(i))/n;
Mye(i)=Pye(i)+var(ye);
Mye2(i)=Pye(i)-var(ye);
```

Se establecen las características difusas del sistema de filtrado para establecer los niveles de operación de acuerdo al error de la siguiente forma:

```
c = newfis('tipper');
c = addvar(c,'input','service',[0.1 0.333]);
c = addmf(c,'input',1,'bajo','gaussmf',[0.1571 0.099]);
c = addmf(c,'input',1,'medio','gaussmf',[0.1571 .1952]);
c = addmf(c,'input',1,'alto','gaussmf',[0.1571 .333]);
```

Para establecer las características difusas de las respuestas a la salida del filtro se realiza de la forma siguiente:

```
a = newfis('tipper');  
a = addvar(a,'input','service',[-5 2]);  
a = addmf(a,'input',1,'bajo','gaussmf',[-3 -5]);  
a = addmf(a,'input',1,'medio','gaussmf',[-3 -2]);  
a = addmf(a,'input',1,'alto','gaussmf',[-3 2]);
```

## **Productos**

### **Publicaciones:**

1. Juan Carlos García Infante, Pedro Guevara López, José de J. Medel Juárez, "Características de un Filtrado Digital Adaptivo", Revista de Divulgación Aleph Zero, Num. 43, Enero-Marzo (2007).
2. Juan Carlos García Infante, José de J. Medel Juárez, Pedro Guevara López, "Interacción de Sistemas por un Filtro Digital Difuso en Tiempo Real", ISBN: 970-36-03769-9, Congreso Nacional Estudiantil Querétaro, Octubre (2006).
3. Juan Carlos García Infante, José de J. Medel Juárez, Pedro Guevara López, "Real-Time Fuzzy Digital Filter: Basic Concepts". Congreso internacional de control, instrumentación virtual, y sistemas digitales. CIC-INDI, México DF, Noviembre (2006).
4. Juan Carlos García Infante, José de J. Medel Juárez, Pedro Guevara López, "RTFDF Description for ARMA Systems", ISSN: 1790-5109, ISBN: 978-960-8457-81-2, WSEAS International Conferences, Canada, (2007).

### **Proyectos de Investigación:**

1. "Filtrado Adaptivo", (Director de Proyecto: Dr. José de J. Medel Juárez) Proyecto SIP CIITEC-IPN, México DF., (2005).
2. "Un modelo para describir los niveles de eficiencia terminal en el nivel medio superior del IPN, utilizando técnicas de reconstrucción estocástica", (Director de Proyecto: Dr. Pedro Guevara López) Proyecto SIP DEMS-IPN, Registro: 2006814, Enero-Diciembre (2006).
3. "Modelado de tareas en tiempo real concurrentes, utilizando sistemas discretos, multivariados y estocásticos", (Director de Proyecto: Dr. Pedro Guevara López) Proyecto SIP DEMS-IPN, Registro:20071688, Enero-Diciembre (2007).

### **Ponencias en Congresos:**

1. "Protocolo para la interacción de sistemas", Congreso Nacional de Investigación Estudiantil, Septiembre (2005).
2. "Protocolo para la interacción", XXII Semana Interdisciplinaria de la UPIICSA-IPN, Noviembre (2005).
3. "Interacción de sistemas por un Filtro Digital Difuso en Tiempo Real", II Congreso Nacional Estudiantil de Investigación, CICATA-IPN (Querétaro), Octubre (2006).
4. "Real Time Fuzzy Digital Filter: Basic Concepts", Magno Congreso de Computación CIC-IPN, Noviembre (2006).

### **Conferencias Impartidas:**

1. "Protocolo para la convergencia de redes celulares y redes 802.11", V, VI, VII Taller de Avances de Investigación, CICATA-IPN, Junio, Noviembre (2005), y Junio (2006).
2. "Sistemas en Tiempo Real", V Ciclo y 1er. Congreso Nacional Tendencias Tecnológicas en Computación, Noviembre (2005).
3. "Interacción de Sistemas por un Filtro Digital Difuso", Semana de Ingeniería del Instituto Tecnológico de Cuahutitlan, Octubre (2006).
4. "Filtro Digital Difuso en Tiempo Real", 16 Aniversario del Instituto Tecnológico de la Piedad, Noviembre (2006).
5. "Filtrado Difuso En Tiempo Real", VIII Taller de Avances de Investigación, CICATA-IPN, Noviembre (2006).