

INSTITUTO POLITECNICO NACIONAL



**ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERIA MECANICA Y
ELECTRICA UNIDAD ZACATENCO**

SECCIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN



SISTEMA CIBERNÉTICO PARA EL MANEJO DE RESPUESTA EN SEÑAL DE SENSORES ACÚSTICOS

TESIS

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:

DOCTOR EN INGENIERÍA DE SISTEMAS

PRESENTA:

M. EN C. RICARDO CARREÑO AGUILERA

DIRECTORES DE TESIS:

DR. MIGUEL PATIÑO ORTIZ

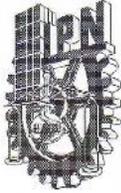
DR. JULIÁN PATIÑO ORTIZ

MÉXICO D. F. SEPTIEMBRE DEL 2014.



ESIME ZAC. / SEPI

SISTEMA CIBERNÉTICO PARA EL MANEJO DE RESPUESTA EN SEÑAL DE SENSORES ACÚSTICOS



INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO

ACTA DE REVISIÓN DE TESIS

En la Ciudad de México, D. F. siendo las 13:00 horas del día 28 del mes de Agosto del 2014 se reunieron los miembros de la Comisión Revisora de la Tesis, designada por el Colegio de Profesores de Estudios de Posgrado e Investigación de E.S.I.M.E.-ZAC. para examinar la tesis titulada:

“SISTEMA CIBERNÉTICO PARA EL MANEJO DE RESPUESTA EN SEÑAL DE SENSORES ACÚSTICOS”

Presentada por el alumno:

CARREÑO

AGUILERA

RICARDO

Apellido paterno

Apellido materno

Nombre(s)

Con registro:

B	1	2	0	8	7	3
---	---	---	---	---	---	---

aspirante de: **DOCTOR EN INGENIERÍA DE SISTEMAS**

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

LA COMISIÓN REVISORA

Directores de tesis

DR. JULIAN PATIÑO ORTIZ

Presidente

DR. MIGUEL PATIÑO ORTIZ

Segundo Vocal

DR. MIGUEL ANGEL MARTÍNEZ CRUZ

Tercer Vocal

DR. MIGUEL PATIÑO ORTIZ

Secretario

DR. JOSÉ DE JESÚS MEDEL JUÁREZ

DR. IGNACIO ENRIQUE PEÓN ESCALANTE

PRESIDENTE DEL COLEGIO DE PROFESORES

DR. MAURO ALBERTO ENCISO AGUILAR





INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL
SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO

CARTA CESIÓN DE DERECHOS

En la Ciudad de México, Distrito Federal el día 01 del mes de Septiembre del año 2014, el que suscribe **Ricardo Carreño Aguilera**, alumno del Programa de Doctorado en Ingeniería de Sistemas con número de registro **B120873**, adscrito a la sección de Estudios de Posgrado e Investigación de la Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica Unidad Zacatenco, manifiesto que es autor intelectual del presente trabajo de Tesis bajo la dirección de los Doctores **Dr. Miguel Patiño Ortiz** y **Dr. Julián Patiño Ortiz** y cede los derechos del trabajo titulado: "**Sistema Cibernético para el manejo de respuesta en señal de Sensores Acústicos**", al Instituto Politécnico Nacional para su difusión, con fines académicos y de investigación.

Los usuarios de la información no deben reproducir el contenido textual, graficas o datos del trabajo sin el permiso expreso del autor y/o directores del trabajo. Este puede ser obtenido escribiendo a las siguientes direcciones: jpatino@ipn.mx, mpatino2002@ipn.mx, ricardo.carreno.a@hotmail.com. Si el permiso se otorga, el usuario deberá dar el agradecimiento correspondiente y citar la fuente del mismo.



Ricardo Carreño Aguilera

ÍNDICE

RESUMEN

ABSTRACT

INTRODUCCIÓN

<i>CAPÍTULO 1. MARCO CONTEXTUAL.</i>	1
1.1 Antecedentes.	2
1.2 Planteamiento de la problemática.	6
1.3 Objetivos.	8
1.4 Justificación.	9
1.4.1 Aportación.	10
<i>CAPÍTULO 2. MÉTODO DE INVESTIGACIÓN Y MARCO TEÓRICO</i>	12
2.1 Método de Investigación.	13
2.1.1 Tipo de Investigación.	14
2.2 Marco Teórico.	17
2.2.1 Sistemas.	17
2.2.2 Control.	21
2.2.3 Cibernética de primer orden.	30
2.2.4 Cibernética de segundo orden.	31
2.2.5 Planteamiento de desacoplamiento a perturbaciones por modos deslizantes como una alternativa para solucionar el problema del eco del sonido.	31
2.2.6 Oscilaciones en fluidos.	33
<i>CAPÍTULO 3. DESARROLLO</i>	37
3.1 Consideraciones preliminares para el diseño del modelo.	38
3.1.1 Relaciones de variables.	38
3.1.2 Formulación de la hipótesis.	40
3.1.3 Operacionalización de variables.	40
3.1.4 Selección de la muestra y recolección de los datos.	41
3.2 Desarrollo.	42
3.2.1 Análisis de la información.	46
3.2.2 Diseño del modelo conceptual de control.	48
3.2.3 Diseño del modelo de control automático a nivel industrial.	49
3.2.4 Diseño del modelo isomorfo de un sistema (planta) a controlar.	49
3.2.5 Sistema de lazo de control sin algoritmo de control.	53
3.2.6 Función de transferencia en lazo abierto sin control.	54
3.2.7 Función de transferencia en lazo cerrado sin control.	55
3.3 Estimación de parámetros del control por modos deslizantes del sensor acústico.	55
3.4 Resultados.	61
3.4.1 Resultados obtenidos para el sensor acústico.	61

3.4.1.1 Con respecto a la salida del sistema. Gráfica 3.14	61
3.4.1.2 Con respecto al error estocástico del proceso. Gráfica 3.15	63
3.4.1.3 Con respecto a la entropía de la señal de error. Gráfica 3.16	63
3.4.2 Resultados obtenidos con el modo deslizante en el modelo del movimiento longitudinal del avión.	64
3.4.2.1 respuesta a escalón modelo de lazo abierto del cabeceo. gráfica. gráfica 3.17	65
3.4.2.2 respuesta a escalón modelo de lazo abierto de la variable de estado x_1 . gráfica 3.18	66
3.4.2.3 respuesta a escalón modelo de lazo abierto de la variable de estados x_2 . gráfica 3.19	67
3.4.2.4 respuesta a escalón modelo de lazo abierto de la variable de estados x_3 . gráfica 3.20	68
3.4.2.5 respuesta a escalón modelo de lazo abierto de la variable de estados x_4 . gráfica 3.21	69
3.4.2.6 respuesta a señal escalón de la salida θ (cabeceo) en lazo cerrado sin control por modos deslizantes. gráfica 3.22	70
3.4.2.7 señal de salida θ usando la ley de control de retroalimentación por modos deslizantes. gráfica 3.23	72
3.4.2.8 ley de control por modos deslizantes. gráfica 3.24	74
3.4.2.9 variable de estado x_1 en lazo cerrado usando el modelo cibernético con modos deslizantes. gráfica 3.25	74
3.4.2.10 variable de estado x_2 en lazo cerrado usando el modelo cibernético con modos deslizantes. gráfica 3.26	75
3.4.2.11 variable de estado x_3 en lazo cerrado usando el modelo cibernético con modos deslizantes. gráfica 3.27	76
3.4.2.12 variable de estado x_4 en lazo cerrado usando el modelo cibernético con modos deslizantes. gráfica 3.28	77
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES A FUTURO	80
Conclusiones generales.	81
Con respecto a los objetivos de la investigación	81
Con respecto al objetivo general	82
Con respecto a los objetivos específicos	83
Recomendaciones a futuro.	85
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	89
GLOSARIO	93
ÍNDICE DE FIGURAS Y TABLAS	98
ANEXOS	102

SISTEMA CIBERNÉTICO PARA EL MANEJO DE RESPUESTA EN SEÑAL DE SENSORES ACÚSTICOS.

RESUMEN

Con el surgimiento de la era de la electrónica y de las exigencias globales de la calidad total con tendencias de cero defectos, el mundo ha requerido cada vez más, el uso de sensores electrónicos para automatizar tareas de robótica, procesos industriales, inspección automática industrial para dispositivos a prueba de error o sensados en donde el hombre no tiene acceso o el ojo humano no tiene la capacidad de hacerlo, como el sensado de profundidad marina como el sonar.

Para satisfacer las exigencias del avance tecnológico, se han creado múltiples tipos de sensores fotoeléctricos, magnéticos, inductivos, nucleares, acústicos, etc. Pero de estos, el sensor acústico ofrece un gran potencial por explotar aún, en aplicaciones como sensado de profundidad de pozos, acuíferos, lagos, cavernas, etc. En donde aun no existen soluciones de sensado acordes para estas aplicaciones.

En este estudio se propone un modelo cibernético, para el control de respuesta de un sensor acústico, que pueda resolver las aplicaciones de hoy en día, sin embargo, también se encontró que se puede aplicar en el movimiento longitudinal de un avión (ascenso y descenso) y en cualquier modelo dinámico que ajuste con el modelo cibernético propuesto.

La investigación se desarrolló bajo la aplicación del Método Científico propuesto por Bunge, que sirvió también para orientar el rumbo y la dirección de ésta, auxiliándonos por algunos métodos y técnicas de la Ingeniería de Sistemas que se reflejan donde fue pertinente usarlos.

Para satisfacer las necesidades mencionadas, se diseñó un subsistema que regule en forma automática el nivel de señal acústico emitido por un componente piezoeléctrico acústico, de tal manera que se asegure que el eco reflejado de la señal será de por lo menos de una intensidad requerida para que el sensor acústico pueda leer y analizar la señal recibida de una manera adecuada.

La regulación automática de la señal emitida diseñada a través de los procesos cibernéticos, es la aportación más importante de este trabajo de investigación, dado que no se conoce la distancia entre el punto de emisión y recepción. La auto – regulación permitirá que el sensor pueda medir en rangos muy amplios dicha distancia, poniendo de manifiesto la importancia del enfoque de sistemas en la solución de problemas prácticos.

CYBER SYSTEM TO CONTROL THE ACOUSTIC SENSOR SIGNAL RESPONSE.

ABSTRACT

With the advent of the electronic age and the overall requirements of total quality with zero defect trend, the world has increasingly required the use of electronic sensors to automate robotic tasks, industrial processes, industrial automatic proof error inspection where man has no access or the human eye is not able to do so, as the water depth sensing as sonar.

In order to meet the demands of the technological advancement, it has been created multiple types of sensors such as photoelectric, magnetic, inductive, nuclear, and acoustic sensors. But the acoustic sensors have a great potential to be exploited in sensing applications such as the measurement of the depths in the following: water wells, aquifers, lakes, caves, watersheds, water holes etc. but in fact all applications needing auto-regulation.

In this scientific work, it is proposed a cybernetic model control for the signal response study of an acoustic sensor, which can solve the application proposed today, however, it was proven that the proposed sliding mode algorithm is not only useful for the acoustic sensors gain auto-regulation but also for dynamic aircrafts longitudinal movement (attitude) and any other dynamic mathematical model as long as it fits the proposed cybernetic systemic model.

The research was conducted under the application of the Scientific Method proposed by Bunge, this method served to guide and lead this research, which it was also assisted by Systems Engineering techniques (e.g. sliding modes control).

In the case of the acoustic sensor, the cybernetic model ensures that the reflected echo signal has at least the percentage of echo intensity required to meet the good performance of the system, there is a subsystem automatically regulating the level of acoustic signal emitted by a piezoelectric component designed such that acoustic sensor can read and analyze the received signal in a suitable manner according to the goals of this research.

The automatic intensity adjustment of the emitted piezoelectric signal is the most important contribution of this research, this auto-regulation is important since the distance between the point of emission and reception is not known. Auto - regulation allows the sensor to measure this distance for very wide ranges, and it is necessary to highlight the importance to use the systemic focus in solving this kind of practical problems.

INTRODUCCIÓN.

Los sensores acústicos tienen un gran potencial en diversas aplicaciones dada la naturaleza de su detección que es un fenómeno mecánico (onda elástica vibratoria acústica), esto los hace únicos en aplicaciones donde la señal acústica es la idónea, son inmunes prácticamente frente a factores de error (por ejemplo; luz, polvo, humo, niebla, vapor, pelusas, aire con aceite, etc.). Ofrecen una mejor capacidad de adaptación para la detección de objetos transparentes y oscuros, superficies reflectantes, objetos brillantes en mercancías a granel y líquidos. Gracias a los sensores de ultrasonidos se pueden detectar y medir objetos de forma segura independientemente de su compuesto, color, transparencia y estado de la superficie.

Sin embargo el sensor acústico así como todos los sensores, tienen la limitante de que poseen un rango limitado de la distancia a medir, aunque esto normalmente no es un problema dado que la distancia es conocida y solo se le da una tolerancia de operación, sin embargo, existen aplicaciones hoy no satisfechas por los sensores electrónicos, en los que no se conoce la distancia de operación o solo se tiene una idea muy vaga o muy aproximada. Es aquí donde el diseño de algoritmos matemáticos de control aplicados a sistemas de sensores puede hacer posible que estos alcancen capacidades que antes no tenían. De ahí la importancia del diseño de dichos algoritmos de control, dado que existe una gran gama de aplicaciones como medición de profundidad de pozos, cuencas, etc. Podrían hacerse posible mediante el diseño de estos algoritmos matemáticos. El desarrollo de estos algoritmos de control incorporados a sistemas de sensores, no solo pueden hacer posible la realización de sensores que cubran aplicaciones aun no existentes en el mercado, sino también, la mejora en el desempeño de los ya existentes.

Algunos de los dispositivos y sensores acústicos usan un material piezoeléctrico para generar la onda acústica. Dada la estabilidad y accesibilidad de estos materiales piezoeléctricos, ejemplo el cuarzo, se están usando cada vez más y se están haciendo más comunes en el mercado, a la vez que se están diversificando en muchas aplicaciones tecnológicas. Por esto mismo, se propone el uso de un sistema sensor piezo – eléctrico para la realización de esta investigación. Además de que el modelo matemático de un componente piezo – eléctrico es isomorfo al modelo matemático de un circuito RLC.

Dado el modelo cibernético del piezo-eléctrico a utilizar se puede simular el desempeño de varios algoritmos de control sobre el modelo para estudiar su respuesta en frecuencia y de esta manera poder seleccionar el modelo más adecuado para controlar, en este caso la intensidad de la señal emitida por el piezo eléctrico para en consecuencia poder asegurar que el porcentaje (%) del nivel de eco es de al menos del nivel requerido para la aplicación, esto para efectos de asegurar que la señal reflejada será lo suficientemente buena para ser reconocida apropiadamente por el sensor receptor, y así la medición de la distancia sea confiable.

Digamos por ejemplo, para el caso de los pozos de agua, no existe hoy en día un sensor electrónico que mida la profundidad y las razones del porque no existe es precisamente porque, los sensores convencionales son hecho para una rango

predefinido, y ¿Cómo saber de qué rango será el sensor a usar si no se conoce la profundidad del pozo y esto es precisamente lo que se quiere medir.

Existe una gran diversidad de algoritmos de control para ser aplicados: control tradicional proporcional-integral-derivativo (PID), modos deslizantes, redes neuronales, etc., sin embargo, solo mediante un análisis serio y la aplicación de técnicas como el lugar de las raíces, observabilidad, controlabilidad, espacio de estados, etc.

Se puede tomar la decisión correcta de cual algoritmo de control es el más óptimo a utilizar, todos estos estudios deberán ser aplicados sobre el modelo sistémico propuesto en base a un estudio analítico del estado del arte. Sin embargo, también es necesario verificar mediante simulaciones, el desempeño de al menos dos algoritmos de control, para efectos de poderlos comparar. Una vez descritos diversos aspectos relativos a este trabajo de investigación, continuamos con la descripción de la estructura de esta investigación.

En el Capítulo 1, se presenta el marco contextual, donde se enmarcan los conceptos básicos más importantes indicando hacia dónde va dirigida esta investigación a fin de orientar al lector acerca de que se trata, y la importancia de este, para coadyuvar al buen entendimiento de los siguientes capítulos. Este se comprende de los antecedentes, los cuales brindan el contexto de los conceptos e ideas necesarias para el entendimiento del estudio realizado, también se plantea la problemática, la cual pone en claro cuál es el reto a vencer o resolver en la situación actual del estado del arte. Así mismo, para que el lector tenga un buen punto de referencia de que es lo que se busca lograr en este estudio se tienen los objetivos generales y específicos, además de la justificación y la aportación científica, que van a soportar la importancia de este estudio.

El Capítulo 2, trata de la metodología de investigación la cual está basada en el Método de Investigación Científico, con el cual se guía este estudio de investigación. Se presenta también el marco teórico que dará los conceptos generales que servirán de guía para un buen entendimiento del siguiente capítulo, el cual, debido a su contenido de análisis y desarrollo requiere de un apoyo o guía de conceptos claves para la investigación, como lo es el control por modos deslizantes, oscilaciones en fluidos (dado que el fenómeno acústico es mecánico a través de un fluido).

Posteriormente, el Capítulo 3 tiene por objeto el de realizar el desarrollo del trabajo, mediante un análisis, un modelo sistémico comprendido por modelos tales como el modelo conceptual de control, el modelo del control automático a nivel industrial y el modelo equivalente con el cual se va a trabajar. Después de obtener los modelos, se desarrollan los sistemas o algoritmos de control en lazo cerrado, para de ahí obtener la función de transferencia y su espacio de estados, para de ahí poderle aplicar algoritmos de control como el de modos deslizantes mediante la estimación de parámetros.

Finalmente, se presentan las conclusiones que se obtuvieron en ésta investigación; así como las recomendaciones para desarrollar trabajos futuros.

CAPÍTULO

1

MARCO CONTEXTUAL

Este capítulo contiene aspectos introductorios relativos al desarrollo de la investigación; en primera instancia se presentan los antecedentes y la problemática, los objetivos de la investigación y, la justificación del desarrollo de ésta investigación.

1.1 ANTECEDENTES

El mundo se organiza alrededor de sistemas de todas clases, algunos son estructurados por el hombre y otros han evolucionado. Algunos sistemas son pequeños y manejables como la familia, otros como la política son mucho más complejos. Cualquiera que sea nuestro trabajo, nos ofrece el reto de enfrentarnos a organizaciones y sistemas, y un análisis de esos sistemas, revela que comparten una característica: la complejidad [4].

Dentro de los sistemas estructurados por el hombre, se puede numerar un sin fin de diseños y aplicaciones, dentro de los cuales, la mayoría se desarrollan con el fin de satisfacer alguna necesidad y de alguna manera, facilitar el trabajo al ser humano, a la vez que brindan avances en la ciencia y la tecnología, respondiendo o contribuyendo a soluciones parciales o inexistentes hasta el momento [2].

Así, podemos mencionar que el diseño es un proceso creativo que cuestiona los supuestos en los cuales se han estructurado las formas antiguas. Éste demanda una apariencia y enfoque totalmente nuevos, a fin de producir soluciones innovadoras con la capacidad de proveer soluciones satisfactorias.

Muchos de los problemas que surgen en los sistemas, se derivan de la incapacidad de los administradores, planificadores, analistas para diferenciar el mejoramiento de sistemas y diseño de sistemas. El mejoramiento significa la transformación o cambio que lleva a un sistema más cerca del estándar para el cual se diseño, involucra determinar las razones de las desviaciones no esperadas [1].

Teniendo en consideración los párrafos anteriores, donde se esboza la visión sistémica entre diseño y mejoramiento de sistemas, pasamos a desarrollar los antecedentes directos del tema de sensores acústicos.

Los dispositivos acústicos han sido usados comercialmente desde hace más de 60 años. La industria de las telecomunicaciones es su más grande consumidor con alrededor de 3 billones de filtros acústicos al año, principalmente de teléfonos celulares. Estos dispositivos acústicos son típicamente dispositivos de onda acústica de superficie (SAW), y actúan como filtros pasa-banda en radio frecuencia y frecuencia intermedia de dispositivos electrónicos transceivers [39, 54].

Algunas de las aplicaciones de los dispositivos acústicos podrían igualar a la demanda del mercado de las telecomunicaciones: Esto incluye aplicaciones en el ramo automotriz (mediciones de torque y presión), aplicaciones médicas (sensores químicos), aplicaciones generales como en temperatura, vapor, humedad, sensores de masa, etc.

Los sensores acústicos son extremadamente versátiles, tanto que apenas está comenzando su potencial comercial. Son competitivos en precio, inherentemente robustos, muy sensibles, e intrínsecamente confiables. Los sensores acústicos son

inalámbricos en el sentido de que no hay cables conectados entre el sensor y el objeto a medir, esto es útil cuando se trata de monitorear ciertos parámetros y objetos en movimiento, tales como la presión del aire en las llantas o torque en pernos y vástagos.

Los sensores que requieren una potencia de operación son altamente deseables para el monitoreo remoto de vapores, suciedad y temperatura. Otras aplicaciones incluyen la medición de la fuerza, aceleración, velocidad angular de choque, viscosidad, desplazamiento y flujo. Los sensores acústicos también tienen una sensibilidad acústico eléctrica, permitiendo la detección de niveles de PH, contaminantes iónicos, y campos eléctricos. Los sensores de onda acústica de superficie han probado ser los más sensibles en términos generales, debido a su grande densidad de energía sobre la superficie a sensar. Para el sensado de líquidos, una clase especial de sensores acústicos de superficie, llamados de corte horizontal, probaron ser los más sensibles. Muchas otras investigaciones se están realizando para futuras aplicaciones[39,54].

Hoy en día, existe poca investigación, poca diversidad de aplicaciones de sensores acústicos, en comparación de otros tipos de sensores como los fotoeléctricos. Esto debido a que las aplicaciones más sencillas industriales pueden resolverse con sensores fotoeléctricos en su mayoría, entre otros como los inductivos, capacitivos y magnéticos, sobre todo en la industria automotriz. Sin embargo, el que no existen muchas aplicaciones para los sensores acústicos no significa que no tengan un gran potencial de aplicación. La tecnología avanza cada vez más y el mercado demanda cada vez más que nuevas aplicaciones sean satisfechas por los sensores [43].

Es aquí donde la industria mundial está entrando a explorar las ventajas que tienen los sensores acústicos por encima de los demás, por ejemplo, hablemos de la industria de los aceptadores de monedas que usan en las máquinas dispensadoras de productos (vending machines) como las de Marínela, Coca Cola, Bimbo, etc. Estas máquinas tienen un sistema electrónico que reconoce la moneda que colocó el cliente y estas monedas se van a un tubo en donde se almacena, y en donde existe un tubo por cada denominación de moneda que acepta esta máquina.

Este tipo de industria nació a fines de los 60s y estas máquinas solo podían darse cuenta cuando los tubos estaban llenos pero no cuantas monedas contenían, conforme creció esta industria y se hicieron comunes en diversos lugares como plazas comerciales, surgió la necesidad de que el que rellena y recoge el dinero de estas máquinas supiera previamente cuantas monedas había de cada denominación, antes de llegar al sitio, para llegar preparado el dinero a depositar para el cambio y saber de antemano cuánto dinero había. La implementación de un sensor que detectara que cantidad de monedas había en cada tubo fue decisivo para ver que fabricante de dichos aceptadores de monedas se quedaba con el mercado, entre ellos estaban MEI, COINCO, Coinlux, entre otros. Este sensado de nivel de monedas solo fue óptimo con un sensor acústico. Este sensor acústico revolucionó esta industria.

Otro caso que podemos mencionar, es la medición de los contenedores gigantes (silos) de granos, pellets de resina, u otros sólidos pequeños, los cuales no asientan y no forman un perfil de nivel superior horizontal, como lo hacen los líquidos, es decir, cuando el contenedor se llena de granos (por ejemplo) el perfil superior queda en forma de cerrito y cuando el contenedor es vaciado, el perfil superior del contenedor queda con un boquete con la forma de un embudo (ver Figura 1).

Este caso no podía ser medido por ningún sensor electrónico, pues el sensor industrial más común para medir nivel apenas alcanzaba estos rangos de nivel (alrededor de los 10m) siendo inexacto, lo cual a este rango introduce mucho error, sin embargo el obstáculo mayor, es que este tipo de sensor solo mide la distancia en un punto, y como comentamos, el perfil del nivel no es horizontal por lo que medir un solo punto no sirve de nada.

Esta aplicación fue apenas resuelta por la compañía APM apenas en el año 2012, ya que los sensores acústicos convencionales solo tocan un punto con el haz de luz, por lo que si se quiere medir el nivel o volumen de un sólido a granel dentro de un contenedor, entonces con un sensor acústico convencional dado que la superficie de este contenido sólido no es lineal sino de forma irregular, pues solo los líquidos toman la forma del recipiente que los contiene, entonces la distancia o nivel que se midiera en la orilla no sería la misma que la que se mediría en el centro o en otro punto. El sensor acústico de APM lo que hace es hacer un barrido en toda la superficie del área que alcanza a abarcar la señal acústica (esto no sería posible con un sensor de otro tipo), y manda la señal de barrido a una computadora que tiene un programa que traduce este barrido en forma de gráfico y datos que muestran como es el perfil de la superficie de este contenedor, pudiendo así calcular el nivel equivalente de este material y calcular así el volumen contenido, esto es de gran utilidad ya que la medición tradicional ha sido usando otros métodos, por ejemplo un yo-yo (se arroja un cable que al tocar la superficie cierra el circuito eléctrico y con un cálculo se saca la distancia/profundidad o sea la longitud del cable que se introdujo [3]).

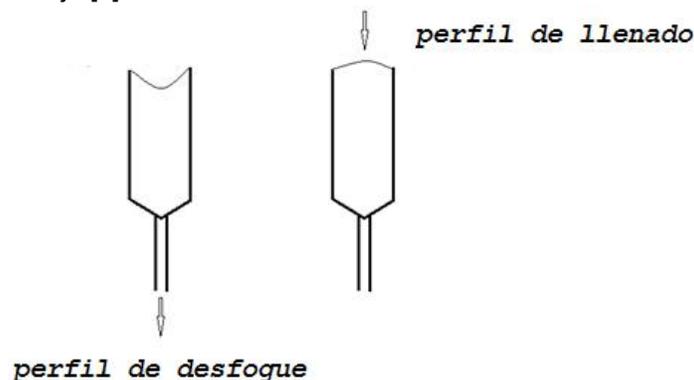


Figura 1. Perfiles de desfogue o llenado de los silos.
Fuente: Elaboración propia.

Los dos ejemplos citados anteriormente (el del medidor de nivel de monedas y el del volumen de silos) son solo dos grandes aplicaciones que fueron posibles solamente con el uso de sensores acústicos, aplicaciones que tardaron mucho tiempo en resolverse hasta que se pensó en una aplicación acústica.

Una gran cantidad de aplicaciones están hoy en día sin resolverse mediante el uso de sensores electrónicos y en las que, según se presenta en este trabajo de investigación, pueden resolverse solo con la aplicación de sensores acústicos y en este estudio también pueden sentarse las bases para incrementar, de una manera impactante, el desempeño de todos los sensores existentes hoy en día, ya sean de cualquier índole: Fotoeléctricos, capacitivos, inductivos, magnéticos, acústicos, etc. por lo que la aportación de este trabajo de investigación puede no tener precedentes para el desarrollo tecnológico de cualquier tipo de sensor existente hoy en día.

Citando solo algunos ejemplos, de aplicaciones para las cuales no existe hoy en día un sensor electrónico, y para los cuales se puede aplicar un sensor acústico basado en este estudio, están los siguientes:

- a) Medición de profundidad de pozos de agua.
- b) Medición de profundidad de acuíferos.
- c) Medición de profundidad de ríos y lagos.
- d) Medición de profundidad de fosas profundas.
- e) Medición de profundidad o distancias en el ámbito minero.
- f) Medición de alturas mayores a los 10m.
- g) En general la mejora en la capacidad de autoajuste de rangos de medición de cualquier sensor.

Los sensores acústicos industriales típicos no cubren ninguna aplicación de las mencionadas anteriormente (véase incisos del a-f), como ejemplo se citan los siguientes:

Tabla 1. Marcas de sensores acústicos industriales.
Fuente: Elaboración Propia

MARCA	TIPO
APM	Sensor acústico de nivel y de volumen para sólidos
APM	Sensor acústico de nivel inalámbrico
Bin Master	Sensor acústico de nivel y de volumen para sólidos
Wenglo	Sensores acústicos de presencia
Balance system	Sensor acústico para rectificadoras
Dytran	Sensor de presión
Marpro	Sensor acústico para rectificadoras
Endevc	Sensor acústico para medir presión
Kistler	Sensor acústico piezoeléctrico
Siemen	Sensor acústico echomax para medición de durezas

Se hizo previamente una revisión de artículos científicos para verificar el estado del arte con respecto al tema relacionado con este trabajo y utilizando varios buscadores no se encontró nada escrito que se asemeje al punto de investigación planteado (control automático del porcentaje de onda reflejada para un sensor acústico), solo como ejemplo, en cuanto al buscador SciFinder, el día 26 de Septiembre del 2012, poniendo la palabra sensor acústico, se encontraron 157 artículos conteniendo la palabra sensor acústico. Estos artículos tienen alguna relación con sensores acústicos pero ninguno de ellos contiene una investigación sobre el punto de investigación planteado (autorregulación del eco para autorregulación de rango).

1.2 PLANTEAMIENTO DE LA PROBLEMÁTICA

En el contexto de la investigación científica [8], afirma que el planteamiento de un problema es la fase más importante de todo el proceso de investigación.

Considerando la observación anterior, podemos mencionar que una preocupación muy importante, común a diferentes fenómenos, es la posibilidad de que se puedan hacer predicciones sobre ellos [12]. Por ejemplo, si se sabe que hoy está lloviendo y se quisiera predecir si lloverá mañana o si lloverá pasado mañana; es decir, la posibilidad de poder predecir lo que ocurrirá en el futuro si sabemos en qué situación nos encontramos ahora.

El camino que sigue la ciencia, a partir de la observación de diferentes fenómenos, lo podemos resumir en cuatro etapas, que cumplen con los objetivos básicos de ésta. Las cuatro etapas son [25]:

1. Comprensión.
2. Explicación.
3. Predicción.
4. Control.

Obviamente, el recorrido de las etapas hasta la cuarta, el control, supone que se han cumplido las tres anteriores.

Los sensores acústicos han sido la solución óptima para el control de diversos dispositivos a través del sensado, por ejemplo, del nivel de monedas que alberga un tubo de un aceptador de las máquinas dispensadoras de productos, sin embargo, aun no son lo suficientemente robustos, ya que hoy en día se desconocen con precisión las variables que afectan la respuesta acústica, principalmente el eco, por eso es preciso determinar con precisión mediante un modelaje matemático estas variables para liberar el gran potencial que tienen todos los sensores acústicos, a continuación una explicación de esta problemática que enfrentan los sensores acústicos de nivel de tubo.

La problemática medular que detiene el gran potencial de utilización de los sensores acústicos es sin duda, el desconocimiento de la afectación de las variables y perturbaciones posibles dado que es campo relativamente nuevo donde apenas se está visualizando su potencial comercial. Es por eso que un modelaje matemático sistémico, y un estudio en respuesta a señales (variables) y perturbaciones es básico para el conocimiento del comportamiento que tendrá el sensor acústicos dependiendo de cada aplicación a realizar y las condiciones y restricciones de cada caso [5].

En síntesis, la problemática principal reside en un desconocimiento a respuesta en señal de un modelo matemático cibernético [5, 36].

Estos sensores pueden ser analógicos y digitales, los digitales son simples sensores de proximidad que dependiendo de su rango de alcance, pueden decir si está o no presente el objeto a sensar, estos se usan para dispositivos a prueba de error, es decir, en el sensado de piezas que se están ensamblando para verificar que no le falten partes como empaques, postes, clips, etc. por falta de descuido de la persona que está ensamblando. Los analógicos son capaces de decir a qué distancia se encuentra el objeto a medir y por tanto con ello también podemos saber si está presente.

Los sensores analógicos acústicos debido a su naturaleza se pueden utilizar para sensar niveles en tanques o silos que albergan materiales difíciles de sensar con luz (laser, IR, etc.), además de que son sensores óptimos para medir líquidos inflamables siempre y cuando cuenten con ciertas certificaciones.

En la industria actual no es común encontrar sensores acústicos que midan el volumen de lo que contiene un silo o un tanque, es decir, lo común es que solo miden el nivel, además de que un sensor de luz solo mide el nivel, ya que como el haz de luz solo impacta en un punto, entonces no puede medir el volumen contenido.

En cambio hoy en día la compañía APM (ver tabla 1) sacó un modelo de sensor acústico que puede calcular no solo el nivel de un taque o silo sino también el volumen contenido, esto se logra emitiendo varias señales acústicas que cubran el total de la superficie del material contenido, de tal manera que hace un barrido al perfil o superficie del material, sacando así su nivel equivalente, obviamente esto es útil en casos de que el material es por ejemplo bolitas de resina o aun más claro, pongamos el ejemplo de granos de maíz, puesto que no es un líquido, la superficie tiende a ser en forma de cerrito cuando se llena el silo y en forma de embudo cuando se extrae maíz por la parte inferior del silo, en la industria esta es una aplicación muy útil que anteriormente solo se podía media por medio de yoyos (entiéndase por esto en su concepto más simple a un alambre que en su extremo tiene dos bornes que cierran el circuito cuando tocan la superficie del perfil), lo cual es un método muy inexacto, aquí es donde están entrando las grandes aplicaciones acústicas.

En virtud de lo expuesto, el presente trabajo de investigación se orienta al diseño de un sistema cibernético [5] que permita el manejo de respuesta en señal de sensores acústicos. Pretendiendo dar respuesta a las siguientes preguntas de investigación:

1. ¿Un modelo sistémico cibernético basado en modos deslizantes es una opción que resuelva satisfactoriamente el problema de la autorregulación en sensores acústicos?
2. ¿Un modelo sistémico cibernético basado en modos deslizantes puede cumplir con la ley de Ashby de tal forma que tenga un buen desempeño?

Se puede observar que el reto mayor que enfrentan este tipo de sensores es su precisión y su alcance de medición, el cual depende del % de eco recibido por la señal reflejada, ya que la precisión aquí cuesta dinero, es decir, la precisión de estos sensores también dependen de la precisión de todo el mecanismo acústico por lo que estos sensores normalmente son caros, sin embargo precisamente con el uso de algoritmos de control que optimicen y automaticen estos sensores, entonces se podrá sacar más aplicaciones y más accesibles, de ahí la importancia de la investigación de mejoras en el ámbito científico-tecnológico.

Este reto puede resolverse mediante la aplicación de algoritmos de control para mejorar la respuesta a perturbaciones [14, 36, 48, 50].

1.3 OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

Diseñar un sistema cibernético representativo para el manejo de respuesta en ondas acústicas utilizadas en los sensores acústicos, verificando si este sistema cibernético es capaz de resolver el problema de auto-regulación de los sensores acústicos, entre otros modelos afines.

OBJETIVOS ESPECIFICOS

- 1.- Explicar el fenómeno de la medición del sonido y sus efectos, basado en el piezoeléctrico.
- 2.- Evaluar alguna técnica innovadora de control por retroalimentación de estado, sintetizando un algoritmo de control por retroalimentación de estado usando la técnica por modos deslizantes.
- 3.- Demostrar que al utilizar la técnica por modos deslizantes en el diseño de la ley de control por retroalimentación de estado se obtiene como característica intrínseca de esta técnica, robustez del sistema en lazo cerrado ante variaciones en sus parámetros.

1.4 JUSTIFICACIÓN

La industria mundial, ya sean organismos públicos o privados, enfrentan retos fuertes que pueden resultar en la quiebra financiera de una empresa ante sus competidores, pues estamos ante una competencia mundial tecnológica que no tiene tregua, es por eso que una problemática planteada en el punto 1.2 es suficiente justificación para la realización de esta investigación, pues estamos ante una insuficiencia de los medios actuales de la Ingeniería de Sistemas y control desarrollados hasta hoy en día para resolverla, es por eso que hay que innovar en el estado del arte para resolver dicha problemática (ver sección 1.2) y, por otro lado tenemos un gran impacto positivo que pueden dar los resultados de este trabajo para satisfacer las demandas no satisfechas de aplicaciones aun no atendidas, como se mencionó en los antecedentes (ver sección 1.1). Con lo que se justifica la necesidad académica, socio-económica y, en su caso, de desarrollo tecnológico para determinar y resolver las necesidades de las aplicaciones ya descritas, a través de este proyecto de investigación.

Pensamos que, el conocimiento científico se verá beneficiado con los resultados de esta investigación y servirá de parte aguas para futuras investigaciones a realizar por la comunidad científica mundial, y en su momento servirá de base para revolucionar tecnológicamente los sensores, sobre todo los acústicos.

Es importante aclarar que el enfoque de este trabajo es científico y no tecnológico, pues se deja a que en un futuro se puedan aplicar y extender el desarrollo de este trabajo al ámbito tecnológico.

Este trabajo de estudio también nos ha dado el desarrollo y resultados de investigación suficientes para escribir los siguientes artículos de publicación científica (ver anexos):

1. - *“Sliding modes control applied to a mini aircraft pitch position model”*

R. Carreño, M. Patiño, J. Patiño, (2013), [13].

2. - *“Parameters Estimation for sliding mode control into Acoustic Sensor”*

R. Carreño, M. Patiño, J. Patiño, (2014), [14].

López Cerezo (1988), afirma también que: toda investigación en alguna medida tiene la doble implicación, teórica y práctica, sobre todo cuando se tratan temas poco explorados y de los cuales se deriva algún prototipo.

Por otra parte, en base a las limitantes de los sensores acústicos utilizados en la actualidad, es conveniente y útil la realización de un modelo sistémico cibernético [1-5, 7, 8,10-12, 17, 18, 26, 49-51] para liberar el potencial de los sensores acústicos, lo que abriría una gama de aplicaciones no explotadas hoy en día como sensores de medición de profundidad de pozos, profundidad de acuíferos, creación de sensores acústicos auto-regulados en rango, etc.

El diseño de este modelo sistémico-cibernético contribuye al conocimiento teórico científico universal actual, proponiendo algoritmos de control por retroalimentación de estados no aplicados con anterioridad para lograr la auto regulación de rango propuesta para los sensores acústicos, cumpliendo así también una labor social si se usara para el desarrollo tecnológico de sensores basados en estos principios.

El conocimiento científico contenido en este estudio también propone las bases para el desarrollo experimental de nuevas tecnologías no solo en sensores acústicos sino también en todo tipo de sensores, sea cual sea el modo de propagación de la onda. Se ha hecho un estudio del estado del arte y no existe en el mundo hoy en día, un estudio que realice esta investigación.

Una de las bondades de este estudio es que los recursos financieros, humanos y materiales son factibles dado que no es caro construir un prototipo basado en un piezoeléctrico [6, 14, 42] el recurso humano para la construir el prototipo está al alcance pues sólo requiere recurso humano con conocimiento de Ingeniería en el ramo, y los materiales piezoeléctricos son accesibles pues son cerámicas comunes y baratas, un piezoeléctrico común de cerámica podría costar alrededor de 20 pesos Mexicanos.

1.4.1 APORTACIÓN

La aportación que este trabajo pretende lograr en el campo de la Ingeniería de Sistemas consiste en los siguientes puntos, fundamentalmente:

En el marco de una investigación doctoral, se diseña un modelo que permita relacionar de una manera satisfactoria teorías de control y cibernética aplicadas de manera satisfactoria en el diseño de los subsistemas que comprenden el estereotipo de los sensores acústicos actuales, los cuales se enfocan principalmente al beneficio de la sociedad. En la cual se puede resaltar que: a) Es creativa e innovadora; b) La magnitud del fenómeno acústico es de considerable repercusión mundial, por ello, requiere de una consideración seria y adecuada al desarrollo y avance tecnológico mundial con propuestas revolucionarias en el ámbito de interés.

Se fundamentará la posibilidad de desarrollar bases sólidas de mejora continua del modelo (Modelo cibernético) que deberá ir considerando más variables para un análisis más completo, pero que sin duda conducirá a desarrollar un modelo más complejo, para los que se crearan incluso sus propias herramientas (software) de análisis y reformulación de diseños, ya que no se encuentran actualmente en el mundo, por tratarse de aplicaciones especializadas y acorde al análisis requerido. Involucrando para un mejor análisis las diferentes especialidades que deben intervenir y colaborar por la complejidad del fenómeno [4, 5].

El estudio en respuesta en señal realizado con el modelo cibernético con modos deslizante desarrollado en este estudio sienta las bases científicas para que en un futuro se haga un desarrollo tecnológico que resuelva aplicaciones de sensado de profundidad de pozos de agua, cuencas de agua, ríos subterráneos, etc. con sensores acústicos, así como para el desarrollo tecnológico de la autorregulación del movimiento de ascenso y descenso de aviones no tripulados que tuviera tareas como rastreo de marihuana, monitoreo de tráfico vial, toma de fotografía aérea, etc., sensado de profundidad de grietas sísmicas para ahorrarse dinero en perforaciones para hacer dicha medición.

CAPÍTULO

2

MÉTODO DE INVESTIGACIÓN Y MARCO TEÓRICO

En éste capítulo se ilustra la manera en la que se lleva a cabo la investigación, de acuerdo al método general de investigación científica de Mario Bunge; también contiene la información teórica de interés para la investigación, la cual ha sido analizada y extraída de la literatura que se consultó para el desarrollo de esta investigación.

2.1 MÉTODO DE INVESTIGACIÓN

En investigación, el método científico es el conjunto de etapas y reglas que señalan el procedimiento para desarrollar una investigación, cuyos resultados sean aceptados como válidos para la comunidad científica [12].

Dentro del modelo general de investigación científica existen también muchas versiones de métodos o procesos de investigación [25].

En forma sintética, el método científico abarca los siguientes pasos [25]:

A. Planteamiento del problema:

- Reconocimiento de los hechos.
- Descubrimiento del problema.
- Formulación del problema.

B. Construcción del modelo teórico:

- Selección de los factores pertinentes.
- Planteamiento de la hipótesis central.
- Operacionalización de los indicadores de las variables.

C. Deducciones de consecuencias particulares:

- Búsqueda de soportes racionales.
- Búsqueda de soportes empíricos.

D. Aplicación de la prueba:

- Diseño de la prueba.
- Recopilación de datos.
- Inferencia de conclusiones.

E. Introducción de las conclusiones en la teoría:

- Confrontación de las conclusiones con las predicciones.
- Reajuste del modelo.
- Sugerencias para trabajos posteriores.

Se puede observar en la figura 2.1, que el desarrollo de los pasos del método científico propuesto, los podemos hacer corresponder también con la estructura y el desarrollo secuencial del trabajo de tesis doctoral.

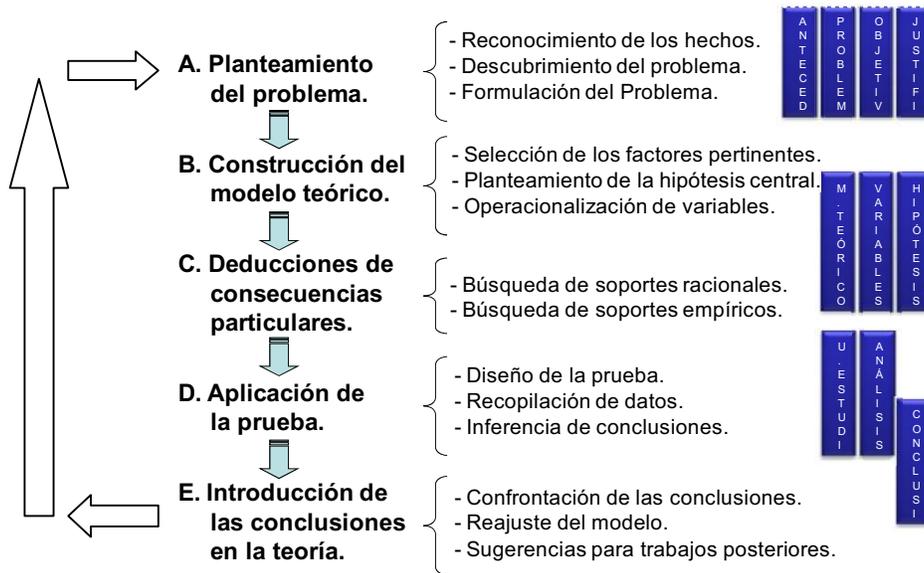


Figura 2.1. Método basado en el método científico con enfoque sistémico Trans-disciplinario.
Fuente: Elaboración propia.

El método que utilizado en este trabajo es de elaboración propia pero está basado en el método científico con un enfoque sistémico interdisciplinario con retroalimentación.

Este método es interdisciplinario dado que utiliza varias ciencias o ingenierías para realizar el estudio de investigación (ver figura 2.2)

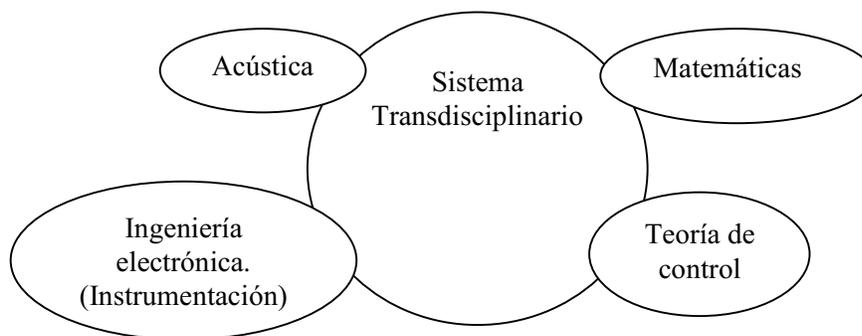


Figura 2.2 Metodología con enfoque interdisciplinario.
Fuente: Elaboración propia.

En forma condensada, los pasos que se siguen en la metodología empleada son los siguientes:

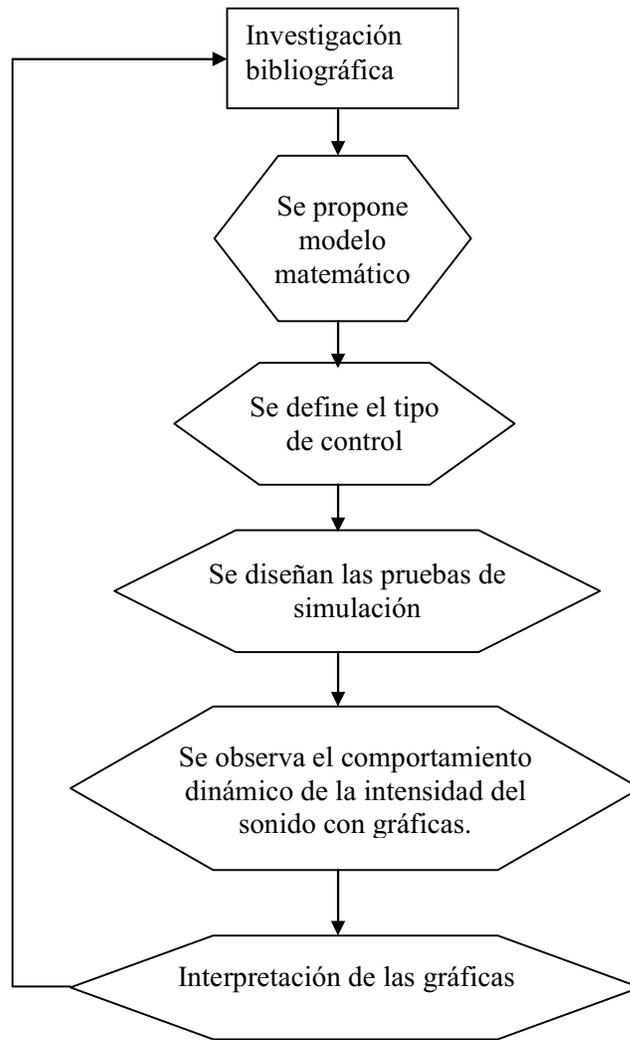


Figura 2.3 Esquema condensado de los pasos de la metodología.
Fuente: Elaboración propia.

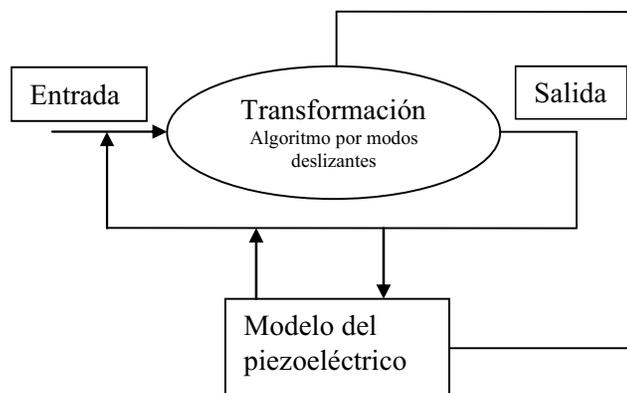


Figura 2.4 Estructura a bloques del modelo sistémico cibernético.
Fuente: Elaboración propia.

2.1.1 TIPO DE INVESTIGACIÓN

La investigación que se desarrolla será en primera instancia documental, porque consistirá en un análisis de la información escrita [8], aunque principalmente es exploratoria, ya que se centra en una investigación no tratada o poco tratada por el mundo científico, la cual es, *la autorregulación del rango en sensores acústicos*.

Es correlacional, ya que examina la relación entre variables o resultados de variables. Y también es descriptiva dado que busca explicar las causas que ocasionan y en qué condiciones se puede utilizar la autorregulación en un sensor acústico, y hasta cierto punto, también es descriptiva, ya que dice “en un estudio descriptivo se selecciona una serie de cuestiones y se mide cada una de ellas en forma independiente para así hacer la descripción”, dado que en este estudio se realizan gráficas de simulación de parámetros y variables asociadas [25].

De acuerdo con Cazares Hernández [15], la investigación documental depende fundamentalmente de la información que se tiene o se consulta en documentos. Las principales fuentes documentales son: documentos escritos (libros, revistas, etc.), documentos filmicos (películas, diapositivas, etc.) y documentos grabados (discos, cintas, disquetes, etc.).

En investigación documental es importante mencionar las investigaciones denominadas “estado del arte”, que se caracterizan por abordar problemas de carácter teórico y empírico, y que son relevantes de un tema objeto de estudio.

Los “estados del arte” son estudios cuyo propósito es mostrar el estado actual del conocimiento en un determinado campo o un tema específico. En consecuencia tales estudios muestran el conocimiento relevante y actualizado, las tendencias, los núcleos problemáticos, los vacíos, los principales enfoques o escuelas. Los “estados del arte” no son un inventario del conocimiento de un tema objeto de estudio, ya que implican un análisis de la información documental revisada, tomando en cuenta consideraciones epistemológicas y criterios contextualizados en los que se dieron y se dan los conocimientos.

2.2 MARCO TEÓRICO

El marco teórico tiene como función básica servir de fundamento teórico de las investigaciones científicas. El marco teórico que se desarrolla para esta investigación contempla los temas principales que se muestran en la tabla 2.1

Tabla 2.1 Compendio del Marco Teórico.
Fuente: Elaboración Propia.

1	SISTEMAS Y CONTROL.	2.2.1- Sistemas. 2.2.2- Control. 2.2.3- Cibernética de primer orden. 2.2.4- Cibernética de segundo orden.
2	SEÑALES EN SENSORES ACÚSTICOS.	2.2.5 - Planteamiento de desacoplamiento a perturbaciones por modos deslizantes como una alternativa para solucionar el problema del eco del sonido. 2.2.6- Oscilaciones en fluidos.

2.2.1 SISTEMAS

En la actualidad somos testigos de grandes problemas y situaciones complejas a los que nos enfrentamos prácticamente en nuestras actividades sociales, empresariales, políticas, económicas o ecológicas y/o cualquier combinación de estas; en donde, las soluciones viables implican relaciones ganar-ganar para todos los participantes, y que al ser complejas exigen un cambio de paradigma de cómo debemos enfocar el problema. Por ejemplo: ¿Qué tienen en común las siguientes situaciones?

1. Algunas personas piensan que los problemas de hoy son respuestas de malas decisiones pasadas.
2. La situación de los indígenas en el sur del país.
3. La sociedad piensa que la corrupción puede acabarse.
- 4.- La producción de una empresa.

Pues que:

1. Son altamente acopladas, dado que las relaciones pesan más que los estados.
2. Son fenómenos dinámicos.
3. Se comportan atípicamente y se resisten a alinearse a políticas generalizadoras, obvias y simplistas.
4. No son causales, dado que su comportamiento causa-efecto cambia con el tiempo.
5. Es difícil extrapolarlos a largo plazo.

¿Entonces qué hacemos para resolverlas, si el uso de herramientas clásicas y convencionales no es posible? Es necesario probar otras herramientas, conceptos y teorías que permitan cambiar los comportamientos de una forma estructural, y generar eventos y resultados acordes a un ambiente integrado, holístico y sistémico. El enfoque que permite enfrentar las situaciones anteriores se conoce como enfoque sistémico, y ha sido desarrollado por varios autores, entre los cuales podemos mencionar a Ludwing Von Bertalanffy, Stafford Beer, Russell Ackoff, Jay Wright Forrester, Peter Checkland, etc, [1-5, 7-12, 18, 25, 27, 49, 51-53] pero son estructuradas por Peter Senge, quien lo explicito como: las 11 Leyes del pensamiento sistémico, las que se numeran a continuación [44].

Leyes del pensamiento sistémico:

1. Los problemas de hoy provienen de las soluciones de ayer.
2. Cuanto más se presiona al sistema, este más reacciona.
3. El comportamiento mejora antes de empeorar.
4. El camino fácil usualmente lleva al mismo lugar.
5. La cura puede ser peor que la enfermedad.
6. Cuánto más rápido se avance, más lento se llega.
7. La causa y efecto no necesariamente están relacionadas en el tiempo y espacio.
8. Pequeños cambios producen grandes resultados.
9. Dividir elefantes no produce elefantitos.
10. Se puede encontrar el pastel y comerlo, pero no todo al mismo tiempo.
11. No hay culpas.

Todos los puntos anteriores al ser agrupados con conceptos, teorías y experiencias pueden agruparse en: *Los Principios básicos del pensamiento sistémico*. La teoría general de sistemas o TGS, como se plantea en la actualidad se encuentra estrechamente ligada con el trabajo del biólogo alemán Ludwing Von Bertalanffy [10]. Es una herramienta que permite la explicación de los fenómenos que suceden en la realidad y que permite hacer posible la predicción de la conducta futura de esa realidad, a través del análisis de las totalidades y las interacciones internas de estas y las externas con su medio.

La teoría general de sistemas o TGS [10] aplica mecanismos inter-disciplinarios, que permitan estudiar a los sistemas no solo desde el punto de vista analítico o reduccionista

el cuál estudia un fenómeno complejo a través del análisis de sus partes, sino también con un enfoque sintético e integral, que ilustre las interacciones entre las partes. (El todo es mayor que la suma de las partes).

La TGS describe un nivel de construcción teórica de modelos que se sitúa entre las construcciones altamente generalizadas de las matemáticas puras y las teorías específicas de las disciplinas especializadas que en los últimos años han hecho sentir la necesidad de un cuerpo sistemático de construcciones teóricas que pueda discutir, analizar y explicar las relaciones generales del mundo empírico, busca establecer un grado óptimo de generalidad, sin perder el contenido [10].

Dado que la ciencia se divide en subgrupos, y que existe una menor comunicación entre diferentes disciplinas, mayor es la probabilidad de que el crecimiento total del conocimiento sea reducido por la pérdida de comunicación, por lo que otro objetivo de la TGS es el desarrollo de un marco de referencia de teoría general que permita que un especialista pueda alcanzar, captar y comprender la comunicación de otro especialista, a través de un vocabulario común.

Existen diferentes disciplinas que buscan una aplicación práctica de la TGS, y dentro de nuestro interés de investigación, podemos mencionar las siguientes [12]:

- Cibernética: se basa en el principio de la retroalimentación y homeóstasis.
- Teoría de la información: introduce el concepto de información como una cantidad medible, mediante una expresión isomórfica con la entropía de la física.
- La teoría de decisiones: establece dos líneas, una similar a la teoría de juegos en la cual a través de procesos estadísticos se busca que optimice el resultado, y la otra, el estudio de la conducta que sigue un sistema social, en su totalidad y en cada una de las partes, al tomar una decisión.

Ingeniería de Sistemas: el interés se refiere a que entidades cuyos componentes son heterogéneos pueden ser analizados como sistemas.

Así, la TGS [11] supone que a medida que los sistemas se hacen más complejos, para la explicación de los fenómenos o comportamiento de los sistemas se debe de tomar en cuenta su entorno.

Los sistemas de acuerdo a su enfoque, su naturaleza y su uso, se han clasificado de diferentes maneras, por ejemplo una primera clasificación muy universal que obedece a la estructura de los sistemas y a la forma en que podemos clasificar los problemas y las soluciones, contempla a los sistemas como sistemas duros y sistemas suaves:

1. *Sistemas duros*: son típicamente los encontrados en las ciencias físicas y a los cuales se puede aplicar satisfactoriamente las técnicas tradicionales del método científico y del paradigma de ciencia. Admitirán procesos de razonamiento formales, esto es,

derivaciones lógico-matemáticas. Los sistemas duros se identifican como aquellos en que interactúan hombres y máquinas. En los que se les da mayor importancia a la parte tecnológica en contraste con la parte social. El comportamiento humano se considera tomando solo su descripción estadística y no su explicación. Los sistemas permiten procesos de razonamiento formal en los cuales las derivaciones lógico - matemáticas representan un papel muy importante.

Ya que los experimentos que se realizan en estos sistemas pueden ser repetidos obteniendo la misma información y evidencia, obteniendo relaciones Causa-Efecto, descritas por las variables que intervienen en los procesos, y a través de las cuales se pueden predecir situaciones futuras.

La objetividad de los sistemas duros proporciona además grandes ventajas para la aplicación de técnicas cuantitativas que requieren de variables fáciles de identificar y que representan las características del sistema bajo consideración. Su dureza se refiere a que su comportamiento y resultado son iguales aun siendo analizados por grupos interdisciplinarios. Tienen una relativa sencillez con que sus operaciones, características, relaciones y objetivos se pueden expresar en términos matemáticos.

Diseño de los procesos duros:

Es un proceso creativo que está principalmente relacionado con la coordinación de actividades, procedimientos de trabajo y utilización de toda clase de recursos con el fin de lograr ciertos objetivos que intentan eliminar un problema o satisfacer una necesidad.

Las principales fases para su diseño son:

- Recopilación de Información y pronóstico del futuro esperado del sistema a diseñar.
- Modelación del sistema.
- Optimización del sistema.
- Control del sistema.

2. *Sistemas Suaves*: Técnica cualitativa que puede ser usada en los sistemas estructurados y situación a-sistémica.

Forma de ocuparse de problemas situacionales en los cuales hay una actividad con un alto componente social, político y humano.

- La metodología de sistemas blandos se originó de la comprensión de sistemas duros estructurados, por ejemplo en la investigación de operaciones técnicas, son inadecuados para investigar temas de grandes y complejas organizaciones.
- Esta metodología fue desarrollada por Checkland.

Checkland [18] también realizó una clasificación, en la que considera a los sistemas de la siguiente forma:

- **Sistemas Naturales**: Aquellos sistemas que han sido elaborados por la naturaleza, desde el nivel de estructuras atómicas hasta los sistemas vivos, los sistemas solares y el universo.

- **Sistemas Diseñados:** Aquellos que han sido diseñados por el hombre y son parte del mundo real. Pueden ser de dos tipos: **Abstractos** y **Concretos**. Por ejemplo los sistemas diseñados abstractos pueden ser, la filosofía, la matemática, las ideologías, la religión, el lenguaje. Y como ejemplos de sistemas diseñados concretos podemos hablar de un computador, una casa, un auto, etc.
- **Sistemas de Actividad Humana:** Son sistemas que describen al ser humano epistemológicamente, a través de lo que hace. Se basan en la apreciación de lo que en el mundo real una persona o grupos de personas podrían estar haciendo, es decir, en la intencionalidad que tiene el sistema humano que se observe.
- **Sistemas Culturales:** Sistemas formados por la agrupación de personas, podría hablarse de la empresa, la familia, el grupo de estudio de la universidad, etc.

De acuerdo a las clasificaciones anteriores, podemos establecer que nuestra investigación obedece en primera instancia a un sistema duro, pero que por su evidente utilidad, incorpora la actividad humana e involucra el beneficio tangible para la sociedad.

2.2.2 CONTROL

Comencemos con la famosa frase: “Comunicación es Control”, la cual se le atribuye a Norbert Wiener [51-53], el padre de la cibernética o de la “ciencia del control”. Se le acredita a Wiener el logro de la teoría matemática, que mostro que el control de sistemas es una función del contenido de información. Expresa que los sistemas cerrados tienden hacia el equilibrio, donde la entropía se maximiza y se iguala a la unidad, y por otro lado, en sistemas abiertos, se puede contrarrestar esta tendencia al proporcionar al sistema “negentropía” o información e impulsándolo, por lo tanto, hacia estados de mayor organización y complejidad.

Se puede observar, que justo como la cantidad de información en un sistema, es una medida de su grado de organización, de la misma manera la entropía de un sistema es una medida de su grado de desorganización, y una es simplemente lo negativo de la otra.

La entropía, incertidumbre y desorganización, aumentan con la variedad, pero esta se reduce por la organización.

La información consiste en mensajes y mensajes de señales. En todos los casos, puede decirse que existe una probabilidad de distribución sobre la población de señales que puede utilizarse para transmitir el mensaje.

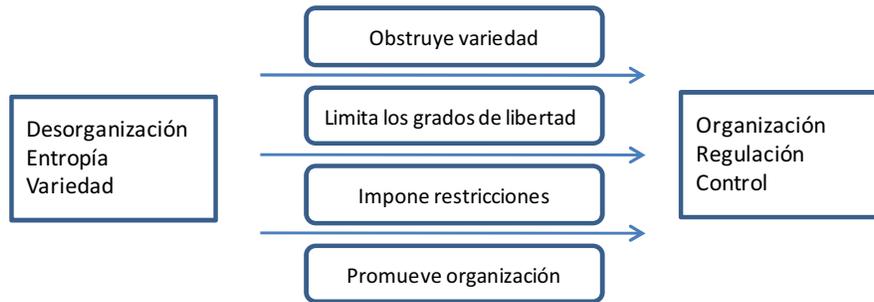


Figura 2.5 La información se opone a las tendencias de un sistema hacia la desorganización y entropía.
Fuente: Teoría General de Sistemas, Van Gigch, 2011

Cuando el canal de comunicación recibe algunos estímulos, éste debe seleccionar la respuesta apropiada entre todas las disponibles en vista de los objetivos preestablecidos, almacenados en la memoria. El canal actúa como un “regulador” al examinar “la variedad” de resultados posibles y seleccionar el que es compatible con el propósito del sistema. Por ejemplo, en el supuesto caso de que existieran ocho acciones posibles, se logrará progresar en el proceso de selección si el conjunto de alternativas se divide primeramente en dos conjuntos de cuatro alternativas cada uno. Esto reduce la incertidumbre presente de H_4 , a H_3 , con una ganancia de información de un bit:

$$H_4 = -\log 1/8 = 3 \text{ bits}$$

$$H_3 = -\log 1/4 = 2 \text{ bits}$$

El progreso hacia la certidumbre, requiere que nos movamos de H_3 , donde existen cuatro alternativas, a H_2 , donde solo quedan dos alternativas:

$$H_2 = -\log 1/2 = 1 \text{ bit}$$

Finalmente, prevalecerá la certidumbre total a H_1 , donde se habrá realizado una selección entre las últimas dos alternativas. Para una conceptualización de este proceso, ver figura 2.3

Para moverse de una situación en la cual son posibles 8 alternativas y 8 respuestas, para la selección de un resultado único se requiere que se reduzca la incertidumbre a 3 bits o, expresado de otra manera, que se obtenga una ganancia de información de tres bits.

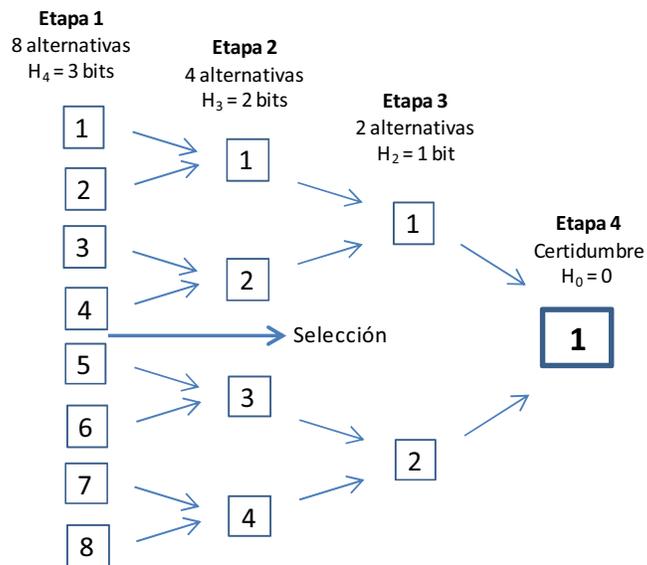


Figura 2.6 Como las decisiones de selección sucesivas reducen la incertidumbre.
Fuente: Teoría General de Sistemas, Van Gigch 2011

Aquí se define H como el grado de incertidumbre, el grado de “variedad” o la cantidad de “entropía” que existe en una situación de elección; también se interpreta H como la cantidad de información, en el sentido de la teoría de información, que se requiere para eliminar la incertidumbre que prevalece, o la cantidad de información procesada por una fuente que pudiera conducirnos a elegir una acción única, de entre un campo de muchas posibles.

Los organismos, los sistemas elaborados por el hombre y los sistemas sociales, pueden estar comprendidos en el conjunto más amplio de sistemas ecológicos de los cuales no son sino partes componentes.

Al hablar de información y control, es necesario introducir dos términos importantes, rezagos y retrasos, los *rezagos* pueden distinguirse de los *retrasos* en tiempo, en que los primeros actúan para filtrar o amortiguar el impacto total de un cambio en el sistema, sin bloquearlo totalmente; los retrasos actúan para posponer el momento en que tiene lugar el efecto de un cambio. En el caso de los rezagos, nos interesamos por el tiempo que toma la amplitud del sistema para reflejar el impacto total de la fuerza con la que se enfrenta, y en el caso de los retrasos, nos interesa el tiempo requerido por el sistema para empezar a reaccionar. En sistemas con retroalimentaciones, los retrasos pueden conducir a efectos desestabilizantes que pueden causar pérdida de control.

Un retraso causa una respuesta cuya función puede ser la misma que la del impulso, pero diferida en tiempo. Forrester se refiere a la retroalimentación de “primer orden” cuando

existen sólo variables de un único nivel a controlarse, como en el caso de una sola decisión. Existe la retroalimentación de “segundo orden” cuando el sistema se caracteriza por variables de segundo nivel, como un retraso en el tiempo entre el momento en que se ordenan los artículos y cuando se reciben en el inventario. La introducción del retraso entre la tasa de orden y el inventario, causa oscilaciones y efectos de segundo orden en el circuito de retroalimentación de gran consecuencia.

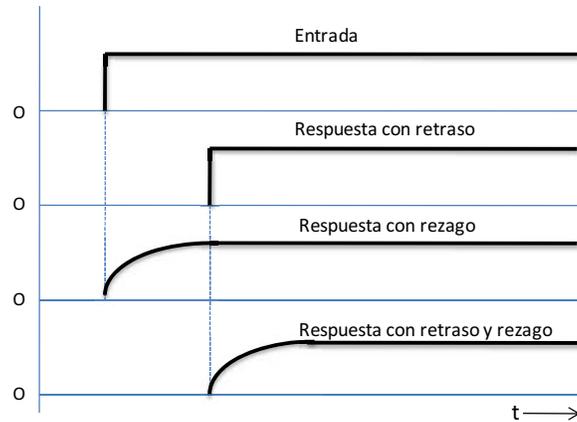


Figura 2.7 Respuestas a una entrada simple: a) entrada, b) respuesta con retraso, c) respuesta con rezago y d) respuesta con retraso y rezago.

Fuente: Teoría General de Sistemas, Van Gigch 2011

En los ecosistemas y en otros sistemas sobre los cuales el hombre intenta ejercer influencia, el concepto de control puede extenderse para abarcar las actividades del diseño de sistemas, por los cuales el sistema es mantenido dentro de los límites de la meseta homeoquinética, donde se logra un estado temporal de equilibrio. Este equilibrio puede explicarse como un estado en el cual las retroalimentaciones son “en balance” negativas, es decir, las retroalimentaciones negativas son más fuertes que las positivas y, por lo tanto, las oscilaciones del sistema pueden mantenerse en un estado amortiguado.

Más allá de los dos umbrales o puntos críticos, el superior y el inferior, las retroalimentaciones positivas son más fuertes que las negativas y, “en el equilibrio”, la retroalimentación neta es positiva, con lo cual, se conduce a la inestabilidad y el colapso eventual.

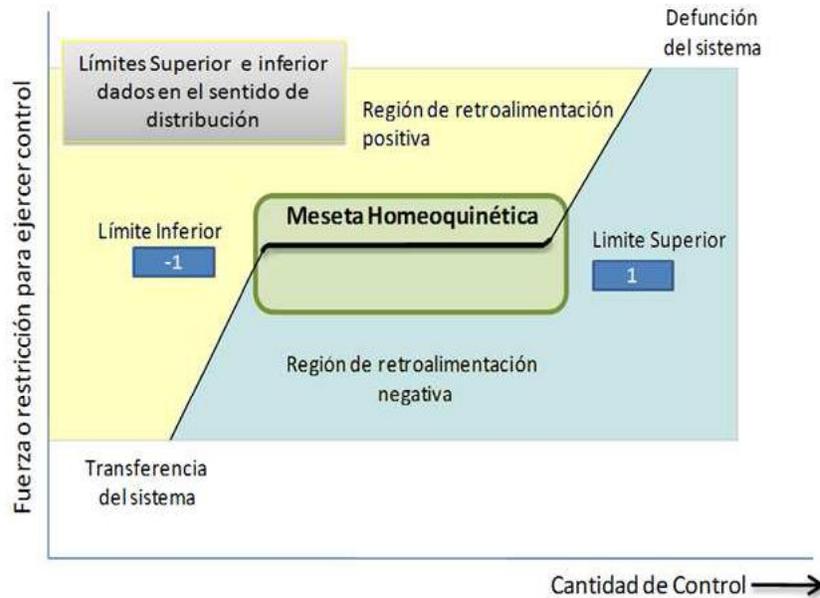


Figura 2.8 El control consiste en mantener al sistema dentro de los límites de la Meseta Homeoquinética.
 Fuente: Adaptado de Teoría General de Sistemas, Van Gigch 2011

En la economía por ejemplo, es claro que es un sistema cibernético, es decir, un sistema dotado de retroalimentaciones. Con las retroalimentaciones apropiadas, puede hacerse que el sistema permanezca en una situación de equilibrio de estado estable, por lo cual se mantienen la inflación y el desempleo bajo un control razonable.

En el caso de nuestra investigación, podemos expresar que para mantener el control razonable del sistema, debemos controlar los límites de conmutación mediante la ley de modos deslizantes, la cual tiene “chattering” (castaño) propio de este control, pero para este sistema de estudio (sensor acústico) no es significativo, como se mostrará en el desarrollo del capítulo 3, por lo que es viable la utilización de un modo deslizante en el campo real para este propósito [48].

La ley de Variedad Necesaria.

La dosis apropiada de control, se expresa en la ley de variedad necesaria de Ashby [4, 5], que se deriva de la teoría matemática de comunicación de Shannon. Esta ley postula la necesidad de hacer comparable y compatible la capacidad de procesar información del individuo o controlador, con la información presentada por el sistema en el cual se busca ejercer control.

La ley de variedad necesaria expresa que, a fin de controlar un sistema, un controlador debe ser capaz de tomar numerosas medidas o contramedidas distintas, por lo menos igual a las demostradas por el sistema que busca controlar.

La complejidad de un sistema puede calcularse en términos del número de situaciones diferentes en las que éste puede encontrarse. Ciertamente, la complejidad depende del número de permutaciones o combinaciones de las variables o atributos que definen el proceso.

Para obtener el control completo de un sistema, el controlador debe contar con tres habilidades:

1. Por lo menos, tener disponibles tantas alternativas diferentes como las que puede mostrar el sistema (o en forma equivalente, la habilidad de trabajar tanto o más rápido con equivalentes codificados).
2. El conjunto de alternativas justamente correcto, dentro del conjunto disponible, para calcular las generadas por el sistema (o en forma equivalente, la habilidad de traducción justamente correcta).
3. La habilidad de procesamiento, para utilizar estas diferentes acciones (o sus equivalentes codificados), a un ritmo por lo menos igual al del sistema a controlarse (o que la información generada por el controlador por unidad de tiempo, iguale a la generada por el sistema).

De las consideraciones anteriores y en términos más claros, podemos expresar que:

- Para que el sistema piezoeléctrico acústico tenga un buen desempeño (incluyendo el subsistema de autorregulación del nivel de señal) debe de cumplir con la ley de Ashby.
- “La variedad de estados del sistema piezoeléctrico acústico deber ser mayor o igual que la variedad de distancias y naturalezas de los medios y geometrías a medir”.

Se puede observar en la grafica 2.6 que una ley de control expresada de la siguiente forma:

$$-F_t = GY_t + HV_t - \hat{Y}_t \quad (12)$$

Cubre satisfactoriamente el requisito de la ley de Ashby, dado que es una función continua en el tiempo que cubre todos los valores posibles que puede tomar la variable a controlar (% de eco).

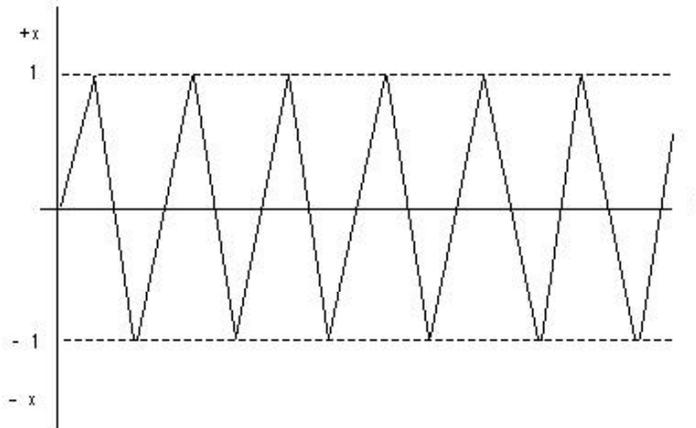


Figura 2.9 Requisitos cubiertos para los valores adquiridos por la variable principal en un tiempo infinitesimal de la ley de Ashby, en función de la ecuación de la Ley de Control.
Fuente: Elaboración propia.

El Ciclo Básico de Control.

El ciclo básico de control es un modelo útil que puede transponerse de la cibernética y la teoría de servomecanismos, al manejo de sistemas duros y suaves, cerrados o abiertos.

En la figura 2.7 se describe el ciclo básico de control, con una actividad que produce una salida. El sensor es el mecanismo que proporciona una indicación de la variable a monitorearse. La unidad del sistema de control llamada colocador de objetivos, establece el estándar (el punto de referencia contra el cual se comparará la salida real). Esta comparación la realiza una unidad llamada discriminador o comparador. La diferencia entre la lectura actual y requerida se transmite al autor de decisiones quien decide sobre la acción posible a realizar por el efector. Se puede aplicar el ciclo básico de control a la descripción de una función de control y en este caso, adaptarlo para analizar y controlar las señales de sensores acústicos.

El concepto de “analyzer de entrada” puede utilizarse para combinar el sensor que se aplica al medio y el cual percibe condiciones externas, y el concepto de “identificador”, que describe el sensor interesado específicamente en la salida. Hemos elegido combinar al identificador y analyzer de entrada en el sensor. A la combinación de sensor, discriminador, colocador de objetivos, autor de decisiones, efector, puede llamársele un adaptador. El adaptador proporciona la capacidad de “adaptar” las actividades bajo control a las condiciones interna y externa “a fin de mantener una salida deseada o esperada”.

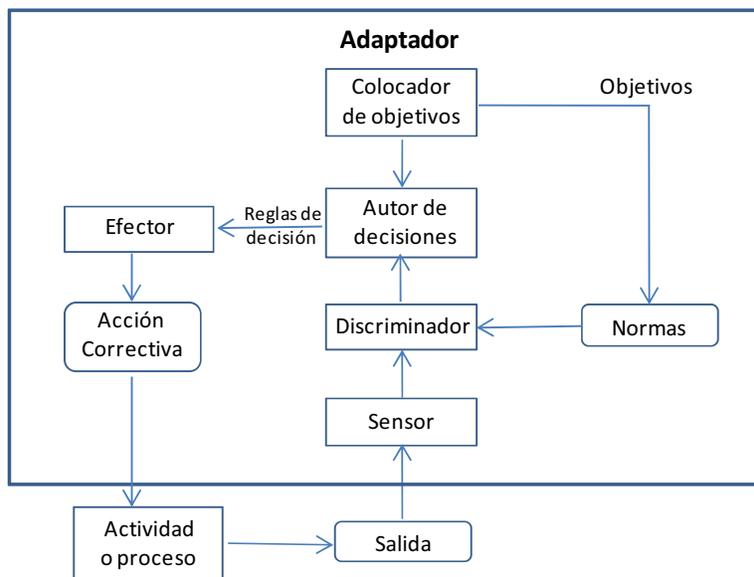


Figura 2.10 El ciclo básico de control.
Fuente: Elaboración Propia.

Puede agregarse otro elemento al ciclo de control, al nombrar un *diseñador* del sistema que supervise tanto al colocador de objetivos como al autor de decisiones. El diseñador organiza el sistema total, al formular tanto los objetivos como las reglas de decisión del sistema.

El control se simplifica cuando sólo un individuo o agente se encarga de la tarea de producir el resultado, inspeccionarlo, comparar dimensiones y atributos contra estándares y modificar el proceso con base en los resultados.

La figura 2.8 describe como se transforma el ciclo básico de control para poder adaptarlo hacia el diseño del modelo de la investigación.

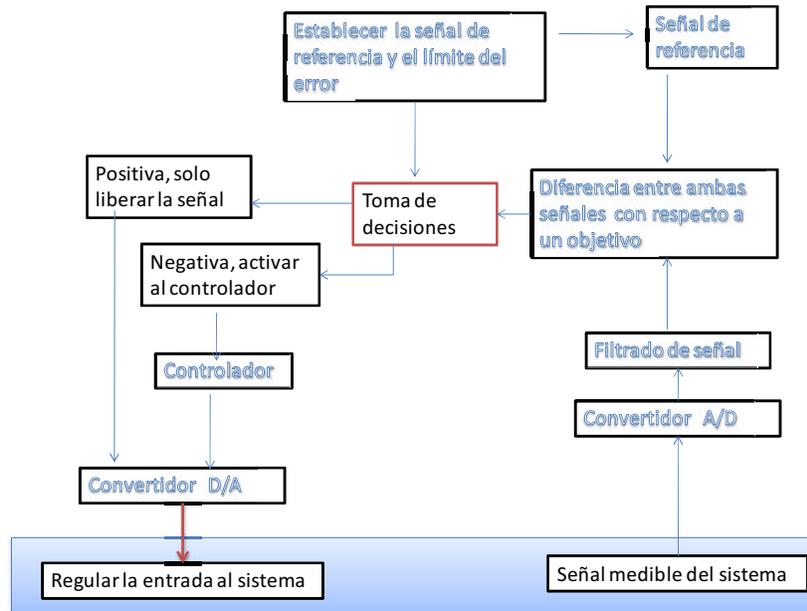


Figura 2.11 El ciclo de control básico adaptado al diseño del modelo sistémico cibernético.
Fuente: Elaboración Propia.

El ciclo básico es útil en la conceptualización y análisis de lo siguiente:

1. La cantidad de responsabilidad y delegación, inherente a una estructura y organización del trabajo.
2. El grado de autonomía y aislamiento creado por varias etapas de tecnología.
3. Los efectos de centralización y descentralización de centros de decisión.

La eficacia de la función de control depende del grado de coordinación entre sus diferentes componentes. Ésta se facilita cuando todos los componentes están asignados y combinados en un agente. Se entorpece cuando cada componente se asigna a un agente distinto.

Stafford Beer [7, 8], expresa que debemos considerar dos conceptos importantes aplicables al control de sistemas duros y suaves, estos son algoritmo y heurística; un algoritmo difiere de una heurística en que el primero implica la búsqueda de un objetivo *conocido* con reglas *específicas*, en tanto que el segundo requiere el uso de reglas *generales* para encontrar un objetivo *desconocido*. La diferencia que existe entre los sistemas mecánico y viviente, puede comprenderse en términos de “modos algorítmicos contra “heurísticos de control”.

Los algoritmos proporcionan las “heliografías” de estructuras mecánicas, pero debemos recurrir a la heurística, para describir las propiedades de los sistemas de orden más elevado como el aprendizaje, evolución y mutaciones. La formulación de mejores estrategias es el resultado de programar el sistema por un algoritmo que adopta un modo heurístico de control. Necesitamos un algoritmo que “especifique una heurística”.

En el contexto de la empresa, el control operacional de actividades de bajo nivel, puede llevarse a cabo a través de algoritmos, en tanto que decisiones de nivel más elevado, requieren una programación heurística. Podemos utilizar algoritmos para programar decisiones bien estructuradas que se repiten y la heurística para manejar decisiones nuevas, mal estructuradas, no recurrentes y no programadas.

Así, podemos adaptar el ciclo de control modificado, para el diseño del modelo del sistema cibernético para el manejo de respuesta en señales de sensores acústicos. Se debe contemplar también, que el concepto de cibernética, en este sentido, se expresa como el control de la autorregulación del modelo para mantenerlo en niveles de operación satisfactorios y acordes a las funciones para las cuales se diseño.

2.2.3 CIBERNÉTICA DE PRIMER ORDEN

La palabra Cibernética, derivada del griego “Kybernetes”, apareció por primera vez con Platón, y fue usada en el siglo 19 por André Marie Ampere para referirse a los modos de Gobierno. Desde 1943 un grupo de científicos encabezado por el matemático Norbert Wiener [49-51] había reconocido la necesidad de elegir un nuevo término para designar un cuerpo de teorías e investigaciones. En 1947 decidieron adoptar la palabra Cybernetics que fue popularizada en su libro (1948) titulado “Cybernetics, or control and communication in the animal and machine” y desde entonces el término no ha dejado de mantener un interés creciente.

De hecho la cibernética se desarrolló como ciencia profundamente “transdisciplinar” que estudia el control y el autocontrol de Wiener [51-53] o la ciencia de la eficacia de la acción (Couffignal).

La cibernética de primer orden tiene que ver o se refiere a los sistemas que no cambian sus objetivos mientras no se les den nuevas instrucciones al respecto.

Se trata de unos sistemas prediseñados, mecanicistas y controlados, poco aptos para representar los sistemas sociales complejos que evolucionan y cambian autónomamente. Un ejemplo típico de esa cibernética lo representa el termostato para regular la temperatura: el sistema de calefacción/refrigeración se pondría en marcha automáticamente cada vez que la temperatura alcance niveles dados por encima o debajo del intervalo deseado de temperatura.

La cibernética introduce la idea de circularidad a través del concepto de retroalimentación o feed-back, rompiendo con el esquema de la ciencia newtoniana clásica en la que los efectos y las causas se encadenan de forma lineal. La idea de circularidad desarrollada por Wiener [51-53] se centra en el feed-back negativo que permite la autorregulación del sistema ante posibles perturbaciones (sistemas “equilibradores”). En 1963, Maruyama estudió el feed-back positivo que, a diferencia del negativo, amplifica la desviación (sistemas “amplificadores”). La utilización de este concepto puede permitir explicar la evolución de los sistemas sociales en los cuales existen los dos tipos de retroalimentación.

2.2.4 CIBERNÉTICA DE SEGUNDO ORDEN

El término cibernética de segundo orden fue acuñado por Heinz Von Foerster en su trabajo titulado “Cybernetics of cybernetics” en 1970.

La cibernética de segundo orden se ocupa del observador como parte de lo observado. Así, según Heinz Von Foerster, el objetivo de la segunda cibernética es explicar el observador así mismo, es decir la cibernética de la cibernética, y se refiere a los sistemas que son capaces de modificar su objetivo o finalidad (o su camino) por si mismos, sin necesidad de ser guiados por alguien o algo desde fuera del sistema.

Así, la segunda cibernética es una ciencia de acción en la que los mecanismos de comunicación y control permiten que el sistema reoriente o replantee continuamente su camino para alcanzar su objetivo primario.

2.2.5 PLANTEAMIENTO DE DESACOPLAMIENTO A PERTURBACIONES POR MODOS DESLIZANTES COMO UNA ALTERNATIVA PARA SOLUCIONAR EL PROBLEMA DEL ECO DEL SONIDO

A lo largo de 40 años se ha desarrollado la técnica de los modos deslizantes [48] como una de las mejores opciones para controlar y automatizar procesos, ya que provee de características singulares e inigualables en comparación con los controladores tradicionales, como lo son los controladores Proporcional-Integral-Derivativo (PID) [36].

El control por modos deslizantes puede hacer posible que una variable a controlar sea prácticamente inalcanzable por perturbaciones externas, lo cual ha hecho a este modo de control, uno de los preferidos para las técnicas modernos de control.

Este tipo de control no se había utilizado mucho en tiempos anteriores debido a que requiere del uso de técnicas de tecnología de conmutación de alta velocidad y amplificadores de potencia de alto rendimiento, sin embargo el avance tecnológico de hoy en día lo ha hecho posible.

Considérese una ecuación diferencial de la forma [36]:

$$y^{(n)} + a_1y^{(n-1)} + \dots + a_{n-1}y + a_ny = bou^{(n)} + b_1u^{(n-1)} + \dots + b_{n-1}u + b_nu \quad (2.1)$$

En el cual n es el orden de la ecuación diferencial (esta se representa por n veces su símbolo correspondiente o por su valor numérico ya sea que esté como hiper índice o como parte de los coeficientes de las variables “y” o “u”. “y” representa las derivadas con respecto al tiempo de la respuesta del modelo matemático representado. u representa las n derivadas con respecto al tiempo de la respuesta del modelo matemático representado. ai y bi son coeficientes, constantes en este caso.

Una ecuación diferencial como la descrita puede representarse en variables de estado por medio de la forma canónica del observador y la representación en variables de estado en lazo abierto será: [36].

$$\dot{X} = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ A & B & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & C & D \end{pmatrix} \begin{bmatrix} X1 \\ X2 \\ X3 \\ X4 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \beta 1 \\ \beta 2 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} u + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ \beta u \end{bmatrix} r \quad (2.2)$$

Donde A, B, C y D son las siguientes constantes de la ecuación anterior (2.1):

$$A=-a_2$$

$$B= -a_1$$

$$C=-a_2$$

$$D=-a_1$$

Considérese un sistema lineal invariante en el tiempo con una entrada y una salida (UEUS) descrito por

$$\begin{aligned} \dot{X}(t) &= AX(t) + bu(t) + pr(t) \\ Y(t) &= CX(t) + du(t) \end{aligned} \quad (2.3)$$

Con

$$X \in R, u, r, Y \in R, A \in R^{nm}, c \in R^{1m}, b, p \in R^{m1}, d \in R$$

X representa el vector de estados, u la entrada, Y la salida y r una señal de perturbación externa.

El problema de desacoplamiento a perturbaciones que se considera aquí puede entonces definirse como sigue:

El reto es encontrar una retro estática del estado de la forma [13, 14, 17, 48]:

$$u(t) = FX + g v(t) \tag{2.4}$$

donde :

$$R^{1m}, g \in R, v(t)$$

es una nueva entrada, de tal manera que Y(t) está desacoplada de

$$r(t) \forall t \geq 0$$

De estas ecuaciones puede observarse que si los valores propios de la matriz

$$\bar{A} = [A - bc / d] \tag{2.5}$$

Un cambio en A, b, c y d puede afectar también la estabilidad del sistema en lazo cerrado como se ve de la matriz \bar{A} .

Una de las técnicas que ha probado ser muy eficiente en compensar incertidumbres en el modelo del proceso y perturbaciones externas es la de modos deslizantes [13, 14, 48].

2.2.6 OSCILACIONES EN FLUIDOS

El movimiento de un fluido puede en circunstancias adecuadas, originar oscilaciones sinusoidales. Consideremos por sencillez, un fluido que se mueve a lo largo de un cilindro de sección S (figura 2.9), y que este se encuentra orientado en una dirección, que se puede tomar coincidiendo con el eje X. Vamos a estudiar la dinámica de una porción de fluido de espesor dx y de volumen S dx, que aunque sea pequeño supondremos que contiene un gran número de moléculas.

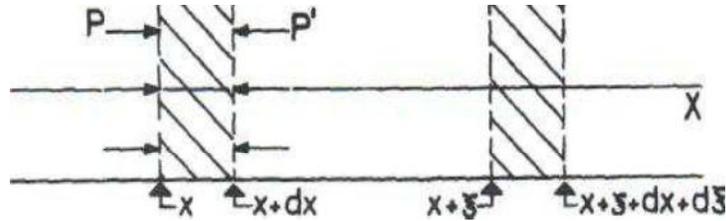


Figura 2.12 Oscilaciones propias de un fluido contenido en un cilindro.
Fuente: Libro Ingeniería Acústica de Manuel Recuero Lopez [39].

La masa de fluido en movimiento es $dM = \rho S dx$, donde ρ es la densidad del fluido. Con el fin de poder establecer la ecuación de la dinámica de esta parte de fluido, lo primero que tendremos que encontrar es la fuerza exterior resultante que actúa sobre la porción de volumen considerado. Sean P y P' los valores de la presión que ejerce el resto del fluido sobre la porción: considerada, a la izquierda y a la derecha del elemento de volumen, luego la fuerza que se ejercerá sobre la superficie izquierda será $F_x = PS$, dirigida hacia la derecha, y el fluido a la derecha produce una fuerza $F'_x = P'S$, dirigida hacia la izquierda, por lo tanto la componente X de la fuerza exterior resultante sobre el elemento de volumen, debida a la presión será:

$$dF_x = F'_x - F_x = -P'S + PS = -(P' - P)S \quad (2.6)$$

pero si tenemos en cuenta que $P - P'$ es la diferencia de presión entre dos puntos separados una distancia dx , será por lo tanto dP , luego:

$$dF_x = dP S \quad (2.7)$$

Antes de iniciarse el desplazamiento de las moléculas al producirse la perturbación, fluido se encuentra en reposo, por ejemplo las partículas de un gas están en promedio en reposo aunque tengan un movimiento al azar, pero no hay movimiento del gas en ninguna dirección, por lo tanto el desplazamiento de las partículas es cero, o sea al no existir ninguna perturbación en medio, la presión será constante en toda su extensión, de valor P_0 , el volumen ocupado será V_0 y el valor de la densidad ρ_0 . Sabemos que toda la fuerza que tiende a comprimir un gas, produce necesariamente un desplazamiento de las partículas de éste. Los valores definidos en el equilibrio una vez que se perturba el gas sufriendo una compresión, o un enrarecimiento, se verán modificados como seguidamente se indica:

La presión P_0 se vuelve, $P = P_0 + p$
 El volumen V_0 se vuelve, $V = V_0 + X$
 La densidad ρ se vuelve $\rho_1 = \rho_0 + \rho$

El cambio relativo de volumen se llama dilatación $\theta_d = \Delta V/V_0$

El cambio relativo de densidad se llama compresión $\theta_c = \Delta \rho/\rho_0$ luego ($\theta_d = -\theta_c$)

La presión incremental producida en el gas es directamente proporcional a la variación incremental de volumen. Cuando la variación de volumen es lenta, la dilatación es isotérmica, esto es, se produce a temperatura constante, hay tiempo para que el calor generado en el gas durante la dilatación pueda pasar a otras partes del mismo, luego:

$$\Delta P = -K \Delta V \quad (2.8)$$

Expresando las variaciones Δ en términos de derivadas para P y V, es decir, dP y dV, entonces finalmente podemos llegar a la ecuación de fluido del sonido en términos de una ecuación diferencial de segundo orden:

$$\frac{d^2 \xi}{dt^2} + \frac{BS}{\rho_0 V_0 dx} \xi = 0 \quad (2.9)$$

En donde ξ es el desplazamiento de la partículas, B es el modulo de compresión del fluido, ρ la densidad, V el volumen, dx el espesor de la sección tomada en el eje X, S el área de la superficie transversal, y t el tiempo.

Entender la oscilación de fluidos nos sirve para entender que la transmisión de ondas acústicas se comporta como un movimiento armónico simple amortiguado en el que la onda acústica se comporta como un resorte que se comprime y se descomprime constantemente pero con amplitudes de onda que se van desvaneciendo cada vez mas hasta que la oscilación desaparece.

Este mismo comportamiento amortiguado se puede observar en un osciloscopio si alimentamos con una batería un circuito eléctrico RLC (resistivo, capacitivo, inductivo), y tanto el resorte como el sistema RLC obedecen al mismo modelo matemático, por lo que se puede utilizar un circuito eléctrico, como el RLC para obtener el modelo matemático del piezoeléctrico pues su modelo matemático sirve para diseñar el control a aplicar, y este mismo control se puede expresar en el ámbito que se requiera, ya sea a nivel matemático, a nivel electrónico, mecánico, etc.

A continuación se presenta, en un esquema a bloques, la lógica a seguir para la obtención del diseño del modelo sistémico cibernético y de las simulaciones de la respuesta en señal requeridas, para la evaluación del comportamiento dinámico del modelo y del modelo sistémico cibernético de primer nivel.

El esquema a bloques de la figura (2.10) presenta un esquema general de decisiones, la ruta específica que se emplea dependerá del desarrollo de este estudio.

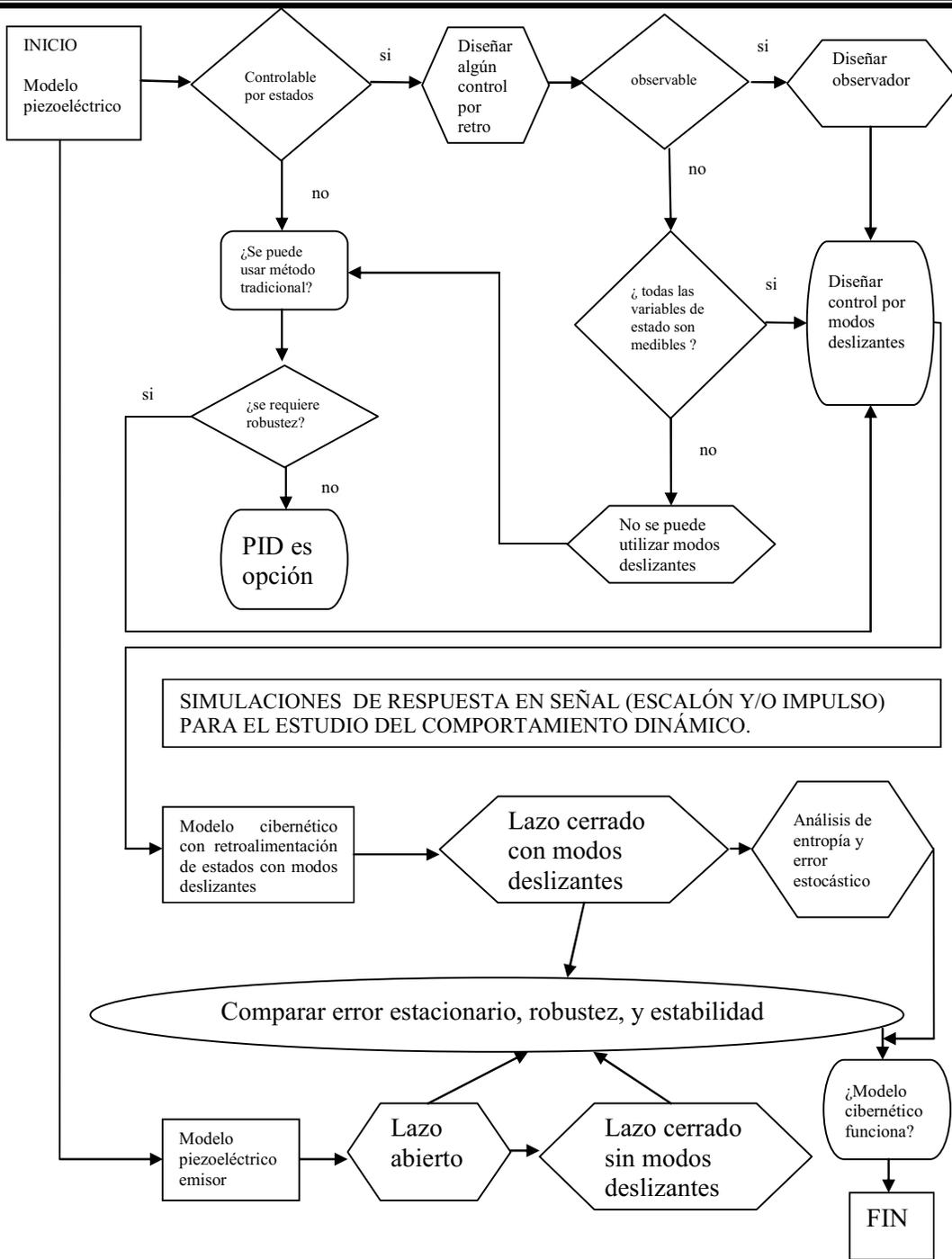


Figura 2.13 Esquema a bloques de decisiones para el diseño y simulaciones del Modelo cibernético de primer nivel.
Fuente. Elaboración propia.

CAPÍTULO

3

DISEÑO DEL MODELO Y OBTENCIÓN DE RESULTADOS

Este capítulo presenta el modelo que se diseñó, para el desarrollo de la investigación. También presentamos los análisis realizados para la validación de dicho modelo y acorde a las necesidades de la investigación.

3.1 CONSIDERACIONES PRELIMINARES PARA EL DISEÑO DEL MODELO

Esta etapa contempla la descripción detallada que se hizo de la problemática existente, por lo que se debe revisar algunos factores y variables que inciden en la investigación a desarrollar, de manera que se cubra satisfactoriamente las características requeridas por el diseño, sin embargo, aunado a lo anterior, existen razones de carácter académico que hacen necesario delimitar adecuadamente el problema para cumplir satisfactoriamente con dichas limitaciones.

En esta etapa de consideraciones preliminares, se debe describir la relación de variables involucradas en el modelo, la operacionalización de las mismas y se debe también realizar la formulación de la hipótesis.

3.1.1 RELACIÓN DE VARIABLES

A las propiedades que presentan los objetos y/o fenómenos, se les designa en la bibliografía metodológica, con el nombre de variables. De manera más precisa, una variable es una propiedad, una característica o un atributo que puede presentarse en ciertos fenómenos en grados o modalidades diferentes [8].

En muchos problemas de investigación se presenta en mayor o menor grado la influencia de una o más variables independientes sobre otra variable dependiente. El investigador puede emplear y manipular la o las variables independientes de acuerdo a los objetivos de su investigación.

En el caso de los análisis encaminados al diseño del sistema cibernético propuesto, como ya se ha mencionado se enfrentan a un problema muy complejo y multivariable, obviamente la consideración de más variables en el método empleado, incrementa la complejidad de éste, así como también aumenta la complejidad de los análisis requeridos.

La variable crítica para este modelo cibernético es el eco, o sea, el porcentaje de sonido reflejado emitido por el piezoeléctrico. Así mismo, se integran como variables aquellas que sean detectadas por medio de un estudio de variables de estado [36].

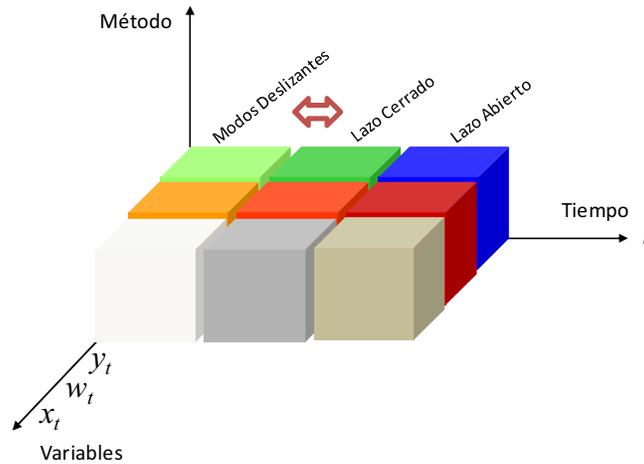


Figura 3.1 Cubo de dimensiones y variables para el Diseño del Sistema Cibernético.
Fuente: Elaboración propia.

Lo anterior, pone de manifiesto la necesidad de considerar que el modelo debe operar con los datos disponibles y que éste se debe basar más en el tipo de análisis, la metodología propuesta y la creatividad de la investigación.

Dadas las observaciones anteriores, se puede expresar que en esta investigación, una vez fijada la problemática existense consideran entonces tres variables para desarrollar los análisis requeridos para el diseño del modelo:

1. y_t
2. w_t
3. x_t

La figura 3.2 muestra la relación de variables del modelo.

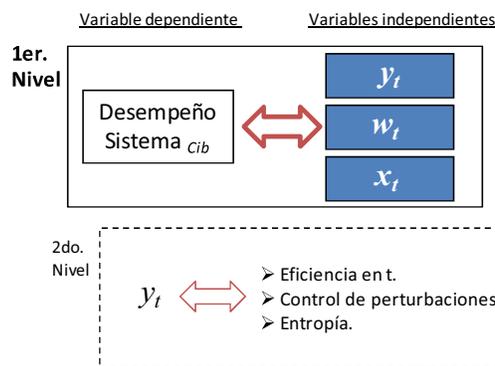


Figura 3.2 Relación de variables para el diseño del modelo del Sistema Cibernético.
Fuente: Elaboración propia.

3.1.2 FORMULACIÓN DE LA HIPÓTESIS

Una hipótesis es una suposición o solución anticipada al problema objeto de la investigación y, por tanto, la tarea del investigador debe estar orientada a probar tal suposición o hipótesis. Ahora, es importante tener claro que al aceptar una hipótesis como cierta no se puede concluir respecto de la veracidad de los resultados obtenidos, sino que sólo se aporta evidencia en su favor [8].

En el mejor de los casos, una suposición de esta naturaleza puede obtenerse deductivamente del cuerpo de una teoría o bien, se apoya en conocimientos ya adquiridos en un área de investigación.

Pero cualquiera que sea el origen de las hipótesis son propuestas de solución a determinados problemas o preguntas de investigación. Sin embargo, debemos tener en cuenta que muchas hipótesis toman la forma de relaciones entre dos o más variables.

Tomando en cuenta las consideraciones anteriores, los objetivos, el Marco Teórico establecido y el enfoque de sistemas bajo el cual se desarrollan los análisis y se diseña el modelo, la hipótesis que se propone es:

Hipótesis:

El sistema cibernético diseñado con la técnica de control propuesto y basado en los modos deslizantes brindará una autorregulación de rango satisfactoria para los sensores piezo – eléctricos acústicos.

$$\text{Sistema}_{\text{cib}} = f(\text{Control propuesto } f(\text{modos deslizantes})) \quad (3.1)$$

Donde:

$$\text{Modos deslizantes} = f(X_1, X_2, \dots, X_n) \quad (3.2)$$

3.1.3 OPERACIONALIZACIÓN DE VARIABLES

Debido principalmente a la diversidad de significados que pueden tener los términos usados por las ciencias, muchos de los conceptos empleados en la formulación de problemas de investigación deben ser definidos operacionalmente. La definición operacional de un concepto o variable, consiste en definir, ya sea las operaciones que permiten medir ese concepto o bien, sus indicadores observables, por medio de los cuales se manifiesta ese concepto. La Tabla 3.1 muestra la operacionalización de las variables involucradas en el modelo.

Tabla 3.1 Operacionalización de variables
Fuente: Elaboración propia

VARIABLE	DEFINICIÓN CONCEPTUAL	DEFINICIÓN OPERACIONAL	DIMENSIÓN	INDICADOR
1 SISTEMA CIBERNÉTICO	Modelo que permitirá realizar autorregulaciones futuras basadas en modos deslizantes. $\dot{Y}_t = GY_t + HV_t$	Grado de eficiencia del control del modelo (fórmula obtenida) y la ocurrencia de eventos reales, para los parámetros considerados. $V_t^* = H^+(E_t^* - GY_t)$ Con H^+ como la matriz pseudoinversa de H , E_t como el proceso del error estocástico del sistema descrito en (2), y G , una matriz de la forma $G \in \mathbb{R}_{[0,1]^{n \times n}}$.	Parámetros G, H son matrices de la forma $G \in \mathbb{R}_{[0,1]^{n \times n}}$, $H = f(A, C, B, D)$ y $V_t \in N\{\mu, \sigma^2 < \infty\}$ $E_t = \dot{Y}_t - F_t$, $M_t = -F_t$ $M_t M_t^T < 0$	Eficiencia en t . Control de perturbaciones. Entropía.
2 MAGNITUD	La medida que se registra en la señal de sonido \dot{Y}_t , que representa la energía liberada por el piezo - eléctrico.	Grado de medición de la energía liberada por el piezo - eléctrico a través de la amplitud de las ondas acústicas.		Decibeles. Joule.
3 TIEMPO	Magnitud física que mide la duración o separación de los sistemas sujetos a observación. El periodo que transcurre entre el estado del sistema cuando éste aparentaba un estado X y el instante en el que X registra una variación perceptible para un observador.	Espacio temporal que se considera para realizar la medición. $H_t = -20[e_t \ln(e_t) - (1/20)H_{t-1}]$, donde $e_t := y_t - \hat{y}_t$	Tiempo	Intervalo
4 ECO	El eco es un fenómeno acústico producido cuando una onda se refleja y regresa hacia su emisor. Puede referirse tanto a ondas sonoras como a electromagnéticas.	Relación entre la señal reflejada contra el valor emitido. Para el sistema cibernético representa el valor deseado $\hat{Y}_t = \dot{Y}_t + F_t$.	Porcentaje de sonido reflejado P $V_t \in N\{\mu, \sigma^2 < \infty\}$	Coefficiente de correlación. $R = E\{Y_t Z_t^T\}$

VARIABLE	INDICADOR	DEFINICIÓN	MEDICIÓN
1 SISTEMA CIBERNÉTICO	Eficiencia en t . Control de perturbaciones. Entropía.	Grado de relación entre el modelo y los eventos reales. Grado de certeza en la ocurrencia de eventos futuros. Grado de desorden del sistema a controlar.	Coefficiente de correlación R % de acercamiento satisfactorio. % de desorden del sistema.
2 MAGNITUD	Decibeles. Joule.	Cantidad de sonido emitida. Cantidad de energía liberada en ondas acústicas.	Decibeles Joule.
3 TIEMPO	Intervalo	Desarrollo del subsistema de 0 a 100 iteraciones.	Iteraciones (100)
4 ECO	Coefficiente de correlación.	Medida de la relación lineal entre dos variables.	Coefficiente de correlación R

3.1.4 SELECCIÓN DE LA MUESTRA Y RECOLECCIÓN DE LOS DATOS

El modelo sistémico cibernético propuesto en esta investigación se simula en modo continuo así como el modelo de control de modos deslizantes se hace en modo continuo, es decir, en el rango de medición seleccionado se tiene todo el rango de medición, claro está, con el rango de error que todo sistema tiene, por lo que no es un sistema en modo discreto en el que se realiza un muestreo. Con esto se quiere decir que no aplica este punto para este caso de estudio.

La recolección de los datos se realiza de una manera electrónica, es decir, mediante el programa matlab se obtienen gráficas, las cuales también se pueden convertir en un listado de los datos que conforman dicha gráfica.

Se determinó la utilización del programa matlab después de haberlo comparado con otros programas como el comsol y el labview, debido a que el matlab se trabaja contruyendo los modelos dando las ecuaciones diferenciales o las funciones de transferencia, dado que el modelo sistémico se diseñó a partir de la función de transferencia (ver fig. 3.6). El programa comsol se trabaja con modelos prediseñados para aplicaciones específicas que para nuestro caso ninguno de estos modelos prediseñados encajaban con nuestra aplicación. El caso del labview es más utilizado para un ambiente de ingeniería de pruebas que se desarrollan en una computadora.

3.2 DESARROLLO

El diseño de la investigación es el plan para responder a las preguntas de investigación, por lo que el plan es utilizar simulaciones matemáticas utilizando el programa matlab R.2012a, el plan es graficar la respuesta en señal de las variables en diferentes circunstancias para poder hacer un análisis comparativo, es decir: graficar mediante simulaciones la respuesta en señal de las variables ante señales típicas como lo es una señal escalón, esto en un lazo abierto, un cerrado y un cerrado con el modelo con el control de modos deslizantes, para mediante un análisis comparativo poder llegar a las conclusiones que puedan responder a nuestras preguntas de investigación.

El tipo de diseño de investigación es descriptivo experimental [25], que aunque a nivel de simulación, se realizan experimentos con las variables independientes para analizar los resultados. Además de que es diseño de investigación descriptiva pura, ya que cumple con los requisitos siguientes: Se realizan los experimentos con la presencia y ausencia de las variables independientes, se observa el efecto en las variables dependientes al hacer las manipulaciones en las variables independientes y se preserva el control en las condiciones en las que se realizan los experimentos dado que se hace a nivel de simulación.

La formulación de la hipótesis surge en base del análisis de la teoría desarrollada en este estudio, pues se puede decir de una forma lógica o empírica que el sonido en ambientes no controlados como el interior de un pozo, o el interior de un acuífero están muy susceptibles de perturbaciones, y la técnica de modos deslizantes ofrece características de robustez y desacoplamiento de perturbaciones, así como lo demuestran numerosos artículos como por ejemplo:

Tabla 3.2 Ejemplos de artículos que demuestran la robustez y desacoplamiento del modo deslizante.

Carreño, R., M. Patiño, y J. Patiño, (2013), "Sliding modes control applied to a mini aircraft pitch position model" en <i>Computación y sistemas</i> , México.
Carreño, R., M. Patiño, J J Medel J, y J. Patiño, (2014), "Acoustic sensor controlled by sliding modes with parameters estimation, based on a cybernetic model" en <i>Jokull</i> , Iceland.

La problemática de los sensores para aplicaciones como medición de profundidades o distancias de rangos no conocidos es una realidad actual dado que no existe tal sensor que pueda utilizarse para tareas con esas características y necesidades, por otro lado, si esta nueva modalidad de sensores llega a reflejarse en una nueva generación de sensores estaría impactando en la sociedad, dado que la tecnología ha venido a beneficiar a toda la sociedad e impactarla inclusive en sus hábitos y costumbres. Para esta hipótesis se proponen variables precisas, claras, medibles, observables y con una relación entre ellas de una manera lógica-científica. Esta hipótesis es del tipo descriptiva y correlacional, ya que se propone demostrarla de una medible y de correlación.

Prueba (**Teorema 1**) [6, 14-16, 19, 21-24, 26, 28-35, 37-47, 55-55].

Considérese que de acuerdo con [33] que la representación de espacio de estados del modelo del piezoeléctrico, con la forma derivativa descrita en (3.3):

$$\dot{Y}_t = C\dot{X}_t + D\dot{w}_t \quad (3.3)$$

Al sustituir en (3.3) a \dot{X}_t del modelo de espacio de estados del piezoeléctrico se tiene (3.4)

$$\dot{Y}_t = CAX_t + CBw_t + D\dot{w}_t \quad (3.4)$$

El estado interno X_t de acuerdo con el modelo de espacio de estado [33] queda descrito en (3.5) con respecto a la señal observable.

$$X_t = C^+Y_t - C^+Dw_t \quad (3.5)$$

Al considerar a (3.5) en (3.4), resulta (3.6)

$$\dot{Y}_t = CAC^+Y_t - CAC^+Dw_t + CBw_t + D\dot{w}_t \quad (3.6)$$

De manera simbólica se tiene que (3.6) es descrito en (3.7), considerando que

$$G := CAC^+, H := [(-CAC^+ + CB) \quad D], y V_t := [w_t \quad \dot{w}_t]^T. \quad (3.7)$$

$$\dot{Y}_t = GY_t + HV_t$$

Que corresponde con (2).

Prueba (**Teorema 2**) [6, 14-16, 19, 21-24, 26, 28-35, 37-43, 45-47, 55-55]. Considérese que la representación recursiva del espacio de estados del piezoeléctrico se representa como:

$$Y_t = G \dot{Y}_t + H V_t \quad (3.8)$$

Entonces (3.8) cumple con (3.9)

$$M_t \dot{M}_t^T < 0 \quad (3.9)$$

Donde la región para la trayectoria suave de M_t se describe en (3.10)

$$\dot{M}_t = -F_t \quad (10)$$

Con F_t , una función continua por intervalos con medida t , cumple con el proceso del error estocástico (3.11)

$$\dot{\hat{Y}}_t = \dot{Y}_t + F_t \quad (3.11)$$

Al aplicar la descripción recursiva (3.8) en (3.11) se tiene (3.12)

$$-F_t = G Y_t + H V_t - \hat{Y}_t \quad (3.12)$$

La diferencia entre $\dot{\hat{Y}}_t - F_t$ de (3.11) de acuerdo con (3.12) se tiene (3.13)

$$(F(t) - \hat{Y}(t)) = -G Y_t - H V_t \quad (3.13)$$

El proceso del error estocástico del sistema (3.8) conforme con (3.11), se describe en (3.14)

$$E_t = \dot{\hat{Y}}_t - F_t \quad (3.14)$$

Sustituyendo (3.14) en (3.13) y despejando a la entrada V_t , se obtiene (3.15)

$$V_t^* = H^+(E_t^* - G Y_t) \quad (3.15)$$

Que es la la ley de control.

Prueba (**Teorema 3**) [6, 14-16, 19, 21-24, 26, 28-35, 37-43, 45-47, 55].

Sea $Z_t^T = f(Y_t)$, tal que al aplicar el segundo momento de probabilidad de (3.8) con respecto a Z_t^T , se tiene (3.16)

$$E\{\dot{Y}_t Z_t^T\} = G E\{Y_t Z_t^T\} + H E\{V_t Z_t^T\} \quad (3.16)$$

Al considerar las propiedades del operador de esperanza matemática, el estimador de acuerdo con (3.16) tiene la forma (3.17)

$$\widehat{G}_t = (E\{\dot{Y}_t Z_t^T\} - HE\{V_t Z_t^T\}) (E\{Y_t Z_t^T\})^+ \quad (3.17)$$

Ahora definiendo con respecto a (3.17) a P_t, Q_t en (3.18)

$$P_t := E\{\dot{Y}_t Z_t^T\} - HE\{V_t Z_t^T\} \text{ y } Q_t := E\{Y_t Z_t^T\}^+ \quad (3.18)$$

Y de (3.18) en (3.17), el estimador \widehat{G}_t tiene la forma (3.19)

$$\widehat{G}_t = P_t Q_t \quad (3.19)$$

Que es la que se describe en (3.3).

Prueba (**Teorema 4**) [6, 14-16, 19, 21-24, 26, 28-35, 37-43, 45-47, 55]. Considerando que (3.4) tiene sus componentes de acuerdo con (3.18), bajo condiciones estacionarias P_t es descrito de manera recursiva en (3.20).

$$P_t = \frac{1}{t^2} \sum_{i=1}^t (\dot{Y}_i Z_i^T) + \frac{H}{t^2} \sum_{i=1}^t (V_i Z_i^T) \quad (3.20)$$

Que con un retardo P_{t-1} se describe en (3.21)

$$P_{t-1} = \frac{1}{(t-1)^2} \sum_{i=1}^{t-1} (\dot{Y}_i Z_i^T) + \frac{H}{(t-1)^2} \sum_{i=1}^{t-1} (V_i Z_i^T) \quad (3.21)$$

Y al ser sustituida (3.21) en (3.20) se tiene (3.22)

$$P_t = \left(\frac{1}{t^2}\right) [\dot{Y}_t Z_t^T + H V_t Z_t^T + (t-1)^2 P_{t-1}] \quad (3.22)$$

Al considerar que (3.19) es retardada se tiene (3.23)

$$P_{t-1} = \widehat{G}_{t-1} Q_{t-1}^+ \quad (3.23)$$

Que al ser sustituido (3.23) en (3.22), se tiene (3.24)

$$P_t = \left(\frac{1}{t^2}\right) [\dot{Y}_t Z_t^T + H V_t Z_t^T + (t-1)^2 \widehat{G}_{t-1} Q_{t-1}^+] \quad (3.24)$$

Y (3.24) sustituido en (3.19), se tiene (3.25)

$$\widehat{G}_t = \left(\frac{1}{t^2}\right)[\dot{Y}_t Z_t^T + HV_t Z_t^T + (t-1)^2 \widehat{G}_{t-1} Q_{t-1}^+] Q_t \quad (3.25)$$

De (3.25) se reduce en (3.26)

$$\widehat{G}_t = \left(\frac{\dot{Y}_t Z_t^T Q_t}{t^2}\right) + \left(\frac{HV_t Z_t^T Q_t}{t^2}\right) + \left(\frac{(t-1)^2 \widehat{G}_{t-1} Q_{t-1}^+ Q_t}{t^2}\right) \quad (3.26)$$

De (3.26) se pierde (3.27)

$$\widehat{G}_t = \alpha_t \widehat{G}_{t-1} + \beta_t \quad (3.27)$$

Con α_t y β_t descritos en (3.28^a y 3.28^b)

$$\alpha_t = \frac{(t-1)^2 \widehat{G}_{t-1} Q_{t-1}^+ Q_t}{t^2} \quad (3.28a)$$

$$\beta_t = \left(\frac{\dot{Y}_t Z_t^T Q_t}{t^2}\right) + \left(\frac{HV_t Z_t^T Q_t}{t^2}\right). \quad (3.28b)$$

3.2.1 ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN

Dado que este no es un caso de estudio con datos de tipo discreto (con muestreo) sino continuo, entonces el empleo de técnicas estadísticas se hace más simple, por lo que solo utilizaremos técnicas de correlación.

En los procesos físicos se requiere el uso de sensores electrónicos para medir y automatizar tareas de robótica, procesos industriales, inspección automática industrial para dispositivos a prueba de error en donde el hombre no tiene acceso o el ojo humano no tiene la capacidad de hacerlo, como el sensado de profundidad marina como el sonar.

Para satisfacer las exigencias del avance tecnológico, se han creado múltiples tipos de sensores fotoeléctricos, magnéticos, inductivos, nucleares, acústicos, etc. Pero el sensor acústico ofrece un gran potencial por explotar aún, en aplicaciones el sensado de profundidad de pozos, cuencas de agua, lagos, cavernas, entre otros. En donde aun no existen soluciones de acordes para estas aplicaciones.

En general, los retos de todos los sensores acústicos son los siguientes: El tipo de señal (óptica, acústica, magnética, inductiva, etc.) debe ser acorde con el medio donde se desplaza y distancia a sensar. Todos los tipos de sensores son diseñados para un rango definido de distancia.

Una señal acústica tiene la capacidad de reflejarse en lugares donde otros tipos de señal no podrían, ya sea por inconvenientes del fluido por donde se desplazarían o porque requerirían una gran cantidad de señal reflejada difícil de generarla. Por ejemplo a distancias de por lo menos 500 m o en medios acuosos.

Este trabajo se propone un modelo sistémico, para el control de respuesta de un sensor acústico, que pueda resolver las aplicaciones de hoy en día no existentes que tienen las siguientes limitantes: Distancias grandes de sensado que requieren una señal de alta capacidad de intensidad de reflexión a esa distancia, y lo más importante que ofrezca una capacidad de alta auto regulación a la distancia a sensar ya que no se conoce el rango de distancia a sensar, solo se conoce un rango estimado, de ahí la necesidad de auto regulación del rango de la distancia a sensar.

Para superar las limitantes actuales, se modeló un control que regule en forma automática el nivel de señal acústico emitido por un piezo eléctrico-acústico, de tal manera que se asegure que el eco reflejado de la señal será de por lo menos de una intensidad requerida para que el sensor acústico pueda leer y analizar la señal recibida adecuadamente. La descripción del modelo, el sistema de control y la estimación de parámetros, fueron la base con la para la descripción del comportamiento del sistema piezo eléctrico-acústico, sin que ello se presuponga conocida la distancia y que a través de los parámetros del sistema de medición y control.

La problemática básica planteada para los sensores acústicos es que los sensores industriales trabajan bajo un rango conocido, de hecho en su especificación el parámetro más importante es el rango, por lo que es una limitante, ya que para cada aplicación se tiene que usar un sensor específico, esto no representa un problema para las aplicaciones denominadas pokeyokes (dispositivos a prueba de error) o de inspección que se utilizan, por ejemplo en la industria automotriz, es decir, son sensores que solo sirven para detectar presencia de tal manera que no falte un clip, o una pieza dentro de un ensamble, pieza que por su criticidad no se le puede dejar a ojo humano para su detección.

El sensor acústico tiene grandes ventajas sobre los sensores ópticos, magnéticos o inductivos: la primera es que tiene superiores ventajas sobre los sensores de nivel en cuanto a que tiene más capacidad de reflexión de onda que los anteriores, pudiendo así ser único en aplicaciones como el sonar del submarino, detección de cardúmenes en el mar, detectores de nivel en materiales poco reflejantes. Sin embargo, esta gran ventaja que tiene el sensor acústico sobre los otros tipos de sensores, es en realidad, potencialmente mucho mayor a la que actualmente se le está explotando.

Un particular problema al que se enfrentan todos los sensores, es precisamente lo que se mencionó de que los sensores de tipo industrial para fines de inspección son de rango definido, por lo que los sensores requeridos en un equipo electrónico que requiera ser de rango ajustable, tendrá que tener un microprocesador electrónico para que este pueda contener un algoritmo de control que haga el respectivo ajuste, por lo que el futuro del

desarrollo de los sensores apunta hacia el desarrollo de algoritmos más avanzados y diversos para cubrir todas las necesidades de las aplicaciones de hoy en día que están por ser satisfechas. Esto solo puede ser posible con un estudio serio y científico basado en modelos sistémicos, que puedan contemplar de una manera amplia.

En este estudio, se ha detectado un gran potencial en el uso de sensores acústicos en aplicaciones que aún no han sido satisfechas por ningún sensor, por ejemplo, la medición de la profundidad de pozos, la cual actualmente no se mide con un sensor electrónico, pues no existe sensor que para tal distancia pueda tener tal capacidad para tener un onda reflejada suficiente, los pozos normalmente tienen profundidades entre 10m a 500m, excepto de él sensor acústico, pero actualmente no hay sensores acústicos de este rango, sino de menor (como los industriales) o de mayor como el de los barcos, que son de más de 500m, pues la limitante del sensor acústico no es la distancia sino el costo de construcción, es por eso solo la inventiva y la investigación científica puede superar este obstáculo mediante los algoritmos matemáticos basados en modelajes sistémicos, es por eso que es crucial este estudio para superar este obstáculo para la satisfacción de las aplicaciones mencionadas.

La gran bondad del modelaje sistémico es que, matemáticamente hablando, estos modelos son universales y utilizables en cualquier aplicación que se ajuste al modelo.

3.2.2 DISEÑO DEL MODELO CONCEPTUAL DE CONTROL [1]

Se propone resolver al problema del sensado a distancias entre 10m y 500m, modelando sistemáticamente, algoritmos de control que ajusten de una manera automática el rango de la distancia, para que se puedan sensar niveles de profundidad de pozos, cuencas de agua, ríos, lagunas, cenotes, etc. Para ello se propone el siguiente modelo conceptual, originado en el modelo de las 4 causas de Aristóteles metafísicas.

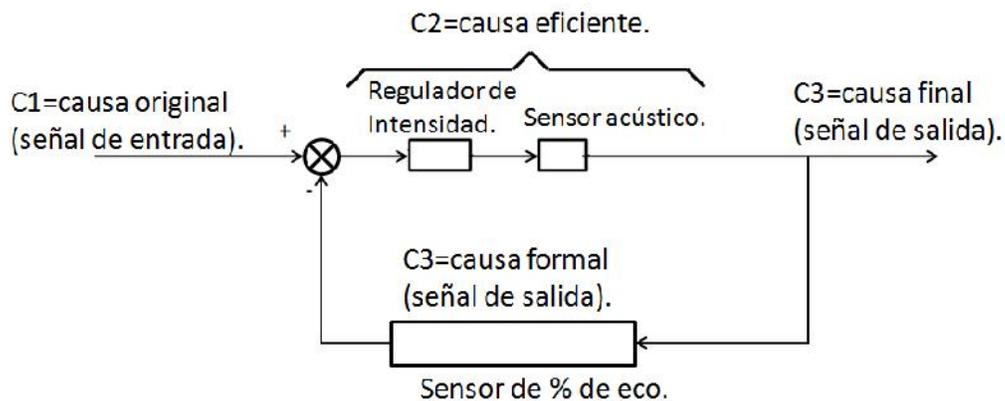


Fig. 3.3 Concepto del modelo para el control del % de eco al 20%.
Fuente: Elaboración propia.

En este modelo el parámetro crítico a controlar es la cantidad de nivel sonoro reflejado, ya que obviamente se requiere de una mínima cantidad de sonido reflejado para que la señal pueda ser leída y procesada adecuadamente, para ello se propone un nivel de sonido reflejado (eco) del 20% como nuestro punto de consigna, con esto estaremos resolviendo el problema de que los sensores acústicos existentes de hoy en día no son auto regulables.

Para nuestro caso de estudio no importa con qué tipo de sensor se mida la señal, en este caso el eco, tan solo tiene que ser una relación de fuerzas, intensidades, presión, energía, decibeles, etc.

3.2.3 DISEÑO DEL MODELO DEL CONTROL AUTOMÁTICO A NIVEL INDUSTRIAL [2, 36]

Tomando en cuenta el modelo para un control automático industrial [36], el modelo nos queda como sigue:

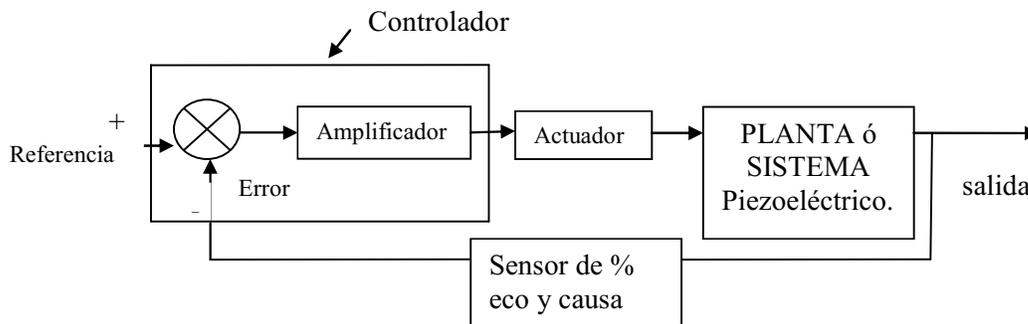


Fig. 3.4 Modelo de control automático propuesto.
Fuente: Elaboración propia.

3.2.4 DISEÑO DEL MODELO ISOMÓRFICO DE UN SISTEMA (PLANTA) A CONTROLAR

Para la obtención del modelo matemático del sistema o proceso a controlar (intensidad de sonido emitido por un sensor acústico piezoeléctrico), se utilizó un sensor ultrasónico de la marca Wenglor modelo UMS603U035 [51]. Para ello se requieren dos canales de osciloscopio para observar la respuesta en frecuencia tanto para la entrada y la salida del emisor de la onda acústica (UMS603U035), utilizando el método de respuesta en frecuencia [36] se obtienen los parámetros para la obtención de la función de transferencia de segundo orden que rige el comportamiento dinámico de la variable a controlar (intensidad de emisión acústica), ya que si la onda reflejada no es suficiente para la medición, entonces el control auto regulará la intensidad de onda acústica emitida para que la onda reflejada (eco) sea suficiente para una medición adecuada.

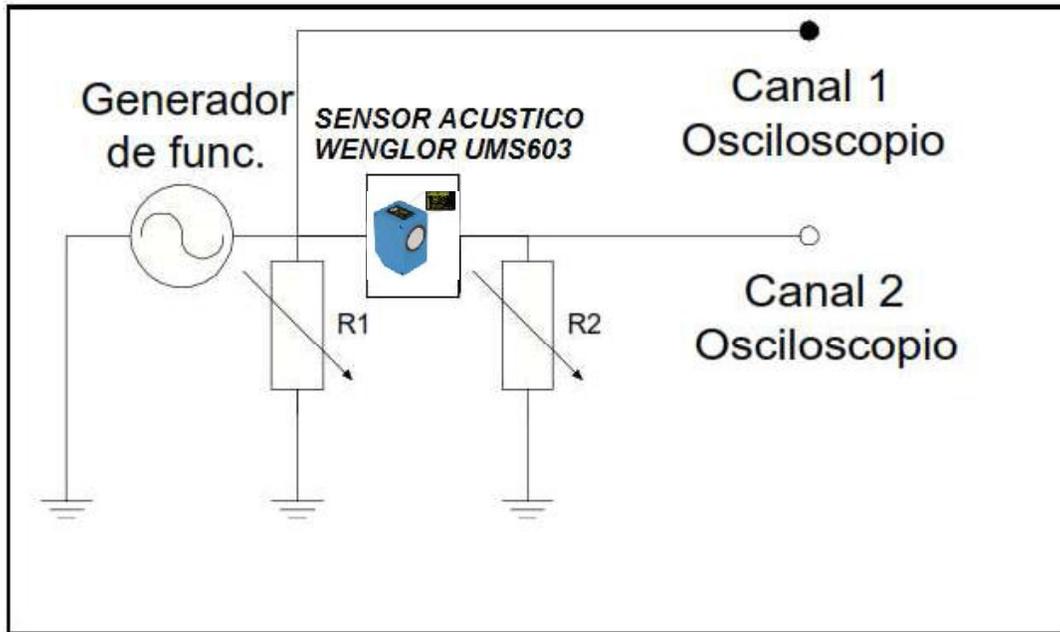


Fig. 3.5 Esquema a bloques del ensamble utilizado para la obtención de las mediciones para obtener el modelo matemático a controlar.

La hoja técnica y detalles técnicos del sensor Wenglor utilizado UMS603U035 se pueden encontrar en el catálogo de productos que puede ser consultado en la página web de dicha compañía [51].



Fig. 3.6 Sensor Wenglor UMS603U035 [51].

El circuito montado basado 3.5 nos da la respuesta en frecuencia, además para efectos del modelaje del proceso a controlar, se tiene que ver al emisor piezoeléctrico como su

circuito equivalente RLC (con un factor de calidad $Q=11400\pm 200$), al aplicar una tensión eléctrica al sensor, el sensor actúa como lo muestra la figura 3.7 los bornes del sensor actúa como un capacitor C2 en paralelo con el sensor piezoeléctrico pzt, en este caso el sensor wenglor (ver fig. 3.7).

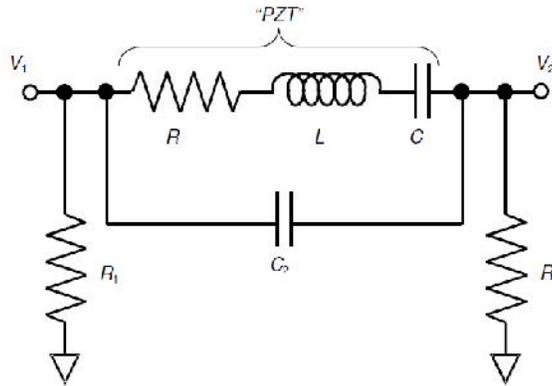


Fig. 3.7 Circuito equivalente del piezoeléctrico (PZT).
Fuente: Elaboración propia

Se representa con la ecuación (3.29):

$$L \frac{d^2 i}{dt^2} + R \frac{di}{dt} + \frac{1}{C} i = \frac{dV(t)}{dt} \quad (3.29)$$

Esto hace que el modelo del circuito cambie ligeramente y aparezca una frecuencia de anti-resonancia asociada con la capacidad en paralelo. Para un voltaje de entrada $V_1 = 83.6 \pm 0.1 \mu V$, se tiene experimentalmente una frecuencia de resonancia de $\omega_s = (50095.76 \pm 0.09)$ Hz, y una frecuencia de anti-resonancia de $\omega_p = (50289.8 \pm 0.2)$ Hz y una transferencia $T(\omega^\pm) = 0.216 \pm 0.005$.

El circuito equivalente de la fig. 3.7, satisface las ecuaciones (3.30a, 3.30b y 3.30c):

$$\omega_s = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (3.30a)$$

$$\omega_p = \sqrt{\frac{1}{L} \left(\frac{1}{C} + \frac{1}{C_2} \right)} \quad (3.30b)$$

$$T(\omega^\pm) = \sqrt{2} \frac{R_2}{R+R_2} = \left| \frac{V_2}{V_1} \right|_{\omega^\pm} \quad (3.30c)$$

Con este sistema de ecuaciones y los valores obtenidos experimentalmente se obtienen los parámetros del modelo R, L, C y C_2 .

Tabla 3.3 Valores del circuito equivalente RLC del piezoeléctrico.

R	$(36230 \pm 20) \Omega$
L	$(10528 \pm 5) \text{ H}$
C	$(3.78 \pm 0.01) 10^{-14} \text{ F}$
C ₂	$(4.876 \pm 0.002) 10^{-14} \text{ F}$
C _T	$8.65 \times 10^{-14} \text{ F}$

Para una $V_1 = 0.0836 \text{ V}$

Aunque la capacitancia C_2 no es parte en si del pzt (piezoeléctrico), si es parte de nuestro modelo, ya que las partes metálicas puestas al pzt son necesarias para realizar que el pzt resuene, por lo que se tiene que tomar una capacitancia total resultante de C y C_2 en paralelo es la suma de las dos, es decir:

$$C_T = C + C_2 = 8.65 \times 10^{-14} \text{ Farad} \quad (3.31)$$

Obsérvese que estos valores con una inductancia muy elevada con una capacitancia muy pequeña, son imprácticos para un circuito real, sin embargo, solo requerimos sacar los parámetros del modelos RLC equivalente para sacar nuestro modelo y funciones de transferencia, el cual es idéntico para nuestro modelo real experimental tomado como base.

Con esto tenemos que nuestro modelo del piezoeléctrico es el siguiente:

Substituyendo los parámetros de la tabla 3.3 en la ecuación (3.29), considerando el término $\frac{dV(t)}{dt} = 0$, dado que la derivada de V_1 es cero y considerando las resistencias R_1 y R_2 fuera del modelo dado que no forman parte del modelo de nuestro piezoeléctrico. Entonces el modelo matemático de nuestro piezoeléctrico es el siguiente:

$$10528 \frac{d^2i}{dt^2} + 36230 \frac{di}{dt} + \frac{1}{8.65 \times 10^{-14}} i = 0 \quad (3.32)$$

El cual es un modelo de segundo orden con el siguiente modelo en términos de Laplace:

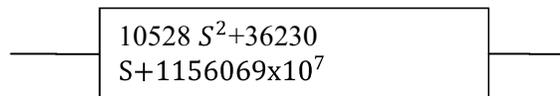


Fig. 3.8 Modelo del piezoeléctrico en términos de Laplace.
Fuente: Elaboración propia.

3.2.5 SISTEMA EN LAZO CERRADO SIN ALGORITMO DE CONTROL

La función de transferencia de un sistema descrito mediante una ecuación diferencial lineal e invariante en el tiempo, se define como el cociente entre la transformada de Laplace de la salida (respuesta) y la de la entrada (excitación) bajo la suposición de que todas las condiciones iniciales son cero.

Considérese un esquema de lazo cerrado como se muestra en la figura 3.9. [36]: En donde $G(s)$ comprende la función de transferencia de la planta y en donde no se considera aun un control (ver figura 2).

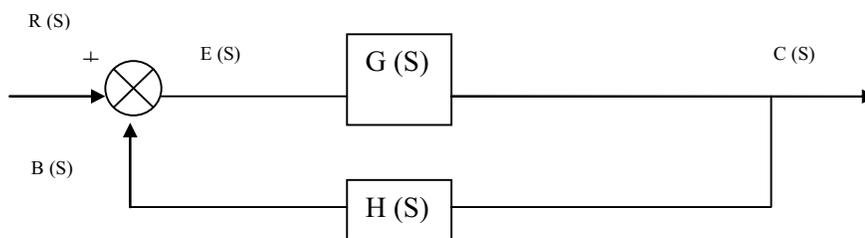


Figura 3.9. Esquema de un sistema típico de lazo cerrado sin control.

Partiendo del esquema de la figura 3.9, y tomando en cuenta que el alcance de este estudio es solamente encontrar el modelo de control adecuado para controlar el eco en un emisor de sonido para garantizar el eco suficiente, de forma automática, que se requiere para asegurar que el sonido reflejado es confiable para realizar la medición de la profundidad, en este caso de los pozos, o visto de una manera general, para garantizar que una media de la distancia será confiable.

Por lo mismo, es aceptable considerar al actuador y al sensor $H(S)$ como una simple ganancia igual a 1 para fines de simplificar el modelo representado en la Figura 3.9 y solo concentrarse en el algoritmo de control. Por la misma razón de simplificación de la representación a bloques del sistema de control de lazo cerrado, la función de transferencia del amplificador para la figura 3.9, quedará implícita en la función de transferencia del algoritmo de control a proponer, pues como se indica en esta figura, forma parte del control automático. Por consiguiente, nuestro sistema de lazo cerrado, aun sin control queda como sigue:

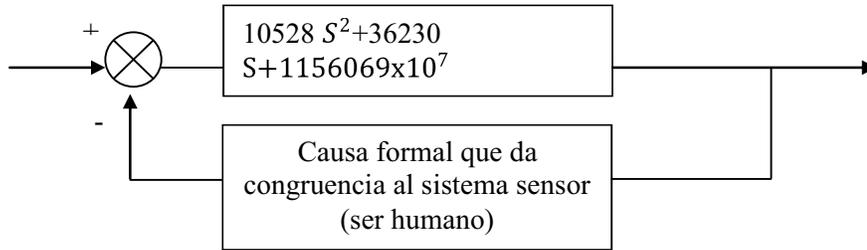


Figura 3.10 Sistema de lazo cerrado del modelo sin control.
Fuente: Elaboración propia.

El ser humano es un factor que da congruencia al sistema sensor, dentro de la acción y operación del ser humano del sensor, se desprecia su acción, dado que este se valida mediante un estudio de repetibilidad y reproducibilidad, el cual es despreciable dado que a este nivel de investigación de simulación, siempre habrá repetibilidad reproducibilidad. Más bien el factor humano deberá incluirse en un estudio que incluya el impacto de la utilización de este conocimiento en la tecnología, ya que la tecnología beneficia e impacta directamente en el ser humano cambiando sus hábitos y costumbres, pero no es parte del alcance de este estudio.

3.2.6 FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA EN LAZO ABIERTO SIN CONTROL

En un esquema como el que se muestra en la figura 3.7, la función de transferencia en la lazo abierto se define como en la ecuación (3.33):

$$\frac{B(S)}{E(S)} = G(S)H(S) \quad (3.33)$$

Por lo que la función de transferencia en lazo abierto queda como indica la ecuación (3.34):

$$G(S)H(S) = 10528 S^2 + 36230 S + 1156069 \times 10^7 \quad (3.34)$$

3.2.7 FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA EN LAZO CERRADO SIN CONTROL

En un esquema como el que se muestra en la figura 3.8, la función de transferencia en la lazo cerrado se define como en la ecuación (3.35):

$$\frac{C(S)}{R(S)} = \frac{G(S)}{1 + G(S)H(S)} \quad (3.35)$$

Por lo que la función de transferencia en lazo cerrado queda como sigue (3.36):

$$\frac{C(S)}{R(S)} = \frac{10528 S^2 + 36230 S + 1156069 \times 10^7}{1 + 10528 S^2 + 36230 S + 1156069 \times 10^7} \quad (3.36)$$

3.3 ESTIMACIÓN DE PARÁMETROS DEL CONTROL POR MODOS DESLIZANTES DEL SENSOR ACÚSTICO

MODELO RECURSIVO EN ESPACIO DE ESTADOS [14].

Considerando el modelo eléctrico del modelo del actuador del piezoeléctrico de forma simplificada se tiene la forma (3.37)

$$\begin{aligned} \dot{X}_t &= AX_t + Bw_t \\ Y_t &= CX_t + Dw_t \end{aligned} \quad (3.37)$$

Teorema 1. Sea el modelo del sistema considerado en espacio de estados de la forma (3.37). Entonces (3.38) es la forma recursiva de (3.37).

$$\dot{Y}_t = GY_t + HV_t \quad (3.38)$$

Donde G, H son matrices de la forma $G \in \mathbb{R}_{[0,1[}^{[n \times n]}$, $H = f(A, C, B, D)$ y $V_t \in N\{\mu, \sigma^2 < \infty\}$

Prueba Teorema 1 (Ver sección de hipótesis).

LEY DE CONTROL

Teorema 2. La ley de control para el sistema descrito de acuerdo con (3.38), tiene la forma (3.39)

$$V_t^* = H^+(E_t^* - GY_t) \quad (3.39)$$

Con H^+ como la matriz pseudoinversa de H , E_t como el proceso del error estocástico del sistema descrito en (3.38), y G , una matriz de la forma $G \in \mathbb{R}_{[0,1[}^{[n \times n]}$.

Prueba **teorema 2** (Ver sección de hipótesis).

El principal problema del piezoeléctrico es la descripción de sus parámetros correspondientes a una cierta distancia, lo que haría imposible su uso de forma efectiva; sin embargo es necesario considerar que es posible realizar su estimación con un nivel de incertidumbre que permita lograr una descripción de la forma en casi todos los puntos que componen su superficie.

ESTIMACION DE PARAMETROS

El modelo descrito en (3.38) y la ley de control (3.39), requieren para converger al sistema de referencia ($Y_{r,t}$) de conocer a la matriz G [14].

El sistema de referencia es del tipo caja negra [14], por lo cual no se conoce qué valores tiene G , ya que es parte interna de ese sistema. Por tal motivo es necesario realizar el proceso de estimación de sus parámetros [14].

Teorema 3. Dado el modelo recursivo (3.38), su estimador estocástico de la matriz G , es (3.40)

$$\hat{G}_t = P_t Q_t \quad (3.40)$$

Con P_t, Q_t matrices de varianzas y covarianza, de (3.38).

Prueba **Teorema 3** (Ver sección de hipótesis).

Teorema 4. La forma recursiva del estimador (3.40) de manera discreta considerando condiciones estacionarias es (3.41).

$$\hat{G}_t = \alpha_t \hat{G}_{t-1} + \beta_t \quad (3.41)$$

Prueba Teorema 4 (Ver sección de hipótesis).

El piezoeléctrico desarrollado como el sistema descrito en (3.37), como un sistema tipo caja negra en el que solo se observa entradas y salidas sin que se conozca con exactitud qué es lo que está ocurriendo dentro de él. La ley de control en este caso no afecta al sistema de referencia sino al modelo que de igual forma está afectado por la estimación de parámetros para que en un sentido de probabilidad tenga los resultados más próximos a las ganancias requeridas dada la señal emitida por el piezoeléctrico.

El recorrido del modelo se realiza en los reales (\mathbb{R}), específicamente sobre una línea hipotética en la que describe la forma del contenedor.

El diagrama a bloques del piezoeléctrico usando el control con el proceso de adaptación tiene la forma de la figura 3.9, como un proceso de descripción en espacio de estados de la respuesta del sistema de referencia piezoeléctrico.

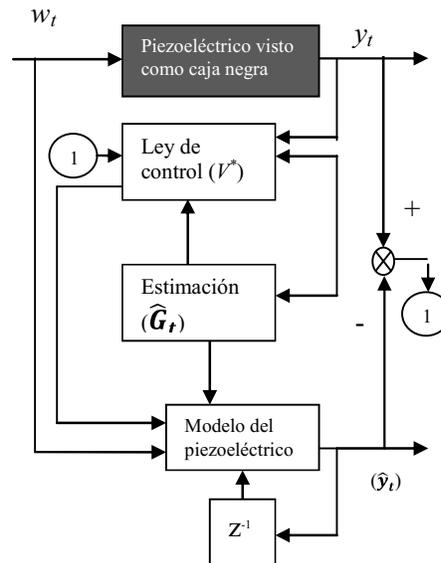


Figura 3.11 Diagrama de bloques del sistema de control como descriptor de un sistema Piezo-eléctrico con ajuste de parámetros.
Fuente: Elaboración propia.

La ley de control que usa los modos deslizantes descritos en la ecuación (3.39) fue sugerido, la cual afecta directamente el espacio de estados del modelo, permitiendo el control de una manera automática e independientemente de conocer la profundidad de un pozo (por ejemplo) o sin ver su fondo.

APLICACIÓN DEL MODELO SISTEMICO CIBERNETICO A UN MODELO AFIN O EQUIVALENTE (CABECEO O MOVIMIENTO LONGITUDINAL DEL ASCENSO Y DESCENSO DE UN AVION EXPERIMENTAL)

El control por modos deslizantes es un algoritmo de control que está demostrando de acuerdo a las simulaciones preliminares que controla de una manera suave, rápida y efectivamente nuestra variable a controlar. Por ejemplo, esto fue demostrado para el modelo cibernético de un avión experimental [13] de la siguiente manera:

$$Ga(s) = \frac{M(s)}{\delta(s)} = \frac{b_0s^2 + b_1s + b_2}{a_0s^2 + a_1s + a_2} \quad (3.42)$$

Los coeficientes tienen los siguientes valores nominales de la tabla 3.4.

Tabla 3.4 Coeficientes del modelo del cabeceo.
Fuente: Elaboración propia.

Coefficient	Wind tunnel experimental results
b_0	2.628238218(dimensionales)
b_1	4927.325304(N/m.s.) ⁻¹
b_2	1125059746.00(N/m.s.) ⁻²
a_0	1 (dimensionales)
a_1	2835.2929(N/m.s.) ⁻¹
a_2	417643437.5 (N/m.s.) ⁻²

Por otra parte, de acuerdo con [13], se propuso que el modelo representa la ráfaga de viento, donde r afecta el sistema, que tiene una forma mínima (3.43), descrito de forma ilustrativa en la figura 3.10.

$$Ga(s) = \frac{\Theta(s)}{\delta(s) + r(s)} = \frac{1}{s^2 + a_1s + a_2} \quad (3.43)$$

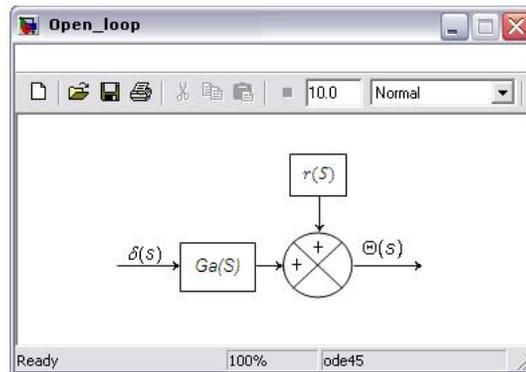


Figura 3.12 Diagrama de lazo abierto del modelo del avión.

Fuente: Elaboración propia con ayuda del Software MatLab R. 2012a.

Con $r(s)$ de la ráfaga de viento, $\Theta(s)$ es el ángulo de ascenso o descenso, $\delta(s)$ el ángulo del elevador de la cola del avión. La función de transferencia (3.42) en el espacio estados se está considerando [13] que tiene la forma (3.44)

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \\ \dot{x}_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ -a_1 & -a_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & -a_2 & -a_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \beta_1 \\ \beta_2 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ \beta_4 \end{bmatrix} r$$

$$y = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \end{bmatrix} + \beta_0 \mu$$
(3.44)

Donde los coeficientes $\beta_0 = b_0, \beta_1 = b_1 - a_1 \beta_0,$
 $\beta_2 = b_2 - a_1 \beta_0, \beta_4 = b_2$

Considerando el sistema (3.44) expresado en forma simbólica en (3.45)

$$\begin{aligned} \dot{X}(t) &= AX(t) + Bu + Pr(t) \\ Y(t) &= CX(t) + Du(t) \end{aligned}$$
(3.45)

Con

$$\begin{aligned} \dot{X}, X &\in \mathfrak{R}_{[-1,1]}^{4 \times 1}; \quad u, y \in \mathfrak{R}^{11}; \\ B, P, C^T &\in \mathfrak{R}_{[-1,1]}^{4 \times 1}; \\ A &\in \mathfrak{R}_{[-1,1]}^{4 \times 4}; \\ \{r(\tau)\}_i &\subseteq N(\mu, \sigma^2 < \infty_{\mathbb{N}_i}) \\ y, D &\in \mathfrak{R}. \end{aligned}$$

El error definido como: $e(t) = Y(t) - \hat{Y}(t)$, donde $\hat{Y}(t)$ es la señal de referencia escogiendo la superficie deslizante descrita en (3.46) de acuerdo con [13]

$$S(e(t)) = \int_0^t e(\tau) d\tau$$
(3.46)

La superficie en un tiempo finito considera que (3.47)

$$\hat{Y}(t) \cong Y(t)$$
(3.47)

Para que $S(e)$ tenga una región de atracción [48] cumpliendo con(3.48).

$$S\dot{S} < 0 \quad (3.48)$$

De ahí que, una trayectoria suave se propone en (3.49)

$$\dot{S} = -F(S) \quad (3.49)$$

$F(S)$, es una función discontinua de S .

Considerando su derivada en (3.46) y aplicando (3.49), tiene la forma (3.50)

$$-F(t) = Y(t) - \hat{Y}(t) \quad (3.50)$$

Basando (3.45) en (3.49), la región es descrita en (3.51)

$$-F(t) = CX(t) + Du(t) - \hat{Y}(t) \quad (3.51)$$

Definiendo $F(s)$ como $-F(t) + \hat{Y}(t)$, la acción de la ley de control es descrita en (3.52)

$$u(t)^* = F(s) - CX(t)/d \quad (3.52)$$

La salida del modelo del avión experimental es considerada en (3.50); la ley de control se muestra en (3.53):

$$u(t)^* = F(s) - (X_1(t) + X_3(t))/\beta_0 \quad (3.53)$$

La figura 3.11, muestra de una manera esquemática la aplicación del control deslizante al modelo del avión experimental.

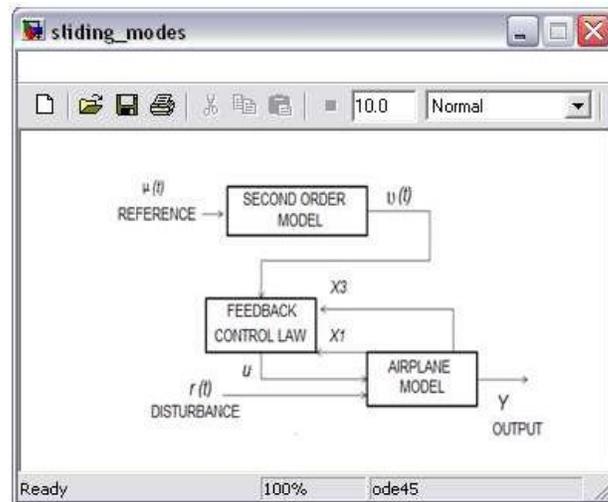


Figura 3.13 Diagrama a bloques de la retroalimentación de estados del Modelo sistémico de segundo orden.

Fuente: Elaboración propia con ayuda del Software MatLab R. 2012a.

3.4 RESULTADOS

3.4.1 RESULTADOS OBTENIDOS PARA EL SENSOR ACÚSTICO Y SU INTERPRETACIÓN [14]

La señal del piezoeléctrico así como su seguidor con la estimación de parámetros y la ley de control que afectan al modelo, tienen la forma para una señal del tipo estocástica con media y varianza acotadas, como se observan en la figura 3.12.

3.4.1.1 CON RESPECTO A LA SALIDA DEL SISTEMA. GRÁFICA 3.14

En la figura 3.14 se grafican las variables y_t (intensidad de sonido en decibeles emitido por el piezoeléctrico) con la \hat{y}_t (intensidad de sonido en decibeles del estimador).

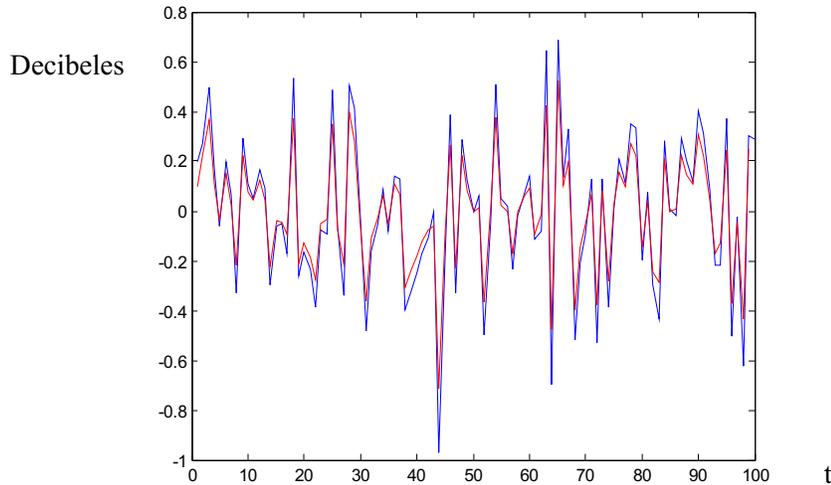


Figura 3.14 Señal temporal del piezoeléctrico tipo caja negra (azul) y de su seguidor (rojo).
Fuente: Elaboración propia con ayuda del Software MatLab R. 2012a.

INTERPRETACIÓN

En esta gráfica se está comparando la salida y_t con \hat{y}_t , es decir, se están graficando las salidas: la salida del dispositivo del piezoeléctrico que es el nivel de sonido que emite (azul) y el valor del nivel de sonido de su estimador (rojo), esto para saber que también está funcionando el observador diseñado, y por lo tanto nuestro modelo sistémico de control por modos deslizantes. En la gráfica se puede observar que el observador \hat{y}_t está siguiendo a la señal y_t de una manera satisfactoria pues es evidente el seguimiento que le da.

Los rizos o picos nos dan información de la densidad del medio por donde se desplaza el sonido, en este caso el aire, la frecuencia nos da información de la distancia de reflexión o en este caso la profundidad del pozo de agua. Entre más abundancia de rizos halla nos indicará que el medio en donde se desplaza tiene una densidad mayor y entre más grande sea la frecuencia nos indicará que la distancia es mas grande. En el común de los equipos de prueba y medición, se realiza una calibración en donde, por ejemplo, las variables medidas como frecuencia, decibeles, número de rizos, etc. que van variando con respecto al tiempo, se traducen en cuentas o sea un número equivalente, de tal forma que una cuenta equivaldrá, para este caso, a una medida de distancia o densidad real. Esta calibración y cálculo de las cuentas equivalentes se dejan para futuros desarrollos en donde el diseño de este modelo sistémico pueda desarrollarse dentro del ámbito tecnológico.

3.4.1.2 CON RESPECTO AL ERROR ESTOCÁSTICO DEL PROCESO. GRÁFICA 3.15

En la figura 3.15 se observa el proceso del error estocástico, esto es medido en la intensidad del sonido del piezoeléctrico a través del tiempo.

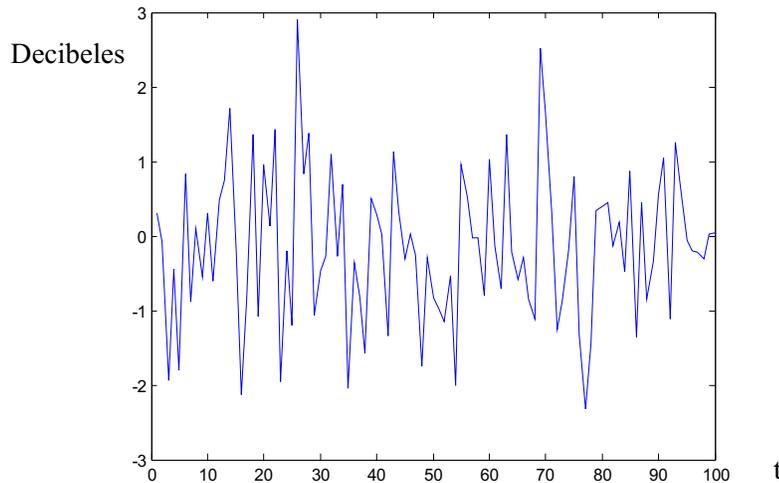


Figura 3.15 Proceso del error estocástico.

Fuente: Elaboración propia con ayuda del Software MatLa b R. 2012a.

INTERPRETACIÓN

En la gráfica 3.15 se define el error estocástico del proceso como un nivel de convergencia del seguidor con respecto al piezoeléctrico, como se observa en la figura, la amplitud de la señal va disminuyendo con respecto al tiempo, se puede decir que converge a cero o tiende a cero, por lo que nos dice esta gráfico es que dicho error se va reduciendo de una forma satisfactoria y por ende nuestro observador y nuestro control de modos deslizantes para nuestro sistema cibernético está funcionando. Cabe mencionar que este error estocástico del proceso también es conocido como proceso de innovación, pero para fines prácticos y de clara explicación se le nombra error estocástico.

3.4.1.3 CON RESPECTO A LA ENTROPÍA DE LA SEÑAL DE ERROR. GRÁFICA 3.16

La convergencia entre la señal propuesta y la del sistema de control sobre el modelo matemático del sensor acústico por medio de la entropía está descrito en decibeles de acuerdo con [14] de la forma $H_t = -20 [e_t \ln(e_t) - (1/20) H_{t-1}]$, donde $e_t := y_t - \hat{y}_t$ se presenta en la figura 3.16.

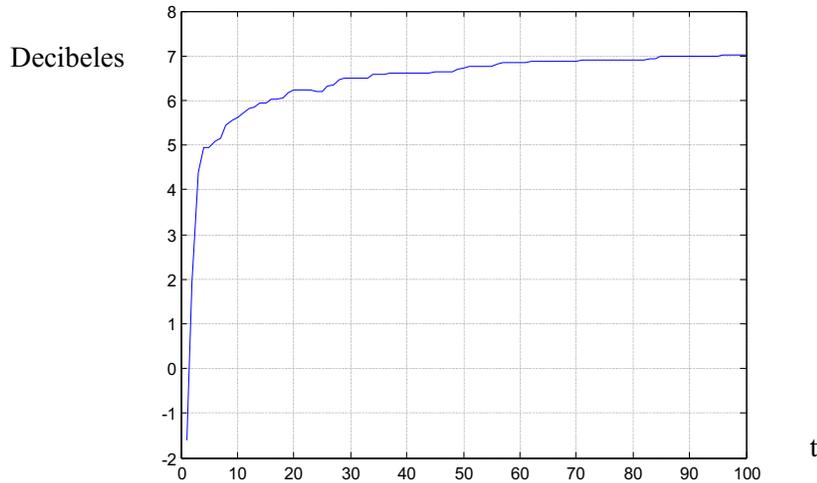


Figura 3.16 Logaritmo de la entropía de la señal del error.

Fuente: Elaboración propia con ayuda del Software MatLab R. 2012a.

INTERPRETACIÓN

La entropía en forma conceptual se puede entender como el nivel de desorden en nuestro sistema, en el sentido más básico se puede entender como que ningún sistema es perfecto, así por ejemplo, una liga al estirarla nunca regresara exactamente a su estado original, pero veamos como entendemos entropía en nuestro sistema cibernético acústico. La intensidad del sonido va variando de una forma constante, y siendo simultáneamente regulado por nuestro control de modos deslizantes, sin embargo existe un rango en el cual el sistema tiene una entropía hasta que esta se estabiliza, en este caso en 7 decibeles, esto quiere decir que para cada aplicación que diseñemos tendremos que calcular nuestra entropía, para este caso de esta aplicación, nos dice que nuestra entropía se estabiliza en 7 decibeles, por lo que tendremos nuestro dispositivo piezoeléctrico tendrá que emitir un mínimo de 7 decibeles para que nuestro modelo sistémico cibernético pueda operar adecuadamente, este valor de 7 fue obtenido basado en los parámetros de diseño propuestos, lo cual significará que en un futuro cuando este control sea validado a nivel tecnológico, entonces tendrá que ser ajustado este parámetro de 7 decibeles si así se requiriera.

3.4.2 RESULTADOS OBTENIDOS CON EL MODO DESLIZANTE EN EL MODELO DEL MOVIMIENTO LONGITUDINAL DEL AVION Y SU INTERPRETACIÓN [13]

La acción de la ley de control es aplicada al sistema del modelo del avión experimental en donde se desarrolla la señal de salida, que es la posición del cabeceo (ángulo de

inclinación), el modelo longitudinal del avión (cabeceo) se descompone en variables de estado para hacerlo factible de aplicarle un control por retroalimentación de estados de estructura variable (modos deslizantes), no siempre es posible aplicar este tipo de control, es por ello que se tiene que simular todas las variables de estado para realizar dicho diagnóstico y concluir su aplicabilidad o su funcionalidad para la aplicación que queramos usar nuestro modelo sistémico cibernético desarrollado en este estudio. Se obtuvieron los siguientes resultados en la simulación:

3.4.2.1 RESPUESTA A ESCALÓN MODELO DE LAZO ABIERTO DEL CABECEO. GRÁFICA 3.17

Aquí se grafica el comportamiento dinámico del ángulo de cabeceo θ (pitch position) a través del tiempo, aplicándole a la entrada un impulso y una señal escalón. Dado que el modelo del movimiento longitudinal del avión no se ve afectado por una entrada de impulso unitario (perturbación aplicada en un instante de tiempo), entonces no se ve la necesidad de aplicarlo en las siguientes variables de estado, si no solo la entrada tipo escalón (perturbación prolongada).

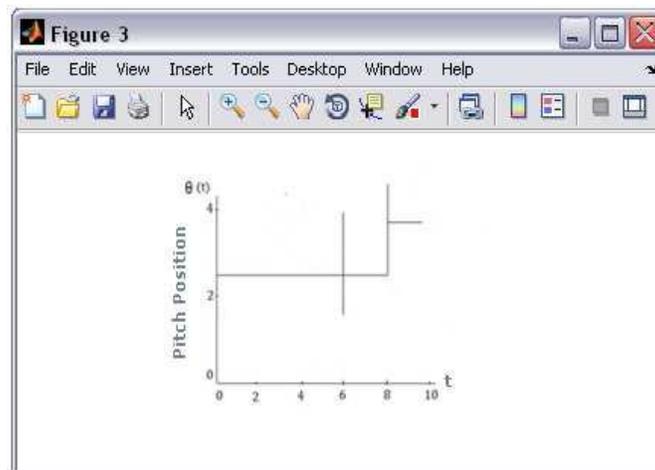


Figura 3.17 Modelo de lazo abierto del cabeceo (pitch position) del avión.
Fuente: Elaboración propia con ayuda del Software MatLab R. 2012a.

INTERPRETACIÓN

La importancia de graficar el comportamiento dinámico del movimiento longitudinal o movimiento de ascenso y descenso del avión (cabeceo), usando el modelo abierto, es que podemos saber cómo se comporta su respuesta a un escalón como entrada, pero sin usar el modelo cibernético de modos deslizantes, esto porque lo necesitamos para

poderlo comparar con el lazo cerrado y aplicando nuestro algoritmo de control por modos deslizantes.

Aquí se grafica el ángulo de cabeceo θ (pitch position), el cual es el ángulo que forma la nariz del avión (eje longitudinal o eje que atraviesa el largo del avión) con el eje horizontal de la tierra, cuando el avión se está elevando o descendiendo, el ángulo será positivo cuando el avión esta ascendiendo y negativo cuando el avión está descendiendo. El ángulo θ puede no se cero si se considera que el avión tiene un ascenso o descenso normal pero se le introduce a la entrada una señal escalón que simula una perturbación, en esta caso una ráfaga de viento.

Lo que se puede apreciar en la figura 3.17 es que al introducir una entrada impulso unitario el ángulo θ regresa a su posición, pues es solo un instante, esto quiere decir que si a este avión le llega una ráfaga de viento solo por un instante de tiempo, el avión se estabilizara y regresará a su posición original, sin necesidad de un control, sin embargo si le ocurre una perturbación en forma de bolsa de aire, torbellino o ráfaga de tiempo, que se prolongue en un lapso de tiempo (escalón a nuestro modelo), el ángulo θ no regresa a su valor original y por lo tanto requerimos aplicar un modelo cibernético para controlarlo, como el que se diseño en este trabajo, por lo que se tiene que probar si nuestro modelo sistémico cibernético encaja en esta aplicación.

3.4.2.2 RESPUESTA A ESCALÓN MODELO DE LAZO ABIERTO DE LA VARIABLE DE ESTADO X1. GRÁFICA 3.18

La Figura 3.18 muestra el comportamiento de la variable de estado X1 en lazo abierto con respecto al tiempo. El modelo del movimiento longitudinal del avión (cabeceo) se desglosa en variables de estado [13] para efectos de poner analizar si este movimiento es observable, controlable y de saber si nuestro modelo sistémico cibernético puede ser aplicable. No siempre las variables de estado son controlables, observables o representan algo físico, estas se diseñan o se encogen atendiendo el fin del diseño del modelo cibernético, en esta aplicación ninguna de las variables de estado tiene un significado físico, como un ángulo, distancia, velocidad, etc. En esta caso nuestro espacio de estados fue diseño de tal manera que simplemente nuestro modelo cibernético de modos deslizantes pudiera controlar el movimiento a controlar (cabeceo) mediante la variable a controlar que es el ángulo θ .

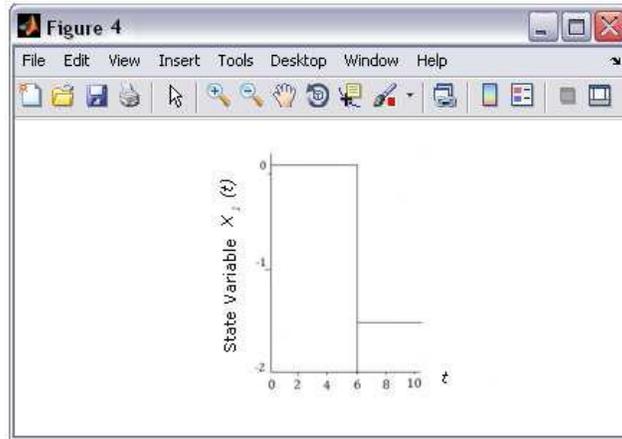


Figura 3.18 Variable de Variable de estado $X_1(t)$ en lazo abierto en el tiempo.
Fuente: Elaboración propia con ayuda del Software MatLab R. 2012a.

INTERPRETACIÓN

En la figura 3.18 se puede ver que la variable de estado X_1 no regresa a su referencia de origen al someterlo a una respuesta tipo escalón, esta información nos sirve para saber si tenemos que controlar esta variable de estado y para comparar este comportamiento una vez que apliquemos nuestro modelo cibernético. Obsérvese que los valores de esta variable se hacen negativos al aplicar la entrada escalón, la cual representa una perturbación como una ráfaga de viento prolongada, bolsas de aire, turbulencia, etc.

3.4.2.3 RESPUESTA A ESCALÓN MODELO DE LAZO ABIERTO DE LA VARIABLE DE ESTADOS X_2 . GRÁFICA 3.19

En esta gráfica se aprecia el comportamiento dinámico de la variable de estado X_2 cuando el modelo del movimiento longitudinal del avión se somete a una respuesta escalón (perturbación de tiempo prolongado).

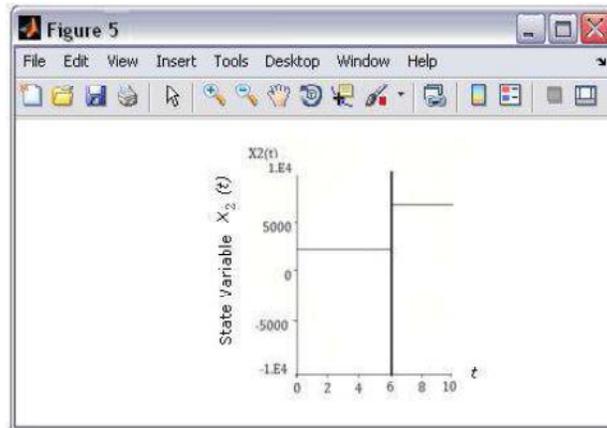


Figura 3.19 Variable de estado $X_2(t)$ en lazo abierto a través del tiempo.
 Fuente: Elaboración propia con ayuda del Software MatLab R. 2012a.

INTERPRETACIÓN

Al igual que para la variable de estados X_1 , esta variable de estados X_2 al ser sometida a una perturbación externa tipo escalón (de tiempo prolongado) no regresa a su estado referencia original, como se observa, en el tiempo igual a 6 s. se le introduce dicha perturbación y oscila por una fracciones de segundo para después estabilizarse pero en otro valor. Esto significa que la variable X_2 requiere ser controlada por algún modelo sistémico cibernético.

3.4.2.4 RESPUESTA A ESCALÓN MODELO DE LAZO ABIERTO DE LA VARIABLE DE ESTADOS X_3 . GRÁFICA 3.20

En esta gráfica se aprecia el comportamiento dinámico de la variable de estado X_3 cuando el modelo del movimiento longitudinal del avión se somete a una respuesta escalón (perturbación de tiempo prolongado).

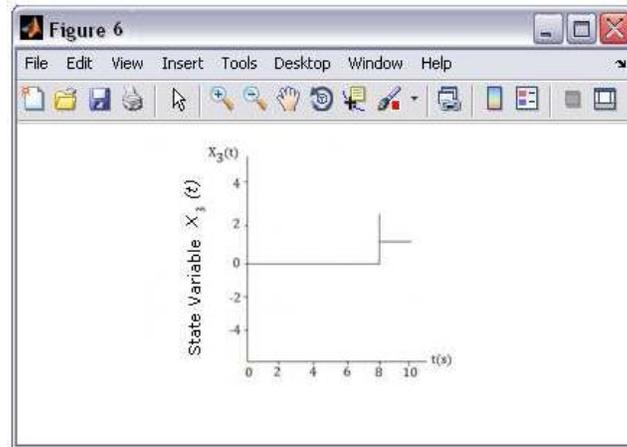


Figura 3.20 Variable de estado $X_3(t)$ en Variable de lazo abierto
 Fuente: Elaboración propia con ayuda del Software MatLab R. 2012a.

INTERPRETACIÓN

Al igual que para la variable de estados X_1 y X_2 , esta variable de estados X_3 al ser sometida a una perturbación externa tipo escalón (de tiempo prolongado) no regresa a su estado referencia original, como se observa, en el tiempo igual a 8 s. se le introduce dicha perturbación, para después estabilizarse pero en otro valor. Esto significa que la variable X_3 requiere ser controlada por algún modelo sistémico cibernético.

3.4.2.5 RESPUESTA A ESCALÓN MODELO DE LAZO ABIERTO DE LA VARIABLE DE ESTADOS X_4 . GRÁFICA 3.21

En esta gráfica se aprecia el comportamiento dinámico de la variable de estado X_4 cuando el modelo del movimiento longitudinal del avión se somete a una respuesta escalón (perturbación de tiempo prolongado).

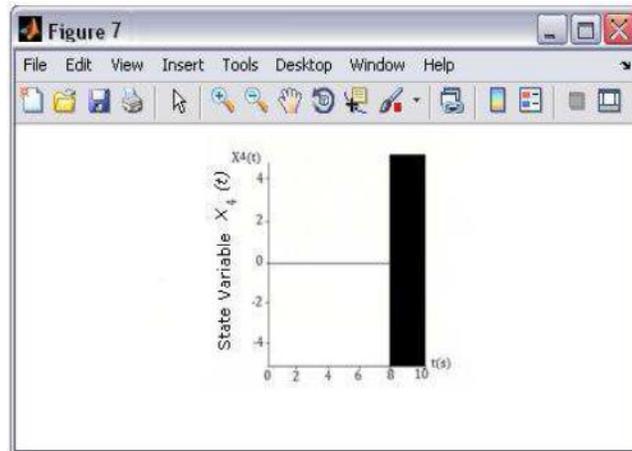


Figura 3.21 Variable de estado $X_4(t)$ en lazo abierto Variable de a través del tiempo.
 Fuente: Elaboración propia con ayuda del Software MatLab R. 2012a.

INTERPRETACIÓN

Al igual que para la variable de estados X_1 y X_2 , esta variable de estados X_3 al ser sometida a una perturbación externa tipo escalón (de tiempo prolongado) no regresa a su estado referencia original, sin embargo esta variable de estados no logra estabilizarse, como se observa, en el tiempo igual a 8 s. se le introduce dicha perturbación, para después salir de control en forma definitiva. Esto significa que la variable X_3 requiere ser controlada por algún modelo sistémico cibernético robusto, razón por la cual aplicamos el modo deslizando, el cual fue escogido precisamente por ser un tipo de control robusto.

3.4.2.6 RESPUESTA A SEÑAL ESCALÓN DE LA SALIDA Θ (CABECEO) EN LAZO CERRADO SIN CONTROL POR MODOS DESLIZANTES. GRÁFICA 3.22

La figura 3.22, describe el ángulo de cabeceo real, sin considerar las propiedades del modelo y las condiciones ideales medidas internamente en el sistema cibernético del avión.

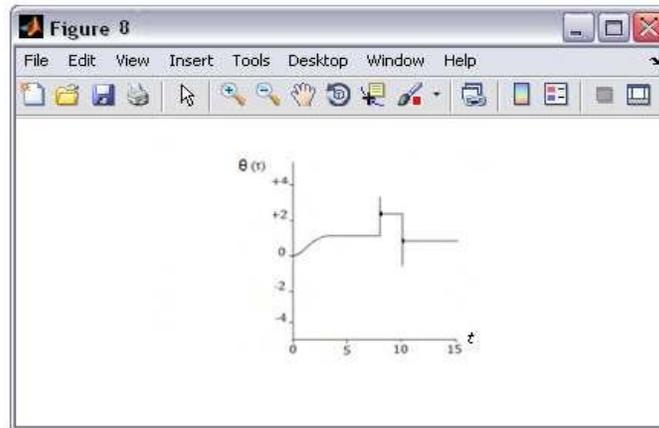


Figura 3.22 Señal de salida θ en lazo cerrado pero sin aplicar aun el modo deslizante.

Fuente: Elaboración propia con ayuda del Software MatLab R. 2012a

INTERPRETACION

La figura 3.22 nos muestra que nuestra variable a controlar θ (ángulo de cabeceo del avión) si se controla y regresa a su punto de referencia, con un margen de error pequeño, lo cual demuestra que si podemos aplicar nuestro modelo sistémico cibernético al modelo longitudinal (cabeceo) de un avión. En términos conceptuales lo que se puede decir es que el avión tardaría aproximadamente dos segundos en regresar a su posición horizontal, después de sufrir una perturbación prolongada como una ráfaga de viento, bolsa de aire, torbellino, o remolino de aire, es muy importante observar que la perturbación ocurre aproximadamente a los 8 segundos, y en este momento el ángulo de cabeceo se dispara o sea tiende a un valor extremo en forma precipitada pero en cuestión de unas fracciones de segundo se estabiliza en aproximadamente 2 grados y en el segundo 10 regresa a su posición original. Esto nos indica dos contribuciones imprescindibles que proporcionar nuestro modelo cibernético aun sin modos deslizantes para esta aplicación que son las siguientes (el modelo cibernético en lazo cerrado sin modos deslizantes se tiene que simular para fines comparativos):

- a) Un avión no debe sobrepasar de su ángulo crítico de cabeceo, de lo contrario se desplomará, el valor de este ángulo crítico de cabeceo para este tipo de aviones es de 19 grados [13]. El avión para el cual se probó el modelo cibernético desarrollado en este estudio es un mini avión no tripulado manipulado por control remoto [13], por lo que es muy crítico controlar el ángulo de cabeceo para que no sobre pase el valor crítico. El modelo sistémico cibernético desarrollado aun sin modos deslizantes, logra de forma automática asegurar que este avión no sobrepasara el ángulo crítico de cabeceo ante una perturbación externa.
- b) El modelo cibernético desarrollado aun sin modos deslizantes, una vez que estabiliza al avión para que no sobre pase el valor crítico de cabeceo, también

logra que regrese a su valor de referencia original, por lo que con ello queda demostrado que este modelo cibernético se puede aplicar al movimiento longitudinal del avión.

3.4.2.7 SEÑAL DE SALIDA θ USANDO LA LEY DE CONTROL DE RETROALIMENTACIÓN POR MODOS DESLIZANTES. GRÁFICA 3.23

Ahora, considerando las propiedades del modo deslizante, basándonos en (3.53) y la figura 3.4, donde la ley de control afecta directamente el ángulo de cabeceo, la entrada, como una ley y , los estados internos, muestran los resultados de las figuras 3.23 a la 3.28.

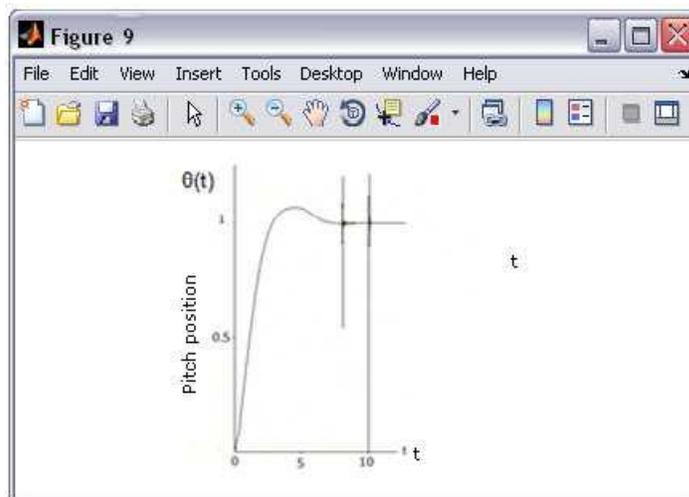


Figura 3.23 Señal de salida θ usando la ley de control de retroalimentación por modos deslizantes.
Fuente: Elaboración propia con ayuda del Software MatLab R. 2012a.

INTERPRETACION

La figura 3.23 nos muestra que nuestra variable a controlar θ (ángulo de cabeceo del avión) si se controla y regresa a su punto de referencia, con un margen de error despreciable, lo cual demuestra que si podemos aplicar nuestro modelo sistémico cibernético al modelo longitudinal (cabeceo) de un avión. Es términos conceptuales lo que se puede decir es que el avión tardaría solo unas fracciones de segundo en regresar a su posición horizontal, después de sufrir una perturbación prolongada como una ráfaga de viento, bolsa de aire, torbellino, o remolino de aire, es muy importante observar que ocurren dos perturbaciones, la primera ocurre aproximadamente a los 8 segundos, y en este momento el ángulo de cabeceo se dispara o sea tiende a un valor extremo en forma

precipitada pero en cuestión de unas fracciones de segundo se estabiliza ya a su valor de referencia (cosa que no ocurre al aplicar el modo deslizante) y se aplica una segunda perturbación en el segundo 10, (para ver si puede con dos perturbaciones a la vez) y también regresa a su posición original. Las contribuciones del modelo sistémico cibernético con modos deslizantes son varias y son claves para demostrar la funcionalidad y eficiencia de este modelo en esta aplicación, y son las siguientes:

- a) El modelo cibernético desarrollado en este estudio, una vez que estabiliza al avión para que no sobre pase el valor crítico de cabeceo, logra que regrese a su valor de referencia original, en cuestión de fracciones de segundo, por lo que con ello queda demostrado que este modelo cibernético se puede aplicar al movimiento longitudinal del avión. Esto se logra desde la aplicación de la primera perturbación y con la aplicación de las dos perturbación, una aplicada en el segundo 8 y la otra en el segundo 10. Después del segundo 10 las dos perturbaciones están siendo aplicadas en forma simultánea, esto demuestra la robustez del modo deslizante, y desempeño que no hubiera logrado el modelo cibernético si no se hubiera aplicado el algoritmo de control por modos deslizantes.
- b) Esta aplicación está pensada en un mini avión no tripulado por control remoto, para fines de rastreo de marihuana, monitoreo de tráfico vial, toma de fotografía aérea, mediciones atmosféricas y de contaminación, etc. el cual está pensado en volarse bajo condiciones de clima estable, sin embargo al ser manipulado por control remoto, la manipulación sobre él puede ser lenta y burda, por lo que no se le puede permitir que se desplome por esta causa y por lo mismo la automatización del movimiento longitudinal se hace imprescindible, pero el control automatizado deber ser robusto y considerar que puede está afectado por más de una sola variable a la vez, por ejemplo: una combinación de una ráfaga con una bolsa de aire o turbulencia. El modelo cibernético desarrollado en este estudio demuestra que puede con más de una perturbación a la vez.
- c) Un avión no debe sobrepasar de su ángulo crítico de cabeceo, de los contrario se desplomará, el valor de este ángulo crítico de cabeceo para este tipo de aviones es de 19 grados [13]. El avión para el cual se probó el modelo cibernético desarrollado en este estudio es un mini avión no tripulado manipulado por control remoto [13], por lo que es muy crítico controlar el ángulo de cabeceo para que no sobre pase el valor crítico. El modelo sistémico cibernético desarrollado en este estudio logra de forma automática asegurar que este avión no sobrepasara el ángulo crítico de cabeceo ante una perturbación externa.

3.4.2.8 LEY DE CONTROL POR MODOS DESLIZANTES. GRÁFICA 3.24

Para fines de análisis se hace también interesante observar el comportamiento dinámico de la ley de control por modos deslizantes.

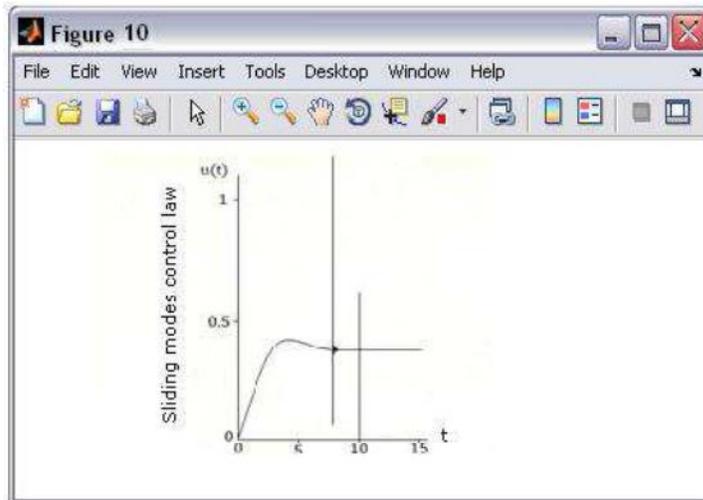


Figura 3.24 Ley de control por modos deslizantes.

Fuente: Elaboración propia con ayuda del Software MatLab R. 2012a.

INTERPRETACION

La simulación de la gráfica 3.24 nos muestra un comportamiento similar a la gráfica 3.23 que corresponde al del ángulo de cabeceo controlado por el sistema cibernético usando modos deslizantes, esto es de esperarse pero se simula para comprobar este hecho, de no haber sido así nos indicaría que hubo un error en nuestro diseño del modelo cibernético, por lo que solo es necesario para comprobar que no hay nada fuera de la lógica dentro del diseño de nuestro modelo cibernético.

3.4.2.9 VARIABLE DE ESTADO X_1 EN LAZO CERRADO USANDO EL MODELO CIBERNÉTICO CON MODOS DESLIZANTES. GRÁFICA 3.25

Aquí se simula el comportamiento dinámico de la variable de estados X_1 usando el modelo cibernético con modos deslizantes.

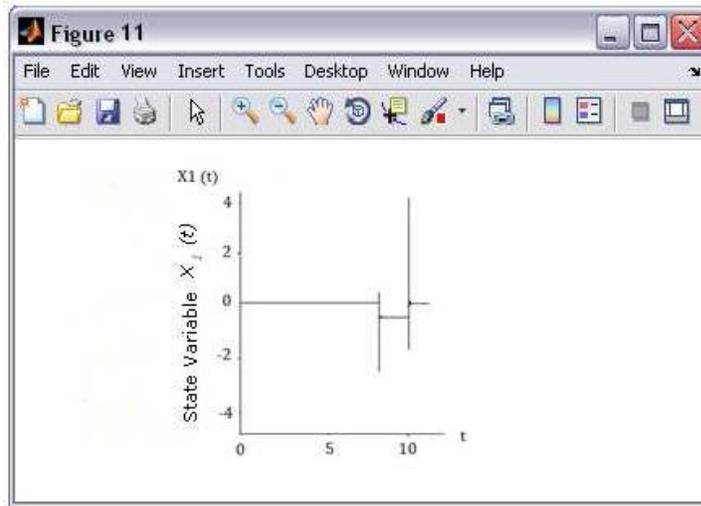


Figura 3.25 Ley de control por modos deslizantes aplicada a la variable de estado $X_1(t)$ en lazo cerrado.
 Fuente: Elaboración propia con ayuda del Software MatLab R. 2012a.

INTERPRETACION

Comparando la grafica 3.25 con la 3.18, se demuestra que sin usar el modelo cibernético con modos deslizante la variable de estados X_1 no regresa a su valor de referencia después de aplicar la perturbación escalón, y usando el modelo cibernético con modos deslizantes si lo hace, después de unos dos segundos y con un error despreciable.

3.4.2.10 VARIABLE DE ESTADO X_2 EN LAZO CERRADO USANDO EL MODELO CIBERNÉTICO CON MODOS DESLIZANTES. GRÁFICA 3.26

En esta gráfica se simula el comportamiento dinámico de la variable de estados X_2 usando el modelo cibernético con modos deslizantes.

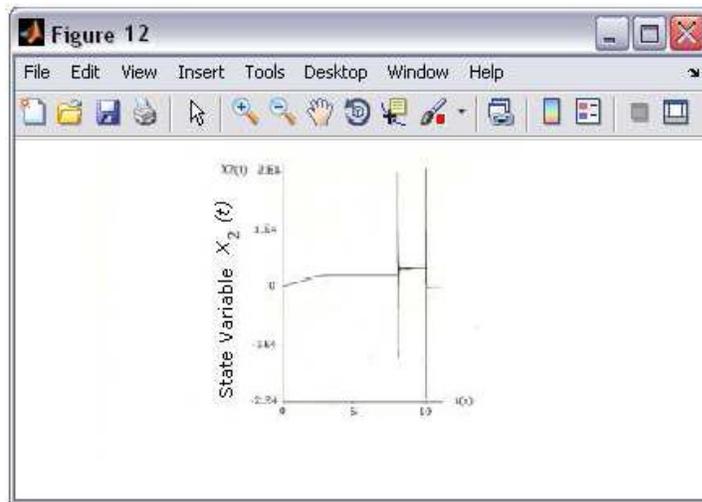


Figura 3.26 Ley de control por modos deslizantes aplicada a la variable de estado $X_2(t)$ en lazo cerrado.
 Fuente: Elaboración propia con ayuda del Software MatLab R. 2012a.

INTERPRETACION

Comparando la grafica 3.26 con la 3.19, se demuestra que sin usar el modelo cibernético con modos deslizante, la variable de estados X_2 no regresa a su valor de referencia después de aplicar la perturbación escalón, y usando el modelo cibernético con modos deslizantes si lo hace, después de unos segundos aunque con error pequeño pero mayor al que ocurre con X_1 .

3.4.2.11 VARIABLE DE ESTADO X_3 EN LAZO CERRADO USANDO EL MODELO CIBERNÉTICO CON MODOS DESLIZANTES. GRÁFICA 3.27

En esta gráfica se simula el comportamiento dinámico de la variable de estado X_3 , usando el modelo cibernético con modos deslizantes, la aplicación de este modelo implica que se use un lazo cerrado por retroalimentación de estados.

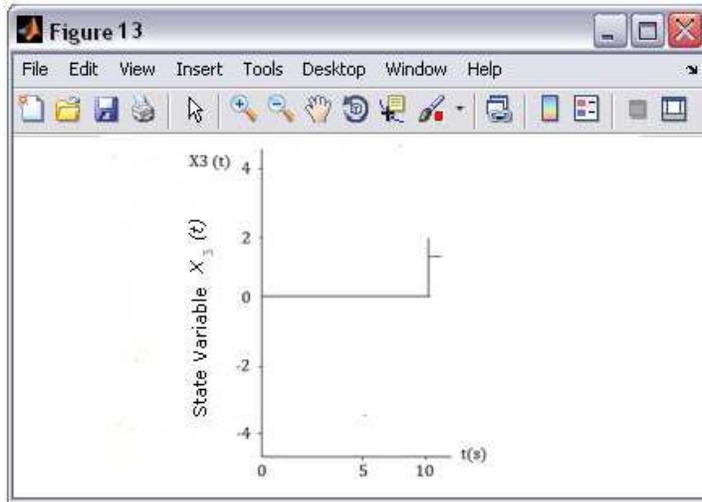


Figura 3.27 Ley de control por modos deslizantes aplicado a la variable de estado $X_3(t)$ en lazo cerrado.
 Fuente: Elaboración propia con ayuda del Software MatLab R. 2012a.

INTERPRETACION

Comparando la grafica 3.20 con la 3.27 se puede ver que la variable de estado X_3 , sin y con la aplicación del modelo cibernético con modos deslizantes no se regresa a su estado original de referencia, esto no nos afecta ya que de cualquier manera se demostró que la variable a controlar θ si se controla de una adecuada que satisface las necesidades de esta aplicación, sin embargo es importante comparar el comportamiento dinámico de esta variable para que quede como antecedente para futuras aplicaciones, o modificaciones de en esta aplicación de este modelo de avión.

3.4.2.12 VARIABLE DE ESTADO X_4 EN LAZO CERRADO USANDO EL MODELO CIBERNÉTICO CON MODOS DESLIZANTES. GRÁFICA 3.28

En esta gráfica se observa el comportamiento dinámico de la variable de estados X_4 para fines comparativos de la simulación que se realizo en lazo abierto sin el uso del modelo cibernético con modos deslizantes (fig. 3.21).

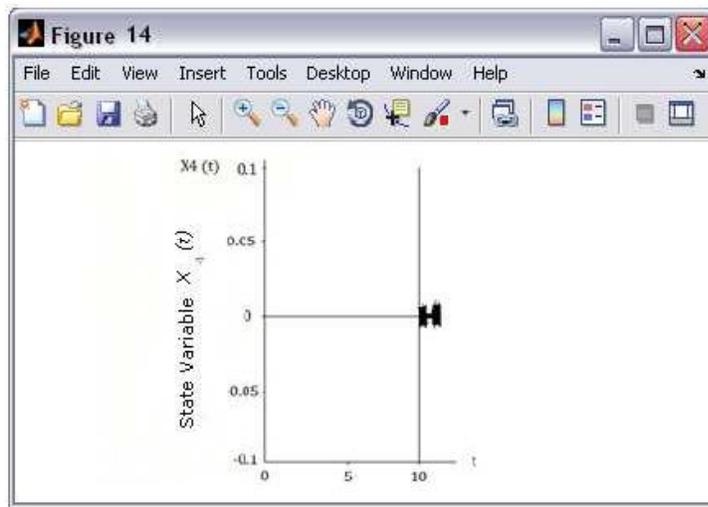


Figura 3.28 Ley de control por modos deslizantes aplicada a la variable de estado $X_4(t)$ en lazo cerrado.
 Fuente: Elaboración propia con ayuda del Software MatLab R. 2012a.

INTERPRETACION

Comparando la grafica 3.21 con la 3.28 se puede ver que la variable de estado X_4 , sin y con la aplicación del modelo cibernético con modos deslizantes no se regresa a su estado original de referencia, esto no nos afecta ya que de cualquier manera se demostró que la variable a controlar θ si se controla de una adecuada que satisface las necesidades de esta aplicación, sin embargo es importante comparar el comportamiento dinámico de esta variable para que quede como antecedente para futuras aplicaciones, o modificaciones de en esta aplicación de este modelo de avión. Solo se ve una mejora con el uso del modelo cibernético con modos deslizantes ya que la amplitud de la oscilación se redujo.

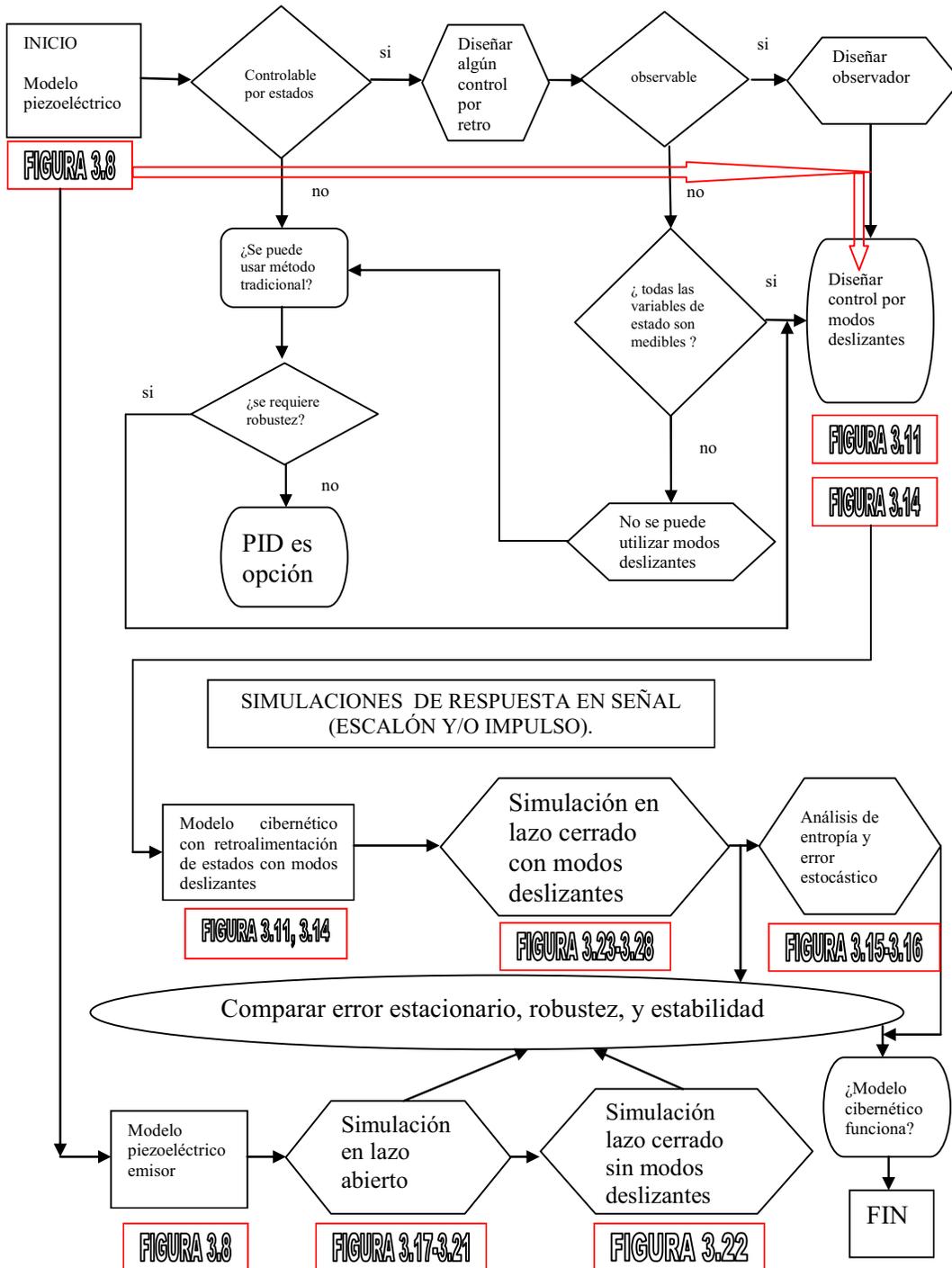


Figura 3.29 Esquema a bloques de decisiones del desarrollo y simulaciones del modelo cibernético de primer nivel.

Fuente. Elaboración propia.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES A FUTURO

Éste apartado, presenta las conclusiones que se obtuvieron con el desarrollo de ésta investigación; así como también las recomendaciones que se sugieren derivadas del análisis de los resultados obtenidos y de las limitaciones de éste estudio.

CONCLUSIONES GENERALES

CON RESPECTO AL MODELO CIBERNETICO DEL SENSOR ACÚSTICO

En este estudio se presentó con base al desarrollo del modelo eléctrico de un sensor acústico, el sistema de control que se requeriría para lograr describir una trayectoria a través del tiempo. Los resultados presentados a través de la simulación permiten observar el seguimiento de una trayectoria con aparición aleatoria. La ley de control depende de los parámetros internos, los cuales son ajustables y fueron obtenidos por su estimación. Los resultados de la simulación permitieron describir la trayectoria propuesta, con un nivel de entropía convergente. Como trabajos futuros se plantea el desarrollo de trayectorias no lineales así como la estimación no lineal de parámetros.

Este estudio presenta un modelo considerado en referencias de trabajos previos [6, 43] como una descripción del dispositivo piezoeléctrico. El sistema de control que actúa sobre el modelo requiere tener una matriz de parámetros de ganancia, movimientos de control adaptativos para favorecer el seguimiento del control de modos deslizantes. Los resultados teóricos afectan a las propiedades del modelo dinámico y la acción de control.

El seguimiento de las simulaciones aceptable en el sentido de probabilidad, con la tasa de convergencia medida de una manera estocástica, en decibelios. La salida del dispositivo piezoeléctrico tiene una evolución con la señal de la innovación. El seguimiento permite una gran convergencia con las condiciones estacionarias que afecta la acción de control sobre el modelo en forma positiva, lo que minimiza el error de convergencia de la respuesta piezoeléctrica con ocurrencia aleatoria. La ley de control depende de los parámetros internos, con ganancias ajustables de estimación. Los resultados de la simulación describen la propuesta de resultados, con un nivel de convergencia limitada en sus movimientos como se muestra en la figura de la entropía.

CON RESPECTO AL MODELO CIBERNETICO DEL AVIÓN:

Los mini-aviones experimentales normalmente son capaces de realizar diferentes tareas complejas, sin pérdida de la estabilidad ante la presencia de perturbaciones de ráfagas de viento. El modelo utilizado como punto de partida fue de cuarto orden descrito en el espacio estados con cuatro variables internas que se muestran en la ecuación (2.2), y en forma simbólica en la ecuación (2.3). De acuerdo con las trayectorias, se propuso la ley de control por modos deslizantes descrita en la ecuación (2.4), lo que afecta directamente a los espacios de estados internos del modelo lo que describe el comportamiento de ángulo de cabeceo controlado de una forma automática e independiente de las condiciones de visibilidad y distancia, de su manipulación a control remoto. Las figuras 3.15-3.26 describen los estados internos de modelo y el ángulo de cabeceo, (ver figura

3.21), que representa la posición angular real medida. La Figura 3.22 muestra la ley de control de los modos de deslizamiento con respecto al tiempo.

CONCLUSIONES CON RESPECTO A LOS OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN

CON RESPECTO AL OBJETIVO GENERAL:

El objetivo general planteado en la sección 1.3 se propone como tal, el diseñar un sistema cibernético para el manejo de las respuestas en señal para sensores acústicos, verificando si este sistema cibernético es capaz de resolver el problema de auto-regulación de los sensores acústicos, entre otros modelos afines. El sistema cibernético se desarrolla a nivel cibernético de primer nivel.

Este objetivo se cumple dado que el modelo sistémico cibernético diseñado, basado en seguimiento de trayectoria por modos deslizantes, es capaz de resolver el problema del auto-regulamiento planteado, dicho modelo sistémico está representado en la figura 2.8.

El desempeño del modelo cibernético fue demostrado con los resultados obtenidos en el capítulo 3 y basado en las conclusiones generales explicadas previamente.

Este modelo sistémico cibernético puede ser usado para el estudio y manejo de respuesta de señales acústicas utilizadas en sensores acústicos, e inclusive de modelos cibernéticos afines como el avión experimental [13].

La viabilidad de la utilización de modos deslizantes en nuestro modelo cibernético fue verificada mediante el modelo de retroalimentación de estados de la figura (3.11) y el modelo sistémico de la fig. (2.8) pudiéndose observar en las figuras 3.12 y 3.23 que nuestro modelo sistémico cibernético responde perfectamente ante una señal (respuesta a señal) escalón, la cual se utiliza para simular a la perturbación lo cual es válido y recomendado para el estudio en respuesta a señal [36], si comparamos las figuras 3.15, 3.22 y 3.23 correspondientes al modelo del cabeceo del avión, podemos ver claramente que el control total (desacoplamiento a perturbaciones) ocurre hasta que se aplica el algoritmo de control de modos deslizantes por retroalimentación de estados en lazo cerrado, esto demuestra de una manera clara y contundente que se cumple con el objetivo general de que nuestro modelo sirva para el estudio de respuesta en señal de sensores acústicos o modelos afines, pues entiéndase como modelo afín todo aquel que al aplicarle nuestra ley de control (basada en el modelo sistémico) pueda ser controlado o susceptible de ser estudiado mediante una respuesta en señal como lo fue en este caso una señal tipo escalón.

CON RESPECTO A LOS OBJETIVO ESPECIFICOS.

1.- El primer objetivo específico pide explicar el fenómeno de la medición del sonido y sus efectos en base al efecto piezoeléctrico. Para cumplir con este objetivo se parte de la explicación matemática de las oscilaciones en fluidos en la sección 2.2.6 del capítulo 2, con lo cual se expone la base teórica del comportamiento de cualquier fluido considerando que el sonido es un fenómeno mecánico oscilatorio ocurrido en un fluido o medio (en este caso de estudio el fluido es el aire) y se completa este objetivo realizando el desarrollo del modelo piezoeléctrico en el capítulo 3, en las secciones 3.2.2 a la 3.2.7, 3.3 y 3.4. Con este desarrollo aterrizamos la aplicación de la teoría de oscilaciones en fluidos para nuestro modelo (sensor piezoeléctrico) en estudio, el obtener el modelo matemático del piezoeléctrico a utilizar es el punto de partida para el desarrollo de nuestra investigación.

2.- El segundo objetivo específico se propone evaluar alguna técnica innovadora de control por retroalimentación de estado, sintetizando un algoritmo de control por retroalimentación de estado usando la técnica por modos deslizantes, para cumplir con este objetivo se tuvieron que realizar simulaciones con el Matlab R.2012a para ver el desempeño de la aplicación de la retroalimentación de estados mediante modos deslizantes, las graficas correspondientes se pueden apreciar en la sección 3.4, las cuales se realizaron tanto para el modelo cibernético del sensor acústico (figs. 3.3, 3.5, 3.11-3.28) como para un modelo afín que es para el cabeceo (ascenso y descenso) de un modelo experimental de un mini avión [13]. La razón por la cual también se aplico el modelo sistémico cibernético diseñado en el modelo del cabeceo de este mini avión fue principalmente para demostrar que puede ser utilizado a cualquier modelo afín y dejar ver su versatilidad y amplio potencial en aplicaciones en el futuro, lo cual potencializa el legado científico de este trabajo de investigación.

3.- Para cumplir con el tercer objetivo específico se tiene que demostrar que al utilizar la técnica por modos deslizantes en el diseño de la ley de control por retroalimentación de estado se obtiene como característica intrínseca de esta técnica, robustez del sistema en lazo cerrado ante variaciones en sus parámetros. La técnica de modos deslizantes se caracteriza, en términos terminales, por su robustez, pero no es una garantía de funcionamiento, dado que existen aplicaciones en donde no es recomendable su utilización por el problema de chattering o castaño (vibración) que se presenta en algunas ocasiones pudiendo ser inoperable el control, por ello mismo es necesario verificar la robustez ante perturbaciones. Para el caso del sensor acústico se puede observar claramente que seguimiento de la señal ante perturbaciones es casi perfecto como se puede apreciar en la grafica 3.12, esto se debe a que nuestro modelo sistémico es capaz de desacoplar las perturbaciones, esto significa que es como si la perturbación

no existiera o no hubiera ocurrido, para el caso del modelo afín del cabeceo del avión se puede observar en la figura 3.21 también que en tan solo unas fracciones de segundo el sistema se estabiliza y llega prácticamente al punto de referencia con un error prácticamente despreciable. Como se puede ver en las figuras 3.16 a la 3.26 las variables de estado X1 a X4 son también controladas al aplicársele la ley de control por retroalimentación de estados por modos deslizantes, con este resultado también está implícita la eficacia de nuestro modelo sistémico para el estudio en respuesta en señal, ya que de no haber servido para el estudio de la respuesta a señal, no hubiera servido como ley de control o sea como modelo cibernético.

Para visualizar de una manera rápida las conclusiones de cada objetivo y de si se cumplieron los objetivos, a continuación se muestra la siguiente tabla:

OBJETIVO	DESCRIPCIÓN DEL OBJETIVO	CONCLUSIÓN	¿CUMPLIMIENTO?
Objetivo general.	Diseño de modelo cibernético para respuesta en señal.	Modelo matemático de primer nivel cibernético desarrollado (fig. 2.8) con auto-regulamiento y probado a nivel simulación.	Cumplido a nivel de modelo cibernético de primer nivel. Ver figura (3.11) y (2.8) Ver figuras: 3.12-3.23 de las simulaciones de respuesta en señal.
Objetivo específico 1.	Explicar el fenómeno de la medición del sonido y sus efectos en base al efecto piezoeléctrico	Para cumplir con este objetivo se aborda los conceptos teóricos de la transmisión de ondas acústicas, del modelo eléctrico equivalente del piezoeléctrico y el desarrollo matemático para la obtención del modelo representativo de nuestra aplicación.	Objetivo cumplido partiendo de la explicación de las oscilaciones en fluidos (ver 2.2.6). Se explica el modelo equivalente del piezoeléctrico y se explica la obtención del modelo piezoeléctrico (secciones 3.2.2-3.2.7, 3.3 y 3.4).
Objetivo específico 2	Evaluar alguna técnica innovadora de control (cibernético) por retroalimentación de variables de estados.	Se utilizó una comparación entre el comportamiento dinámico de la respuesta en señal del modelo sistémico a controlar, con y sin la aplicación del modelo cibernético de primer nivel, por retroalimentación de estados. Al comparar dichos resultados se concluye de manera contundente que el algoritmo de control por retroalimentación de estado por modo deslizante funciona adecuadamente para nuestra aplicación.	Objetivo cumplido. Partiendo del diagrama de bloques del sistema de control del piezoeléctrico (fig. 3.11), se realizaron las simulaciones para la respuesta en señal del modelo cibernético de primer orden (figura 3.12-3.28), que nos llevaron a nuestro objetivo.
Objetivo específico 3	Demostrar que al utilizar la técnica por modos deslizantes en el diseño de la ley de control por retroalimentación de estado se obtiene como	La robustez o desacoplamiento a perturbación, se demuestra con el desacoplamiento a perturbación del control por modos deslizantes.	Objetivo cumplido. Ver las figuras 3.23 y 3.24, en donde se demuestra el desacoplamiento de la señal de salida y de la ley de control en donde existe el

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

	característica intrínseca de esta técnica, robustez		sistema regresa a su estado de referencia después de aplicar perturbaciones.
--	---	--	--

RECOMENDACIONES A FUTURO

Dado el amplio potencial de esta investigación existen un sin número de recomendaciones que se pueden hacer a este trabajo en cuanto a ampliar los horizontes, alcances, oportunidades de investigaciones futuras basadas en los resultados de este trabajo de investigación, empleo de este modelo en sistémico en otros modelos cibernéticos, etc. y, por otro lado tenemos que considerar que en un mundo competitivo como el de hoy la tecnología se va actualizando y revolucionando a pasos gigantescos, la tecnología que es de vanguardia hoy puede ser obsoleta en unos años, especialmente cuando se trata de equipo electrónico, y partiendo del hecho de que este modelo sistémico cibernético está diseñado para la aplicación en tecnología del tipo electrónico de automatización, entonces tenemos una investigación científica que no se obsoleta tan rápidamente como en su campo tecnológico de aplicación, dando la oportunidad de que las investigaciones aquí realizadas sean aplicadas en múltiples tecnologías de ahora y futuras (los modos deslizantes surgieron desde casi un siglo y ahora es líder en aplicaciones de hoy en día), pudiendo provocar inclusive una revolución tecnológica, pues no estamos produciendo nuevas tecnologías en este trabajo sino nuevo trabajo científico, además considérese que el modelo sistémico cibernético realizado no solo puede ser utilizado en sensores acústicos sino que en todo tipo de sensores, pues no existen sensores en el campo comercial industrial que sean auto-regulables en su intensidad, además de su posible aplicación en modelos afines, como se demostró en el modelo del cabeceo de un avión experimental.

Partiendo de los comentarios realizados en el párrafo anterior se enuncian a continuación las siguientes recomendaciones:

- a) Como investigación futura **se recomienda** probar este modelo en el uso de aplicaciones de pruebas no destructivas (NDT por sus siglas en inglés non destructive test). Dado que hoy en día un ramo de las pruebas no destructivas es el ultrasonido, el cual se utiliza, por ejemplo, para la medición de espesores y tanques así como para la determinación de fallas como fracturas y fugas en las paredes de tuberías y tanques de procesos que no puedes parar el proceso por lo tanto no puedes cortar un pedazo de este material para realizarles pruebas y echarlo a perder, dado que sería extremadamente costoso o peligroso interferir el proceso, o en algunos casos simplemente no es posible. Los sensores de ultrasonido utilizados para NDT no cuentan con auto-regulación, ejemplo el DMS2 de General Electric (ver tabla 1), en el cual se tienen que cambiar los transductores piezoeléctricos dependiendo del rango del espesor. En esta aplicación la perturbación a desacoplar sería la originada por el defecto del espesor a medir, por ejemplo, la fractura o fisura, ya que este defecto provoca un

efecto de distorsión o absorción del sonido. Evidentemente el alcance de este estudio no comprendió la exploración en este tipo de aplicaciones además de que de hacerse la investigación en este tipo de aplicaciones se tendría que considerar que la señal de perturbación fungiría a la vez como señal de retroalimentación para la medición del eco, por lo que no bastaría contemplar un modelo sistémico basado en retroalimentación de estados basado en modos deslizantes sino un modelo que incluyera también una estructura tal vez de redes neuronales o algo por el estilo.

- b) Como investigación futura **se recomienda** probar el modelo sistémico cibernético diseñado en aplicaciones como en el sonar y cualquier otra aplicación que pueda estar sujeta a cambios fuertes de temperatura e interferencia de por un flujo rápido de corriente dentro de nuestro flujo de corriente normal de nuestro medio o fluido. En estas circunstancias o perturbaciones provocadas por ejemplo, por alguna corriente submarina rápida o caliente como existen en algunas partes del océano, el porcentaje de eco requerido puede disminuir drásticamente por dichas perturbaciones. Una aplicación submarina para la detección de cardúmenes que usan algunos barcos pesqueros también entrarían en este punto.
- c) Existen dos formas de utilizar el cristal piezoeléctrico en el sensor transductor: Una forma es utilizar dos piezoeléctricos, uno como emisor y otro como receptor, la otra forma es utilizar un solo piezoeléctrico en el transductor, el cual fungirá como emisor y receptor pero no al mismo tiempo, es decir contará con un programa o algoritmo que va interrumpiendo en forma intermitente (obedeciendo a un tren de pulsos) para que en instantes este piezoeléctrico funja como emisor mientras rebota la señal acústica y después como receptor para leerla o sensorla. Véase la figura 1 y nótese que en este estudio se considera el uso de un solo piezoeléctrico dado que el sensor acústico en mediciones de distancias solo usa un piezoeléctrico para emitir como recibir la señal, ya que cuando se usa uno para emitir y otro para recibir, entonces se forma un ángulo en el rebote de la señal que limita la distancias y, como se menciona en los antecedentes (ver punto 1.1 del capítulo 1) nuestro sensor está enfocado a medición de distancias, por lo que como una investigación a futuro también **se recomienda** investigar la factibilidad de la utilización de este modelo sistémico cibernético para el caso de la utilización de dos piezoeléctricos, uno como emisor y otro como receptor, dado que de poder utilizarse, entonces el uso de este modelo se podría ampliar para aplicaciones en donde se requiere forma un ángulo de rebote para forma un perfil acústico como lo requieren aplicaciones como el ultrasonido para mediciones llamadas volumétricas (que no fue el alcance de este estudio). Entiéndase, para este caso, como volumétricas aplicaciones como el uso de sensores acústicos para medición de niveles de silos que almacenan granos que dado que contienen granos sólidos, el nivel no es de forma lineal sino que tiene un perfil, como es el caso del sensor de APM (ver tabla 1) , entre otras aplicaciones donde se requiera un monitoreo en dos dimensiones, como la vista de un ultrasonido de un bebe en el vientre materno

o la vista de un perfil en dos dimensiones del fondo marino, la vista de un radar acústico para ver cardúmenes, etc, hay muchas aplicaciones de este tipo.

- d) El control por modos deslizantes, para el caso de aplicaciones que implica un movimiento mecánico, se produce un efecto llamado chattering (vibración) dado que esta sometido a rápidas conmutaciones, este se puede decir que es un efecto no deseado en ciertas aplicaciones en donde se requiere que el proceso a controlar no sufra de regulaciones tan rápidas, pues en ciertos procesos afecta que el punto deseado (valor de consiga) o estabilización del sistema ocurra tan rápido por la naturaleza del proceso. Se puede decir que en estos casos se prefieren usar otros modelos de control e inclusive otros modelos tradicionales basados por ejemplo, en controles PID (proporcional integral derivativo) por el efecto del chattering, desaprovechando así, las grandes ventajas que ofrece el modo deslizantes. El chattering no puede ser evitado desde el punto de vista de la naturaleza del modo deslizante ya que forma parte de su naturaleza, sin embargo, al nivel de investigación en el que estamos trabajando (a nivel sistémico) estamos trabajando por encima de las capacidades del algoritmo cibernético del modo deslizante, puesto que estamos considerando todo el sistema completo, por lo que **se recomienda** para futuras investigaciones incluir en este modelo sistémico cibernético propuesto, un bloque que considere algo que, si se puede llamar así, sería un desacoplamiento al efecto del chattering, esto podría revolucionar la investigación científica basada en modos deslizantes realizada hasta hoy.
- e) El rango audible del ser humano es de 20Hz a 20Khz, sin embargo la frecuencia a la que oscile el cristal piezoeléctrico del sensor acústico, dependerá del medio o fluido en que se desplazará el sonido ya que hay una relación entre el poder de penetración al medio con la frecuencia de oscilación, por ejemplo, los sensores acústicos comerciales que se usan en pruebas no destructivas (NDT) en donde la señal acústica tiene que desplazarse en el acero, es del rango de los 25 mega Hertz, otros utilizado para desplazamiento en gases son del rango de los 2.5 mega Hertz (10 veces mas pequeña). No fue alcance de este trabajo realizar un estudio de respuesta a frecuencia, por lo que **se recomienda** para futuras investigaciones realizarlo que incluya un comparativo entre varios materiales, pues si se incluyera este estudio de frecuencias podría incluirse al modelo sistémico propuesto en este trabajo este factor o variable de tal forma que el alcance de este modelo se ampliaría a mas aplicaciones que las consideradas en este trabajo (medición de profundidades de pozos, cuencas, etc.) en donde se incluiría la regulación de esta variable.
- f) Un sistema cibernético de primer nivel corresponde a sistemas cerrados que son susceptibles de ser controlados, y un sistema cibernético de segundo nivel es de sistemas abiertos que no son controlables e incluyen innovación, validación, adaptación, e interpretación. El alcance de este estudio es solamente científico y no tecnológico y por ello mismo, el control sistémico cibernético desarrollado en

este estudio no fue validado a nivel tecnológico y es por ello que no se pueden mencionar las limitaciones tecnológicas del control, y por lo tanto es importante mencionar que dentro del alcance de este trabajo no está contemplado el desarrollo del modelo sistémico cibernético de segundo nivel, dejándose como **recomendación** a futuro el desarrollo a segundo nivel.

- g) **Se recomienda** a futuro realizar el desarrollo tecnológico, basado en el desarrollo científico realizado en este trabajo de tesis, para las aplicaciones siguientes: Sensor acústicos para medición de profundidades de pozos, cuencas de agua, ríos subterráneos, etc.
- h) **Se recomienda** a futuro realizar el desarrollo tecnológico, basado en el desarrollo científico realizado en este trabajo de tesis, para las aplicaciones siguientes: Control sistémico para la automatización del movimiento de ascenso y descenso de aviones no tripulados controlados a control remoto para tareas como monitoreo de sembradíos de marihuana, toma de fotografía aérea, monitoreo de tráfico vial, mediciones atmosféricas y de contaminación, etc.
- i) **Se recomienda** a futuro realizar el desarrollo tecnológico, basado en el desarrollo científico realizado en este trabajo de tesis, para las aplicaciones siguientes: Utilización de sensores acústicos para la medición de grietas sísmicas para ahorrar dinero en los costos de perforación para realizar dicha medición.

**REFERENCIAS
BIBLIOGRÁFICAS**

- 1 Ackoff, R. L., (1971), "Towards a Systems of Systems Concepts" en *Management Science*. Vol. 17, No. 11. July 1971.
- 2 Ackoff, R. L. y F.E. Emery, (1972), *On Purposeful Systems*. 1st edition, N.Y., Aldine – Atherton.
- 3 APM automation solutions, (2014), "video 57825-66812.html" en *pdf.directindustry.es*. [En línea] disponible en: <http://pdf.directindustry.es/pdf-en/apm-automation-solutions-ltd/3dlevelsscanner-s-m-mv/57825-66812.html> [Accesado el día 06 de Septiembre del año 2014].
- 4 Ashby, W.R., (1958), "requisite variety and its implications for the control of complex Systems" en *Cybernetica*. Vol. 1. pp. 83-99.
- 5 Ashby, W.R., (1957), *An introduction to Cybernetics*. Segunda Impresión, London. Chapman & Hall LTD.
- 6 Ballato, A. (1996),. "Piezoelectricity: History and New Thrusts" en *Proc Ultrasonics Symposium*. Vol. 1:575-583.
- 7 Beer, S., (1959), *Cybernetics and Management*. 2nd. Edition, Wiley. N.Y.
- 8 Bernal, C.A (2006), *Metodología de la Investigación*, 2da. Edición, Colombia, Pearson Education.
- 9 Bershada, N.J., Celka, P. y J. Vesin, (1999), "Stochastic analysis of gradient adaptive Identification of nonlinear systems with memory for Gaussian data and noisy input and Output measurements" en *IEEE Transactions on Signal Processing*. Vol. 47, No. 3. 1999, pp.675-689.
- 10 Bertalanffy, V.L. , (1989), *Teoría General de los Sistemas: Fundamentos, desarrollo, aplicaciones*. Séptima impresión, Traducción de Juan Almela, México. Fondo de Cultura Económica.
- 11 Bertoglio, O.J.; (1993), *Introducción a la Teoría General de Sistemas*. Octava Impresión, México. Limusa.
- 12 Braun et al (2003) *Data Analysis and Graphics Using R*, 2nd edition, Cambridge, Cambridge University Press.
- 13 Carreño, R., M. Patiño, y J. Patiño, (2013), "Sliding modes control applied to a mini aircraft pitch position model" en *Computación y sistemas*, Vol.18, no. 2, 2014, pp. 409-416.
- 14 Carreño, R, M. Patiño, J.J. Medel y J. Patiño "Parameters Estimation for sliding mode control into Acoustic Sensor" en *Jokul*, Vol. 64, No.2, Feb. 2014, pp. 25-30.
- 15 Cazares; L. et al (2004), *Técnicas actuales de investigación documental*. 3a. ed., México, Editorial Trillas.
- 16 Chafaa, K., Ghanai, M. y K. Benmahammed, (2007), "Fuzzy model lingusing Kalman filter" en *Control Theory & Applications*. Vol 1, no. 1. pp. 58-64.
- 17 Chang, S.L. y T. Ogunfunmi, (2003), "Stochastic gradient based third-order Volterra system identification by using nonlinear Wiener adaptive algorithm" en *IEE Proceedings of the Vision, Image and Signal Processing*. Vol. 150 No. 2. pp. 90-98.
- 18 Checkland, P.B., (1981), *Systems Thinking, Systems Practice*. N.Y .Wiley.
- 19 Chen-Sen, O. et al, (2013), "Recursive SVD-Based Least Squares Algorithm with Forgetting Factors for Neuro-fuzzy Modeling" en *Proceeding of the 14th International Conference on Software Engineering, Artificial*

-
- Intelligence, Networking and Parallel/Distributed Computing*. pp.575-580.
- 20 Chen; L. y Y. Kim-Hui, (2005), "A soft double regularization approach to parametric blindimage deconvolution" en *IEEE Transactions on Image Processing*. Vol. 14 No. 5, pp.624-633.
 - 21 Dai, H. et al, (1995), "Iterative instrumental variable method for robust identification of systems" en *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. Vol. 42 No. 5. pp. 480-486.
 - 22 Depeyrot, M., (1970), "Linear System Identification Using Real-Time Deconvolution" en *IEEE Transactions on Computers*. Vol. 19, No. 12. pp. 1139-1145.
 - 23 Ding, F., Liu, G. y X.P. Liu, (2010), "Partially Coupled Stochastic Gradient Identification Methods for Non-Uniformly Sampled Systems en *IEEE Transactions on Automatic Control*. Vol. 55, No. 8. pp. 1976-1981.
 - 24 Erdogmus, D. et al, (2004), "Adaptive blind deconvolution of linear channels using Renyi's entropy with Parzen window estimation" en *IEEE Transactions on Signal Processing*. Vol. 52, No. 6., pp. 1489-1498.
 - 25 Hernandez, R. et al, (1995) *Metodología de la investigación*. Ed. 3, México, Mc Graw Hill.
 - 26 Jung, H. et al, (1994), "Defuzzification method for multi-shaped output fuzzy sets" en *Electronics Letters*. Vol. 30, No. 9. PP.740-742.
 - 27 K. Popper, (1962), *La lógica de la investigación científica*, 1ra. Ed., Hutchinson, Editorial Tecnos.
 - 28 Kosinski, W., (2007), "Evolutionary algorithm determining de-fuzzyfication operators" en *Engineering Applications of Artificial Intelligence*. Vol.20, No. 5. pp. 619-627.
 - 29 Liu, F., J. Wang y Y. Peng, (2008) "A New Approach to Parameters Identification of Fuzzy Regression Models" en *Proceedings of the Fifth International Conference on Fuzzy Systems and Knowledge Discovery*. Vol. 1.,pp.127-131.
 - 30 Mastorocostas, P. y J. Theocharis, (1997) "Orthogonal least squares fuzzy modeling of nonlinear dynamical systems" en *Proceedings of the Sixth IEEE International Conference on Fuzzy Systems*. Vol 2. pp.1147-1152.
 - 31 Ma, M., Kandel, A. y M. Friedman, (2000) "A new approach for defuzzification" en *Fuzzy Sets and Systems*. Vol. 111 No. 3. pp. 351-356.
 - 32 Medel, J.J. y C.V. García, (2010), "Estimación de parámetros usando la deconvolución y La pseudoinversa: descripción e implementación recursiva" en *Rev. Mex. Fis.* Vol. 56 No. 1. pp. 54-60.
 - 33 Medel, J.J. y M. T. Zagaceta, (2010) "Estimación-identificación como filtro digital integrado: descripción e implementación recursiva" en *Rev. Mex. Fis.* Vol. 56, No. 1.pp. 1-8.
 - 34 Meng-Xin, L., Cheng-dong, W. y J. Feng, (2006), "A Vision-Based Inspection System using Fuzzy Rough Neural Network Method" en *Proceeding of the International Conference on Machine Learning and Cybernetics*. pp. 3228-3232.
 - 35 Nguyen, H. T. et al, (2002), *A first course in Fuzzy and neural Control.*, California, Chapman and Hall/CRC.
 - 36 Ogata, K., (2010), *Ingeniería de Control*. Ed. 1, Madrid, Pearson Education.
 - 37 Oussalah, M., (2002), "On the compatibility between defuzzification and fuzzy Arithmetic operations" en *Fuzzy Sets and Systems*. Vol. 128, No. 2, pp. 247-260.
 - 38 Paleologu, C. et al, (2008), "A Robust Variable Forgetting Factor Recursive Least-Squares Algorithm for System

- Identification”, en *IEEE Signal Processing Letters*. Vol. 15. pp.597-600.
- 39 Recuero Lopez, M., (2000), *Ingeniería Acústica*. 1ra. Ed., Madrid, Paraninfo.
- 40 Roychowdhury, S. y W. Pedrycz, (2001), “A survey of defuzzification strategies” en *Int. J. Intell. Syst.* Vol.1., pp. 679–695.
- 41 Runkler, T. A., (1996), “Extended de-fuzzification methods and their properties” en *Proceedings of the Fifth IEEE International Conference on Fuzzy Systems*. Vol.1. pp.694-700.
- 42 Saletic, D. y U. Popovic, (2006), “On Possible Constraints in Applications of Basic De-fuzzification Techniques” en *Proceeding of the 8th Seminar on Neural Network Applications in Electrical Engineering. NEUREL*. Vol.1, pp.225-230.
- 43 Schweyer, M. et al, (1997) “A Novel Monolithic Piezoelectric Sensor” en *Proc Ultrasonics Symposium*. Vol. 1, pp. 371-374.
- 44 Senge, P., (1999) *Contribución a la crítica de la educación*, 2da. Ed., Bloomington, Palibrio.
- 45 Sivanandam, S. N., Deepa, S. N. y S. Sumathi, (2007), *Introduction to Fuzzy Logic using MATLAB*. 2nd edition, California, Springer.
- 46 T. Jiang, y Y. Li, (1996), “Generalized de-fuzzification strategies and their parameter learning procedures” en *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*. Vol. 4, No. 1.pp.64-71.
- 47 Urbanski, K. y J. Wasowski, (2008), *Fuzzy measurement theory. Measurements*, Vol. 41, No. 4, pp. 391-402.
- 48 Utkin, V. I. (1978), *Sliding modes and their application in variable Structure Systems*. 1st edition, Moscow, MIR publishers.
- 49 Van Gigch J. (2011). *Teoría General de Sistemas*, 1ra. Re-impresión, México.
- 50 Wei, C. L., et al, (2011), “Universal predictive Kalman filter-based fault estimator and tracker for sampled-data non-linear time-varying systems” en *Control Theory & Applications*. Vol. 5, No. 1., pp. 203-220.
- 51 Wenglor, (2014), “Catálogo de sensores ultrasónicos” en www.wenglor.com. [en línea] disponible en: <https://www.wenglor.com/index.php?id=645&L=0> [Accesado el día 06 de Septiembre del año 2014].
- 52 Wiener, N. (1988), “The Human Use of Human Beings”, Houghton Mifflin, Boston, 1950/1954; second edition. New York: Da Capo.
- 53 Wiener, Norbert (1948), *Cybernetics, or Control and Communication in the Animal and the Machine*. 1st edition, Cambridge, MA, MIT Press.
- 54 Wohltjen, H. et al, (1997), “Acoustic Wave Sensor-Theory, Design, and Physico-Chemical Applications” en *Academic Press*. Vol. 39, pp. 39.
- 55 Yinao, W. et al, (2011), “The numerical simulation of improving parameter estimation by instrumental variable method” en *Proceeding of the IEEE International Conference Grey Systems and Intelligent Services. GSIS*. Vol.1, No.1, pp.811-815.

GLOSARIO

La descripción de los términos que se proporciona en este glosario, corresponde al significado dado en ésta investigación. Las explicaciones pueden no concordar con las definiciones encontradas en un diccionario de uso común.

Adaptación de variables o control adaptativo. El termino adaptativo significa cambiar el comportamiento conforme a nuevas circunstancias Un control adaptativo es un tipo especial de control no lineal en el que un estado del proceso puede ser separado en dos escalas de tiempo que evolucionan a diferente velocidad.

Algoritmo. Un procedimiento por pasos, que en un determinado número de ellos produce el óptimo.

Análisis, método analítico. El método de investigación reduccionista por el cual se desintegra un sistema complejo en sus componentes y se estudia por separado.

Ángulo de ataque o de cabeceo (θ). Es el ángulo que hace el eje longitudinal del avión (el que atraviesa a lo largo del fuselaje o cuerpo del avión) con un plano terrestre horizontal o predefinido de referencia, sirve para medir cuanto está ascendiendo o descendiendo el avión.

Ángulo crítico de cabeceo. Es el máximo de cabeceo después del cual el avión se desplomará o precipitará perdiendo el control.

Cabeceo de un avión. En un término usado en aeronáutica para referirse al movimiento longitudinal del avión. El movimiento longitudinal del avión es el ascenso o descenso del avión.

Complejidad. La intrincación de intra e interrelaciones entre componentes de sistemas.

Comportamiento dinámico. Es cuando se grafica y observa el comportamiento de alguna variable a través del tiempo.

Diferencias finitas. Es un método que consiste en una aproximación de las derivadas parciales por expresiones algebraicas con los valores de la variable dependiente en un limitado numero de puntos seleccionados, por lo que la ecuación diferencial parcial que describe el problema es reemplazable por un numero finito de ecuaciones algebraicas de la forma $f(x+b)-f(x+a)$.

Efecto doppler. Es el aparente cambio de frecuencia del sonido, debido al movimiento de la fuente con respecto al observador.

Endógena. Que es o se origina del interior del mismo sistema.

Energía.La energía es la capacidad de los cuerpos o conjunto de éstos para efectuar un trabajo. Todo cuerpo material que pasa de un estado a otro produce fenómenos físicos que no son otra cosa que manifestaciones de alguna transformación de la energía.

Entropía. Un término de termodinámica, que mide el estado de desorden de un sistema.

Entropía estocástica.Cuando es medida tomando muestras representativas de forma aleatoria.

Error estacionario. Error del control que queda una vez que la señal de salida se estabiliza en un valor.

Estimación de parámetros. Normalmente en el ámbito del control de variables de estado, se refiere a crear la forma de monitorear o medir una variable de estado que es observable pero que no se cuenta con su valor o medición. Dicho en términos más técnicos, se define como una función de

los resultados de una muestra que produce un valor, llamado estimador, el valor puede ser el parámetro de un proceso o sistema. Un estimador ideal sería no sesgado y con varianza mínima.

Estocástica: Concepto matemático que sirve para caracterizar una sucesión de variables aleatorias que evolucionan en función de otra variable, esta evolución ocurre generalmente en el tiempo.

Error estocástico del proceso: Término usado para referirse a la evolución del error que sufren las variables aleatorias en un proceso estocástico (ver definición de estocástica).

Intervalo de recurrencia. Tiempo medio que transcurre entre eventos en un determinado lugar.

Lazo abierto. Sistema o proceso que no cuenta con una retroalimentación para medir el comportamiento de la variable que se desea controlar, por lo que la única forma de controlarla es de forma manual con un operador.

Lazo cerrado. Sistema o proceso que tiene una retroalimentación o medición del comportamiento de la variable a controlar para efectos de mantenerla en forma automática a un valor o referencia deseada.

Matriz Pseudoinversa. Si A es una matriz $m \times n$, se llama pseudoinversa de A a la matriz $A^+ = (A^T A)^{-1} A^T$ cuando $m \geq n$ y $\text{rango}(A) = n$ ó $A^+ = A^T (A A^T)^{-1}$ cuando $m \leq n$ y $\text{rango}(A) = m$. También se suele llamar inversa generalizada de Moore-Penrose.

Método científico. El enfoque permitido en las ciencias físicas y otras relacionadas, por el cual se postulan, validan y generalizan hipótesis en leyes. El método científico y el paradigma de ciencia deben modificarse, para acomodarlos a las necesidades especiales del dominio de las ciencias sociales.

Método. Conjunto de procedimiento que valiéndose de los instrumentos o las técnicas necesarias, examina y soluciona un problema o conjunto de problemas de investigación.

Metodología. a) La metodología como parte de la lógica que se ocupa del estudio de los métodos, es el “estudio (descripción, explicación y justificación) de los métodos de investigación en sí”. b) La metodología entendida como el conjunto de aspectos operativos del proceso investigativos.

Modelo de control cibernético o ley de control. Un sistema de control en donde las desviaciones de los estándares se miden de manera tal que se tomen medidas correctivas para mantener el sistema en equilibrio.

Modelos. “Subrogados” del mundo real, que nos ayudan a comprender cómo funcionan. Los modelos de decisión se utilizan para convertir entradas en salidas y elegir las alternativas que satisfacen los objetivos del autor de decisiones.

Modelos recursivos. Aquellos en los que, ordenadas convenientemente las ecuaciones del modelo, la estimación de cada variable endógena permite contar, a su vez, con todas las variables necesarias para la estimación de la siguiente endógena y así sucesivamente.

Modo deslizante (MD). Algoritmo o técnica de control basado en el diseño de dos superficies en donde la variable a controlar es forzada a seguir el valor deseado en los puntos de intersección de

la superficies. Se caracteriza por ser robusto aun en sistema no lineales y por su capacidad por desacoplar a las perturbaciones del sistema o proceso.

Morfología. Forma y estructura de un organismo o sistema.

NDT (prueba no destructiva). Por sus siglas en ingles non destructive test que significa prueba no destructiva, son pruebas de inspección de fallas en materiales pero sin destruir, o dañar ninguna de las propiedades físicas o químicas del material o su aparienciavisual, inclusive en la mayoría de los casos el material se puede probar (inspeccionar) sin necesidad de extraerlo del proceso o ensamble en donde ya se encuentra, de ser el caso. Por ejemplo, una inspección podría ser verificar si el material tiene alguna fisura o falla interna o no visible aunque sea externa.

Objetivos alcanzables. Objetivos que pueden cumplirse en el futuro previsible. Técnica de creatividad de libre asociación diseñada para maximizar el flujo de ideas dentro de un grupo, mediante la eliminación de apreciación crítica por parte de las sugerencias de los miembros.

Objetivos inmediatos. Aquellos objetivos que la organización puede llevar a cabo en el presente sin obtener más recursos o desarrollar investigación adicional.

Optimización. El valor máximo de la función objetivo, que puede lograrse en un sistema cerrado – claramente un subóptimo, cuando el sistema que se evalúa es un subsistema abierto, colocado en el contexto de un sistema mayor.

PID. Control Proporcional, Integral, Derivativo.

Paradigma de ciencia. El proceso metodológico o procedimiento por el cual, se aplica el método científico a los dominios de las ciencias exactas.

Paradigma. Un proceso, un procedimiento (no definido necesariamente en forma de pasos secuenciales), que puede utilizarse en forma repetida para abordar un tipo específico de problema. Ejemplos: el *paradigma de ciencia*, que se deriva del método científico; el *paradigma de sistemas*, o proceso de diseño de sistemas, que abarca el enfoque de sistemas

Piezoeléctrico. Cristal natural o sintético que carece de centro de simetría, este genera un voltaje eléctrico cuando es sometido a una deformación o viceversa, se deforma cuando se le somete a un voltaje eléctrico.

Predicción. Análisis racional de lo que va a suceder.

Prospectiva. La actitud de la mente hacia la problemática del porvenir, es un acto imaginativo y de creación, luego una toma de conciencia y una reflexión sobre el contexto actual; y por último un proceso de articulación y convergencias de las expectativas. Es imprescindible destacar su carácter creativo.

Retroalimentación. La característica de regulación por la cual se recicla una porción de la salida – generalmente la diferencia entre los resultados real y deseado – a la entrada, a fin de mantener el sistema entre los umbrales del equilibrio.

Respuesta en señal. Comportamiento dinámico de un sistema en el cual se le introduce una señal que puede ser de tipo escalón, impulso, rampa, etc., la cual simula una perturbación, esto con el fin

de conocer el comportamiento del sistema ante una perturbación externa y evaluar el control aplicado o a aplicar.

Robustez. Característica de un control que mide el grado de afectación del sistema ante perturbaciones. Si el sistema no se altera o casi no se altera ante una perturbación externa entonces es un sistema robusto y entre menos se afecte por la perturbación entonces será más robusto.

Series de tiempo. Se llama Series de Tiempo a un conjunto de observaciones y mediciones sobre valores que toma una variable (cuantitativa) de cierto fenómeno o experimento registrado secuencialmente en el tiempo.

Sistema “rígido”. Opuesto a sistema “flexible”. Un sistema generalmente desprovisto de propiedades biológicas, y relacionado al dominio de las ciencias físicas.

Sistemas. Ensamblajes reales o ideados o conjuntos de elementos relacionados “que se han identificado como de interés especial”.

Suboptimización. En el caso de sistemas abiertos complejos, suboptimización concertada (casi óptima), puede ser decididamente mejor que optimizaciones totales.

Teoría del caos. Es la denominación popular de la rama de las matemáticas y la física que trata ciertos tipos de comportamientos impredecibles de los sistemas dinámicos. Los sistemas dinámicos se pueden clasificar básicamente en: Estables, Inestables y Caóticos. Un sistema estable tiende a lo largo del tiempo a un punto, u órbita, según su dimensión (atractor o sumidero). Un sistema inestable se escapa de los atractores. Y un sistema caótico manifiesta los dos comportamientos.

Trans-disciplinarietà. Conocimiento que surge de un contexto de aplicación concreto, con sus propias estructuras teóricas características, método de investigación y modos de práctica, pero que puede no estar localizable en el mapa disciplinar prevaleciente.

Transferencia de tecnología. La transmisión de conocimiento desde las universidades a la industria. El término transferencia de tecnología también se utiliza para reflejar la naturaleza interactiva de este proceso.

Variables observables. Variables de estado que mediante un estudio de observabilidad se determina que se le puede diseñar un estimador para poder ser monitoreada o medida.

ÍNDICE DE FIGURAS Y TABLAS

ÍNDICE DE FIGURAS

Capítulo	Figura	Nombre	Pág.
1	1	Perfiles de desfogue o llenado de los silos.	3
2	2.1	Método basado en el método científico con enfoque sistémico Trans-disciplinario.	17
	2.2	La información se opone a las tendencias de un sistema hacia la desorganización y entropía.	19
	2.3	Esquema condensado de los pasos de la metodología.	
	2.4	Estructura a bloques del modelo sistémico cibernético.	
	2.5	La información se opone a las tendencias de un sistema hacia la desorganización y entropía.	
	2.6	Como las decisiones de selección sucesivas reducen la incertidumbre.	20
	2.4	Respuestas a una entrada simple: a) donde b) muestra la respuesta con retraso, c) respuesta con rezago y d) respuesta con retraso y rezago.	21
	2.5	El control consiste en mantener al sistema dentro de los límites de la Meseta Homeoquinética.	21
	2.6	Requisitos cubiertos para los valores adquiridos por la variable principal en un tiempo infinitesimal de la ley de Ashby, en función de la ecuación de la Ley de Control.	22
	2.7	El ciclo básico de control.	22
	2.8	El ciclo de control básico adaptado al diseño del modelo sistémico cibernético.	23
	2.9	Oscilaciones propias de un fluido contenido en un cilindro.	24
	2.10	Esquema a bloques de decisiones para el diseño y simulaciones del modelo cibernético de primer nivel.	34
3	3.1	Cubo de dimensiones y variables para el Diseño del Sistema Cibernético.	54
	3.2	Relación de variables para el diseño del modelo del Sistema Cibernético.	55

ÍNDICE DE FIGURAS Y TABLAS

3.3	Concepto del modelo para el control del 1% de eco al 20%.	56
3.4	Modelo de control automático propuesto.	59
3.5	Esquema a bloques del ensamble utilizado para la obtención de las mediciones para obtener el modelo matemático a controlar.	61
3.6	Sensor Wenglor UMS603U035 [51].	63
3.7	Circuito equivalente del piezoeléctrico (PZT).	63
3.8	Modelo del piezoeléctrico en términos de Laplace.	64
3.9	Esquema de un sistema típico de lazo cerrado sin control.	64
3.10	Sistema de lazo cerrado del modelo sin control.	66
3.11	Diagrama de bloques del sistema de control como descriptor de un sistema.	66
3.12	Diagrama de lazo abierto del modelo del avión.	67
3.13	Diagrama a bloques de la retroalimentación de estados del modelo sistémico de segundo orden.	68
3.14	Señal temporal del piezoeléctrico tipo caja negra (azul) y de su seguidor (rojo).	71
3.15	Proceso del error estocástico.	72
3.16	Logaritmo de la entropía de la señal del error.	73
3.17	Modelo de lazo abierto del cabeceo (pitch position) del avión.	75
3.18	Variable de estado $X_1(t)$ en lazo abierto en el tiempo.	76
3.19	Variable de estado $X_2(t)$ en lazo abierto a través del tiempo.	78
3.20	Variable de estado $X_3(t)$ en Variable de lazo abierto	80
3.21	Variable de estado $X_4(t)$ en lazo abierto a través del tiempo.	82
3.22	Señal de salida θ medida en el sistema cibernético del avión pero sin aplicar el modo deslizante.	83
3.23	Señal de salida θ usando la ley de control de retroalimentación por modos deslizantes.	84
3.24	Ley de control por modos deslizantes.	85
3.25	Ley de control por modos deslizantes aplicada a la variable de estado $X_1(t)$ en lazo cerrado.	86
3.26	Ley de control por modos deslizantes aplicada a la variable de estado $X_2(t)$ en lazo cerrado.	
3.27	Ley de control por modos deslizantes aplicado a la variable de estado $X_3(t)$ en lazo cerrado.	

ÍNDICE DE FIGURAS Y TABLAS

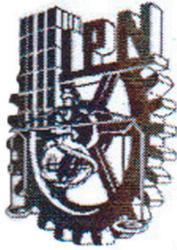
	3.28	Ley de control por modos deslizantes aplicada a la variable de estado $X_4(t)$ en lazo cerrado.	
	3.29	Esquema a bloques de decisiones del desarrollo y simulaciones del modelo cibernético de primer nivel.	

INDICE DE TABLAS

Capítulo	Tabla	Nombre	Pág.
1	1	Marcas de sensores acústicos industriales.	2
2	2.1	Compendio del Marco Teórico	19
3	3.1	Operacionalización de variables	58
	3.2	Ejemplos de artículos que demuestran la robustez y desacoplamiento del modo deslizante.	60
	3.3	Valores del circuito equivalente RLC del piezoeléctrico.	60
	3.4	Coeficientes del modelo del cabeceo.	

ANEXOS

*DIFFUSIÓN
ACADÉMICA Y CIENTÍFICA*



INSTITUTO POLITECNICO NACIONAL
ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA
SECCIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN

México D.F. a 19 de Septiembre de 2014.

DIRECCIÓN DE POSGRADO
SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO

DICTAMEN DE COMITÉ DOCTORAL

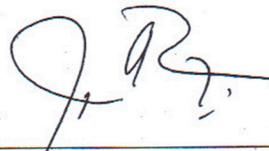
Por este conducto se comunica el Dictamen del Comité Doctoral del artículo **“SLIDING MODES CONTROL APPLIED TO A MINI AIRCRAFT PITCH POSITION MODEL”** publicado en Computación y Sistemas Vol. 18 No. 2, pp. 409-416 (2014), del cual el M. en C. **Ricardo Carreño Aguilera**, alumno del Programa de Doctorado en Ingeniería de Sistemas con número de registro **B120873**, adscrito a la sección de Estudios de Posgrado e Investigación de la Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica Unidad Zacatenco, es Coautor y es acorde al desarrollo de la investigación doctoral bajo la dirección de los **Doctores Julián Patiño Ortiz** y **Miguel Patiño Ortiz**, y cuyo título es: **“Sistema cibernético para el manejo de respuesta en señal de sensores acústicos”**. Por lo que, este comité certifica que dicho artículo tiene el nivel requerido por el Instituto Politécnico Nacional como requisito para la obtención del grado de Doctor en Ingeniería de Sistemas.

Sin otro particular por el momento, reciban un cordial saludo.

COMITÉ DOCTORAL



Dr. Miguel Patiño Ortiz
Profesor SEPI ESIME Z.



Dr. Jorge A. Rojas Ramírez
Profesor SEPI ESIME Z.



Dr. Miguel Angel Martínez Cruz
Profesor SEPI ESIME Z.



Dr. Julián Patiño Ortiz
Profesor SEPI ESIME Z.



Dra. Claudia Hernández Aguilar
Coordinador del Programa de Posgrado en
Ingeniería de Sistemas

Computación y Sistemas

AN INTERNATIONAL JOURNAL OF COMPUTING SCIENCE AND APPLICATIONS

ISSN 1405-5546

Apartado Postal 75-546
C.P. 07738 México, D.F.
Tel (+52)-55-5729-6000
Ext. 56518, 56643
Fax Ext. 56607
computacion-y-sistemas@cic.ipn.mx

<http://cys.cic.ipn.mx>

Mexico City, September 12, 2013

Dear Ricardo Carreño Aguilera (corresponding author),
Miguel Patiño Ortiz, Julián Patiño Ortiz

We are pleased to inform you that after a thorough reviewing
process your paper

*"Sliding modes control applied to a mini aircraft pitch position
model"*

has been accepted for publication in the journal
Computación y Sistemas. Results of the reviewing process
were sent to you by email.

It is scheduled tentatively to be published in vol. 18, 2014 of
the journal.

Each author will receive a printed copy of the journal. Please
communicate us the postal address at which you would like
to receive these copies, preferably one address for all authors.

Sincerely,



Prof. Dr. Grigori Sidorov
Editor-in-Chief

Sliding Mode Control Applied to a Mini-Aircraft Pitch Position Model

Ricardo Carreño Aguilera, Miguel Patiño Ortiz, and Julián Patiño Ortiz

ESIME, Instituto Politécnico Nacional, México D.F.,
Mexico

rcrc2013@outlook.com, {mpatino2002, jpatinoo}@ipn.mx

Abstract. Normally, mini-aircraft must be able to perform tasks such as aerial photography, aerial surveillance, remote fire and pollution sensing, disaster areas, road traffic and security monitoring, among others, without stability problems in the presence of many bounded perturbations. The dynamical model is affected by blast perturbations. Based on this, it is possible to design, evaluate and compare the real result with respect to pitch control law based on reference trajectory in the presence of external disturbances (blasts) or changes in the aircraft controller model. The model has non-linear properties but, with soft perturbations through the aircraft trajectory, allows a linear description without losing its essential properties. The Laplace description is a transfer function that works to develop the state space, with unknown invariant parameters using a wind tunnel. Control law is based on a feedback sliding mode with decoupled disturbances, and the output result is compared with the real pitch position measured in the real system. The control law applied to the system has a high convergence performance.

Keywords. Sliding modes, integral and proportional control, mini-aircraft models.

Control de posición de cabeceo por modos deslizantes para un avión pequeño

Resumen. Comúnmente un avión pequeño debe ser capaz de realizar tareas tales como la de fotografía aérea, vigilancia, detección de incendios a distancia, detectar los niveles de contaminación, monitorear las zonas de desastre, ver el tránsito y brindar seguridad a través de la video-vigilancia, entre otras aplicaciones considerando que no tiene problemas de estabilidad en presencia de perturbaciones acotadas. El modelo dinámico de esa aeronave se ve afectado por las perturbaciones, y que con base en ellas fue posible diseñar un controlador por modos deslizantes. Aplicable a los diferentes movimientos longitudinales

que hace hacia arriba o hacia abajo con respecto a la trayectoria de referencia, el modelo de avión tiene propiedades no lineales; pero con perturbaciones suaves a través de su trayectoria; lo que permite una descripción lineal sin perder muchas de sus propiedades esenciales. La descripción de Laplace permitió obtener su función de transferencia y así desarrollar el espacio de estados, con parámetros invariantes y desconocidos. Los cuales fueron descritos utilizando un túnel de viento. La ley de control se basó en la técnica de modos deslizantes con perturbaciones desacopladas. Sus resultados se compararon con el movimiento de cabeceo medido dentro de la aeronave. La ley de control aplicada al sistema real tuvo un desempeño con alta convergencia.

Palabras clave. Modos deslizantes, control proporcional e integral, modelo para aviones pequeños.

1 Introduction

Throughout aviation history, aircrafts were statically modeled for design proposes, specifically in traditional aeronautical industry. Currently it has become necessary to satisfy features such as aircraft dynamic responses and tracking trajectories. The dynamic airplane behavior concepts were introduced in [1-6]. Before applying any control algorithm it was necessary to satisfy controllable and observable conditions in agreement with [2] and [7-11]. The dynamic responses to input variations are directed to the control mechanism adjusting its trajectories to a predefined objective [12]. A real flight design control system has great problems mainly in the real-time action control surfaces, whereas the time-delay control algorithm and measurement systems (known as avionics) impact the effectiveness and general performance [13]. This paper does not

consider real applications, only the feedback law control to the reference trajectory based on a specific model [14-16]. In this sense, the common proportional integral derivative (PID) condition control law adjusts the aerodynamics control surfaces to a specific trajectory [15].

The motion force equation is based on the second Newton's Law, where the atmospheric flight force vector consists of the forces caused by the aerodynamic aircraft reactions and weights [3-6]. This equation is:

$$F_w = AC_w + mg + mgC_w \quad (1)$$

where A, C_w are forces caused by aircraft aerodynamic reactions elements and Mg stays for plane weights. The force components are given by:

$$F_{x_w} = m\dot{v}, \quad F_{y_w} = mVr_w, \quad F_{z_w} = -mVq_w \quad (2)$$

1.1 Longitudinal Non-linear Equations

From (1) and (2), the longitudinal force applied to aircraft [10] and [11] has the form

$$\begin{aligned} Tx_w - D - mg\sin(\theta_w) &= m\dot{v}, \\ Ty_w - C - mg\cos(\theta_w)\sin(\phi_w) &= mVr_w, \\ Tz_w - L - mg\cos(\theta_w)\cos(\phi_w) &= -mVq_w. \end{aligned} \quad (3)$$

where in agreement with [3-6] Tx_w, Ty_w, Tz_w are traction or propulsion force components, and D, L, C are Drag, Lift and Wind forces.

2 Development

Given the aircraft non-linear equation complexity, it is necessary to find a linear mathematical model whose structure is easy to handle and which approaches the performance of real movements, considering small perturbations around an operating point [12-16]. The Taylor linearization method is considered and the results are shown in the following equations:

$$\begin{aligned} \Delta T \cos(\alpha T) - \Delta \alpha T \sin(\alpha T) - \Delta D \\ - mg \cos(\gamma_e \Delta \gamma) &= m\dot{v}, \\ \Delta T \cos(\alpha T) - F_{y_w} &= mVr_w, \\ F_{z_w} &= -mVq_w, \\ \Delta T \cos(\alpha T) - \Delta \alpha T \sin(\alpha T) - \Delta D - mg \cos(\gamma_e), \\ \Delta \gamma &= m\dot{v}, \\ \Delta T \sin(\alpha T) \Delta \alpha T e \cos(\alpha T) + \Delta L + mg \sin(\gamma_e), \\ \Delta \gamma &= m\dot{v} e \gamma, \\ \Delta M &= I_y \dot{q}. \end{aligned} \quad (4)$$

Once the aircraft system was modeled, all perturbations $\Delta V, \Delta \alpha, Dp$, etc. are small, and their squares and products can be ignored; with small pitch movements $\cos(\Delta \gamma) \approx 1, \sin(\Delta \gamma) \approx \Delta \gamma$ and A as constant for uniform velocity, where

$$I_y = (x_2 + z_2)dm,$$

$$\dot{q} = \dot{\gamma} + \dot{\alpha}.$$

Using Taylor linearization with respect to (4) the following linear longitudinal descriptions are given in the following equations:

$$\begin{aligned} (Tvcos(\alpha_T) - Dv)\Delta V \\ - (T\sin(\alpha_T) + D\alpha)\Delta \alpha \\ - mg\cos(\gamma_e)\Delta \gamma \\ + (T_z\cos(\alpha_T) - D_z)\Delta z_E \\ + \Delta T_c\cos(\alpha_T) - AD_c \\ = m\dot{V} \\ (T\sin\alpha_T + L_v)\Delta V \\ + (T\cos(\alpha_T) + L_\alpha)\Delta \alpha \\ + (L_q - mVe)q \\ + mg\sin(\gamma_e)\Delta \gamma \\ + (T_z\sin(\alpha_T) + L_z)\Delta z_E \\ + \Delta T_c\sin(\alpha_T) + \Delta Lc \\ = (mVe + L_{\dot{\alpha}})\dot{\alpha} \\ M_V \Delta V + M_\alpha \Delta \alpha + M_q q + M_z \Delta z_E \\ + \Delta Mc = I_y \dot{q} \end{aligned} \quad (5)$$

Minimizing (5) in agreement with [17], the form (6) is obtained:

$$\begin{aligned} (\hat{G}TV - 2\mu s)\Delta V + (CLE - \hat{G}D\alpha)\Delta \alpha - Cwe\Delta \theta = 0, \\ -2Cwe\Delta V - (GL\alpha + CDe + 2\mu s)\Delta \alpha + 2\mu q = \hat{G}L\delta\Delta \delta, \\ m\alpha\Delta \alpha + (\hat{L}_y s - \hat{G}mq)q = \hat{G}L\delta\Delta \delta, \\ q - s\Delta \theta = 0, \end{aligned} \quad (6)$$

where α is replaced by $\Delta \alpha = -(Cm\delta / (Cm\alpha))\Delta \delta e$.

The transfer function with respect to (6) in the symbolic form is described in (7).

$$Ga(s) = \frac{M(s)}{\delta(s)} = \frac{b_0s^2 + b_1s + b_2}{a_0s^2 + a_1s + a_2} \quad (7)$$

The five coefficients have the nominal values shown in Table 1.

Table 1. Experimental results

Coefficient	Wind tunnel experimental results
b_0	2.628238218 (dimensionless)
b_1	4927.325304 (N/m.s.) ⁻¹
b_2	1125059746.00 (N/m.s.) ⁻²
a_0	1 (dimensionless)
a_1	2835.2929(N/m.s.) ⁻¹
a_2	417643437.5 (N/m.s.) ⁻²

Moreover, according to [7] and [14-18], it was proposed that the model represents the wind blast, where r affects the system that has a minimal form (8) described illustratively in Fig. 1:

$$Ga(s) = \frac{\theta(s)}{\delta(s) - r(s)} = \frac{1}{s^2 + a_1s + a_2}. \quad (8)$$

In (8), $r(s)$ is the wind blast, $\theta(s)$ is the pitch angle, $\delta(s)$ is the elevator angle. The transfer function (7) in the state space considering [8], [18-23] has the form:

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \\ \dot{x}_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ -a_1 & -a_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & -a_2 & -a_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \beta_1 \\ \beta_2 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ \beta_4 \end{bmatrix} r \quad (9)$$

$$y = [1 \quad 0 \quad 1 \quad 0] \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \end{bmatrix} + \beta_0 \mu$$

with coefficients $\beta_0 = b_0$, $\beta_1 = b_1 - a_1\beta_0$, $\beta_2 = b_2 - a_1\beta_0$, $\beta_4 = b_2$

Let us consider the system (9) expressed in the symbolic form:

$$\begin{aligned} \dot{X}(t) &= AX(t) + Bu + Pr(t), \\ Y(t) &= CX(t) + Du(t), \end{aligned} \quad (10)$$

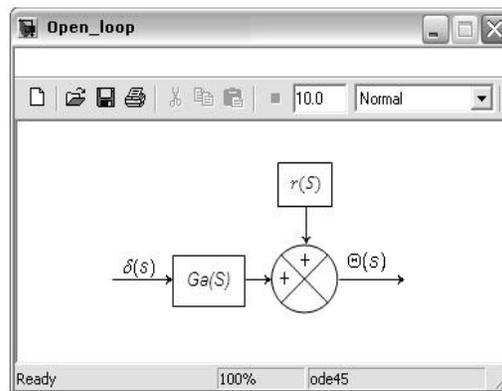


Fig. 1. Open loop aircraft model block diagram

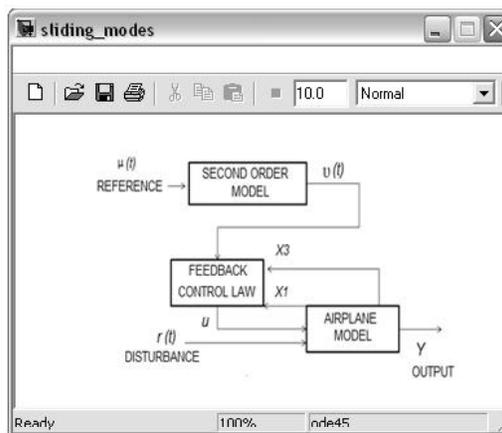


Fig. 2. Mini-aircraft control block diagram

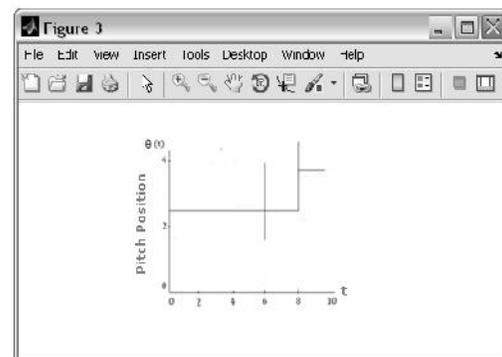


Fig. 3. Open loop pitch position in mini-aircraft model

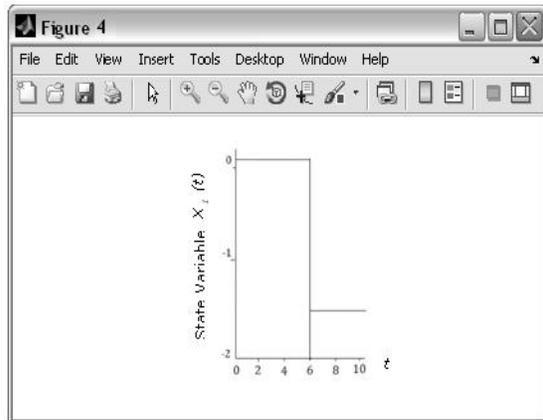


Fig. 4 State variable $X_1(t)$

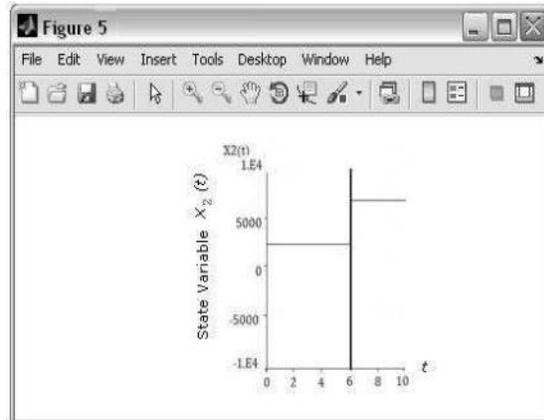


Fig. 5 State variable $X_2(t)$ in open loop through time

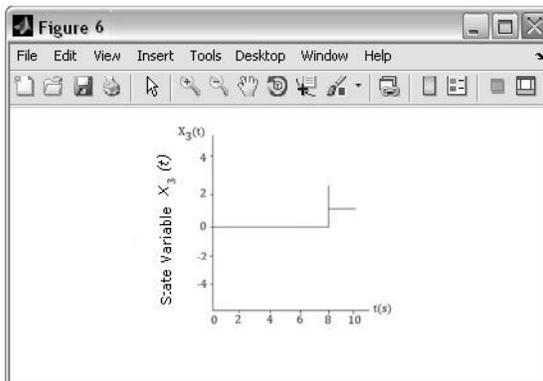


Fig. 6 State variable $X_3(t)$ in open loop

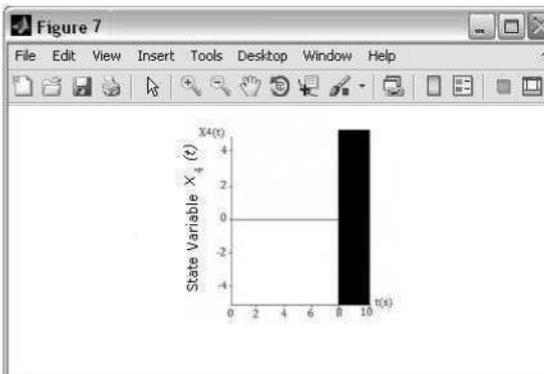


Fig. 7 State variable $X_4(t)$ in open loop through time

with $X, X \in \mathfrak{R}_{[-1,1]}^{4 \times 1}$; $u, y \in \mathfrak{R}^{1 \times 1}$; $B, P, C^T \in \mathfrak{R}_{[-1,1]}^{4 \times 1}$;

$A \in \mathfrak{R}_{[-1,1]}^{4 \times 4}$; $\{r(\tau)\}_t \subseteq \mathcal{N}(\mu, \sigma^2 < \infty_s)$ and $D \in \mathfrak{R}$.

The error is defined as $e(t) = Y(t) - \hat{Y}(t)$, where $\hat{Y}(t)$ is the reference signal choosing the sliding surface described in (11) in agreement with [17-26]:

$$s(e(t)) = \int_0^t e(\tau) d\tau. \quad (11)$$

The surface in a finite time considers that

$$\hat{Y}(t) \cong Y(t), \quad (12)$$

for $S(e)$ to have an attracting region [7] accomplishing with

$$s\dot{S} < 0. \quad (13)$$

Therefore, a smooth trajectory is proposed:

$$\dot{S} = -F(S), \quad (14)$$

where $F(S)$ is a discontinuous function of S . Considering its derivative in (11) and applying (14), we get:

$$-F(t) = Y(t) - \hat{Y}(t). \quad (15)$$

Based on (10) in (15), the region is described as:

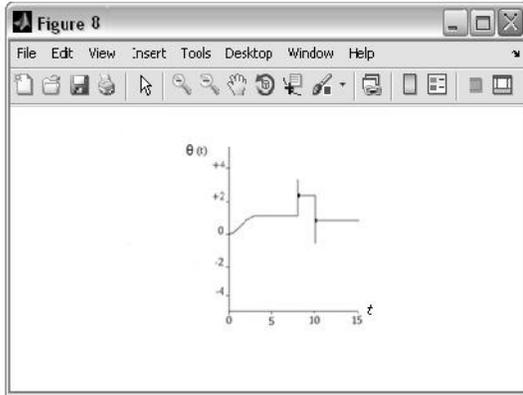


Fig. 8. Output signal θ measured in the mini-aircraft system

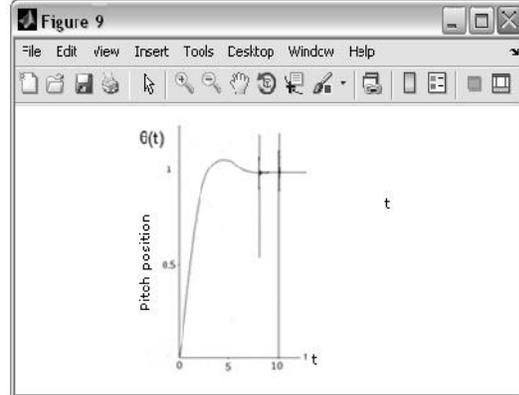


Fig. 9. Output signal θ using sliding mode feedback control law

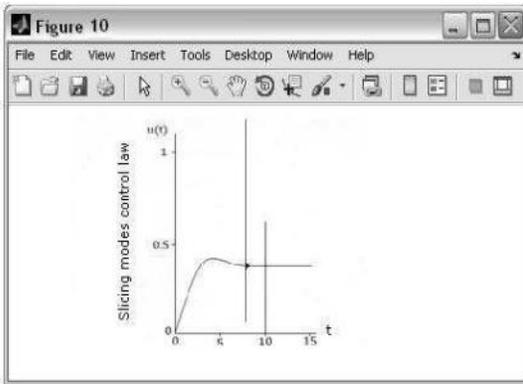


Fig. 10. Sliding mode control law

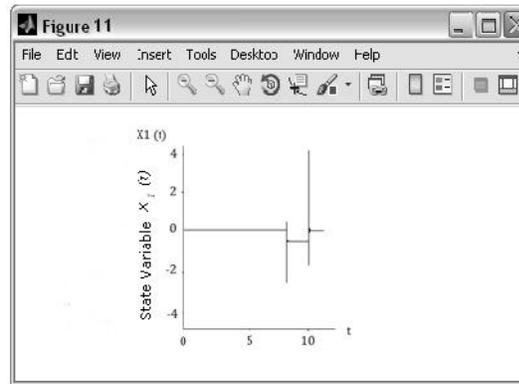


Fig. 11. Sliding mode control law applied to state variable $X_1(t)$ in close loop

$$-F(t) = CX(t) + Du(t) - \hat{Y}(t). \quad (16)$$

Defining $F(s)$ as $-F(t) + \hat{Y}(t)$, the control law action is described as:

$$u(t)^* = F(s) - CX(t)/d. \quad (17)$$

The mini-aircraft model output (9) is considered in (15); the control law is given as:

$$u(t)^* = F(s) - (X_1(t) + X_3(t))/\beta_0. \quad (18)$$

3 Simulation

The control law action applied to the mini-aircraft model system is shown in Figs. 3 to 7, developing the desired output signal, pitch position, control law, and state variables from X_1 to X_4 .

Fig. 4 shows the state variable X_1 in an open loop.

Fig. 8 describes the real pitch position without considering the model properties and the ideal

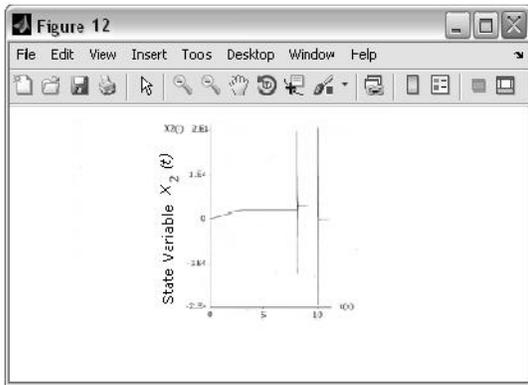


Fig. 12. Sliding mode control law applied to state variable $X_2(t)$ in close loop

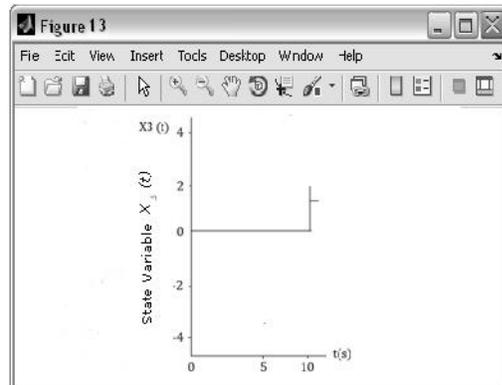


Fig. 13. Sliding mode control law applied to state variable $X_3(t)$ in close loop

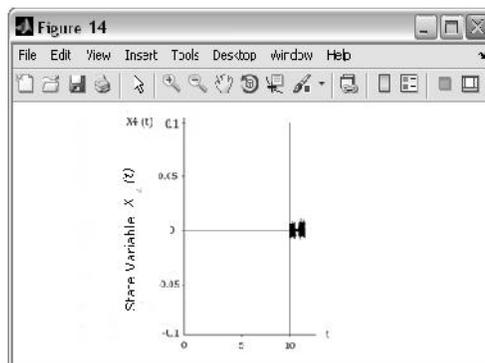


Fig. 14. Sliding mode control law applied to state variable $X_4(t)$ in close loop

conditions measured inside the mini-aircraft system.

Now, Figs. 9 to 10 present the results considering the sliding mode properties based on (18) and Fig. 2, where the control law directly affects the pitch position, the input as a law and the internal states.

4 Conclusions

Mini-aircraft is typically able to perform different complex tasks without loss of stability in the presence of wind perturbations known as blast. The model used in this paper as a base is a fourth

order described in state space with four internal variables presented in Equation (9) and in the symbolic form in Equation (10).

In agreement with trajectories, the control law using sliding modes presented in Equation (18) was suggested, which directly affects the internal state model, allowing the pitch position to be automatically independent of visibility and distance conditions.

Figures 3 to 7 describe the model internal states and the pitch position developed, Fig. 8 presents the real angular position measured. Fig. 9 shows the sliding mode control law, and Figures 10 to 14 describe the four controlled internal states.

Acknowledgments

The authors would like to thank the Aeronautical School, CIC, and ESIME of the IPN (National Polytechnic Institute) for their kind support in our research.

References

1. **Bhattacharyya, S.P. (1982).** Transfer Function Conditions for Output Feedback Disturbance Rejection. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 27(4), 974–977.
2. **Ogata, K. (2010).** *Ingeniería de Control (5ta ed.)*. Madrid, España: Pearson Hall.
3. **Roskam, J. (1998-2001).** *Airplane Flight Dynamics and Automatic Flight Controls*. Lawrence, Kan: DAR Corporation.
4. **Chudoba, B. (2001).** *Stability and Control of Conventional and Unconventional Aircraft Configurations: A Generic Approach*. Russia: Books on Demand.
5. **Etkin, B. & Reid, L.D. (1996).** *Dynamics of Flight: Stability and Control*. New York: Wiley.
6. **Golnaraghi, F. & Kuo, B.C. (2009).** *Automatic Control Systems (9th ed.)*. New York: Wiley.
7. **Yechout, T.R., Morris, S.L., Bossert, D.E., & Hallgren, W.F. (2003).** *Introduction to Aircraft Flight Mechanics: Performance, Static Stability, Dynamic Stability, and Classical Feedback Control*. Reston, VA: American Institute of Aeronautics and Astronautics.
8. **Pamadi, B.N. (2004).** *Performance, Stability, Dynamics, and Control of Airplanes (2nd ed.)*. Reston, VA: American Institute of Aeronautics and Astronautics.
9. **Cook, M.V. (2013).** *Flight Dynamics Principles: A linear Systems Approach to Aircraft Stability and Control (3rd ed.)*. Amsterdam; Boston: Butterworth-Heinemann.
10. **Abzug, M.J. & Larrabee, E.E. (2005).** *Airplane Stability and Control: A History of the Technologies that Made Aviation Possible (2nd ed.)*. Cambridge, UK: Cambridge University Press.
11. **Phillips, W.F. (2004).** *Mechanics of flight*. Hoboken, N.J.: Wiley.
12. **Utkin, V.I. (1978).** Sliding modes and their application in variable Structure Systems. Moscow: MIR publishers.
13. **Guevara, P., Medel, J.J., & Cruz, D. (2004).** Modelo dinámico para una tarea en tiempo real. *Computación y Sistemas*, 8(1), 61–73.
14. **Bartolini, G., Ferrara, A., & Usani, E. (1998).** Chattering avoidance by second-order sliding mode control. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 43(2), 241–246.
15. **Chen, C.T. (2009).** *Linear System Theory and Design (3rd ed.)*. New York: Oxford University Press.
16. **Taller de construcciones aeronáuticas (TDCA).** TLALOC ACR-II Project. Postgraduate studies and research Direction (DEPI), register number: 900931-IPN, E.S.I.M.E.-TICOMAN. México D.F.
17. **Utkin, V.I. (1992).** *Sliding models in control and optimization*. Berlin: Springer-Verlag.
18. **Ming-chin, W. & Ming-chang, S. (2003).** Simulated and experimental study of hydraulic anti-lock braking system using sliding-mode PWM control. *Mechatronics*, 13(4), 331–351.
19. **Bouri, M. & Thomasset, D. (2001).** Sliding Control of an electropneumatic actuator using an integral switching surface. *IEEE transactions on control systems technology*, 9(2), 368–375.
20. **Ang, K., Chong, G., & Yun, L. (2005).** PID control system analysis, design, and technology. *IEEE transactions on control systems technology*, 13(4), 559–576.
21. **Brégeault, V., Plestan, F., Shtessel, Y., & Poznyak, A. (2010).** Adaptive sliding mode control for an electropneumatic actuator. *11th International Workshop on Variable Structure Systems (VSS)*, México, City, 260–265.
22. **Girin, A., Plestan, F., Brun, X., & Glumineau, A. (2009).** High-Order Sliding-Mode Controllers of an Electropneumatic Actuator: Application to an Aeronautic Benchmark. *IEEE transactions on control systems technology*, 17(3), 633–645.
23. **Prabel, R., Schindele, D., Aschemann, H., & Butt, S.S. (2012).** Model-based control of an electropneumatic clutch using a sliding-mode approach. *7th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications, Singapore*, 1195–1200.
24. **Young-Shin, K., Bum-Jim, P., Am, C., & Chang-Sun, Y. (2012).** Flight test of flight control performance for airplane mode of Smart UAV. *12th International Conference on Control Automation and Systems (ICCAS)*, JeJu Island, Korea, 1738–1741.
25. **Wang, J., He, L., & Sun, M. (2010).** Application of active disturbance rejection control to integrated flight-propulsion control. *2010 Chinese Control*

and Decision Conference (CCDC), Xuzhou, China, 2565–2569.

26. **Castro-Linares, R., Álvarez-Gallegos, Ja., Vásquez-López, V. (2001).** Sliding mode control and state estimation for a class of nonlinear singularly perturbed systems. *Dynamics and Automatic Flight Control. Design and Research Corporation (DAR corporation)*, Lawrence, Kansas, USA, 1(1), 10–35.



Ricardo Carreño Aguilera obtained a degree in Communications and Electronics Engineering with specialization in Control from the Superior School of Mechanical and Electrical Engineering of the National

Polytechnic Institute (ESIME-Zacatenco, IPN), Mexico, a Master's degree in Administration from the Querétaro Autonomous University, Mexico, and currently is pursuing a Ph.D. degree in Systems Engineering at the Postgraduate and Research Department of ESIME-Zacatenco, IPN. Now his research area is automatic control.



Miguel Patiño Ortiz obtained a degree in Communications and Electronics Engineering with specialization in Computer Science from ESIME-Zacatenco, IPN, Mexico, a Master's degree in Systems Engineering and a

Ph.D. with honors in Mechanical Engineering from the Postgraduate and Research Department of the same institution. He did his postdoctoral research at the Metropolitan Autonomous

University, Mexico, in the area of Nanotechnology and Nanomedicine. Currently his research area is complex systems; he holds a position of Professor and Researcher at the National Polytechnic Institute (IPN), Mexico.



Julián Patiño Ortiz obtained a degree in Civil Engineering with specialization in Structures from ENEP Acatlan of the Mexican National Autonomous University, a Master's degree in Systems Engineering and a Ph.D. with honors in

Mechanical Engineering from the Postgraduate and Research Department of ESIME-Zacatenco, IPN. He accomplished his postdoctoral studies in Complex Systems, Seismology and Civil Protection at EIME-Zacatenco with a scholarship from the Institute for Science and Technology of the Federal District (ICyTDF), Mexico. His current research area is complex systems; he holds a position of Professor and Researcher at IPN and is a member of the National System of Researchers of Mexico, Level 1.

Article received on 10/06/2013, accepted on 12/09/2013.