

**UNIVERSIDAD DE LOS ANDES  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
POSTGRADO EN INGENIERÍA DE CONTROL Y AUTOMATIZACIÓN**

**ELABORACIÓN DE UN LIBRO Y SU MODELO EN ELECTRÓNICO SOBRE EL  
ANÁLISIS DE SISTEMAS DE CONTROL, LINEALES E INVARIANTES EN EL  
TIEMPO.**

**Autor: Ing. Ana Karina Torrealba Contreras  
Tutor: Dr. Francklin Rivas Echeverría**

**TRABAJO DE GRADO**

**Presentado ante la Ilustre Universidad de Los Andes  
como requisito final para optar al Grado Académico de  
MAGÍSTER SCIENTIAE EN INGENIERÍA DE CONTROL Y AUTOMATIZACIÓN**

**MÉRIDA, VENEZUELA  
Noviembre, 2004**

## **DEDICATORIA**

A Dios y a la Virgen.....

A mis padres, por su incondicional y permanente apoyo.  
A todos aquellos quienes en algún momento me apoyaron para lograr con gran éxito la culminación de mis estudios.

## **AGRADECIMIENTO**

Deseo hacer un agradecimiento muy especial a mis padres quienes siempre me apoyaron e incentivaron a lograr esta meta que me propuse ya unos años atrás.

A mi tutor Francklin Rivas, quien con su gran experiencia y paciencia ha estado siempre apoyándome y orientándome en la realización de este trabajo, dedicándome muchas horas académicas y extra académicas también.

A todos aquellos quienes de alguna u otra forma me incentivaron a seguir adelante y valoraron mi esfuerzo.

## RESUMEN

ELABORACIÓN DE UN LIBRO Y SU MODELO EN ELECTRÓNICO SOBRE EL ANÁLISIS DE SISTEMAS DE CONTROL, LINEALES E INVARIANTES EN EL TIEMPO.

por:

Ana Karina Torrealba Contreras

El análisis de sistemas de control constituye el conjunto de procedimientos surgido de investigaciones que marcaron la pauta en el estudio riguroso de los sistemas de control, constituyendo aún la herramienta más útil al momento de abordar un problema de control. Gracias a los aportes realizados por autores sobre los métodos y técnicas de análisis de los sistemas de control, ha sido posible resolver muchos sistemas de control; estos escritos se han conservado a lo largo del tiempo a través de libros impresos. Con los avances tecnológicos, se han ampliado las posibilidades de comunicación y difusión de la lectura y escritura, dando origen a los llamados libros electrónicos o *e-books*. En este Trabajo de Grado se presenta la elaboración de un libro impreso y su modelo en electrónico

sobre el Análisis de Sistemas de Control, Lineales e Invariantes en el Tiempo con el fin de ofrecer un recurso didáctico que sirva de apoyo a estas y las nuevas generaciones. Ambas versiones se complementan y tienen sus ventajas y desventajas, el uso de ellos dependerá de la accesibilidad del lector.

A su vez, los contenidos del libro presentan ejemplos desarrollados con la herramienta computacional *Matlab*® a modo de verificación y comparación entre los diagramas efectuados manualmente y los efectuados en *Matlab*®.

**Palabras Claves:** Análisis de Sistemas de Control, Sistemas Lineales, *Matlab*®, Libro impreso, libro electrónico.

# ÍNDICE

INTRODUCCIÓN .....	1
CAPÍTULO I .....	4
EL PROBLEMA .....	4
1.1    PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA .....	4
1.2    OBJETIVOS .....	8
1.2.1    Objetivo general .....	8
1.2.2    Objetivos Específicos .....	8
1.3    IMPORTANCIA Y JUSTIFICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN .....	9
1.4    LIMITACIONES DE LA INVESTIGACIÓN .....	10
CAPÍTULO II .....	11
MARCO TEÓRICO REFERENCIAL .....	11
2.1    ANTECEDENTES .....	11
2.2    FUNDAMENTOS TEÓRICOS .....	15
<i>Evolución del Control Automático</i> .....	15
<i>Sistemas de Control, Lineales e Invariantes en el Tiempo</i> .....	19
<i>Clasificación de los modelos</i> .....	21
<i>Del Libro Impreso al Libro Electrónico</i> .....	23
<i>Ventajas</i> .....	27
<i>Desventajas</i> .....	28
<i>Educación a distancia</i> .....	30
CAPÍTULO III .....	32
MARCO METODOLÓGICO .....	32
3.1    METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN .....	32
3.1.1 <i>Tipo de Investigación</i> .....	32
3.1.2 <i>Fases Metodológicas de la Investigación</i> .....	33
CAPÍTULO IV .....	44
RESULTADOS .....	44
4.1    RESULTADO DE LA INVESTIGACIÓN .....	44
4.2    IMPACTO ESPERADO DE LA INVESTIGACIÓN .....	48
CAPÍTULO V .....	50
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....	50
5.1    CONCLUSIONES .....	50
5.2    RECOMENDACIONES .....	52
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	55

## ÍNDICE DE TABLAS Y FIGURAS

<i>FIGURA. 1. REPRESENTACIÓN DEL MODELO MATEMÁTICO DE UNA PLANTA.....</i>	<i>20</i>
<i>FIGURA. 2. CLASIFICACIÓN DE LOS MODELOS.....</i>	<i>21</i>
<i>TABLA 1. DEFINICIÓN DE LOS MODELOS.....</i>	<i>22</i>
<i>FIGURA. 3. GRADOS DE COMPLEJIDAD ENTRE EXACTITUD Y SENCILLEZ DE ALGUNOS MODELOS.....</i>	<i>22</i>
<i>FIGURA 4. FASES DE LA METODOLOGÍA.....</i>	<i>34</i>

## INTRODUCCIÓN

La Ingeniería de Control juega un papel muy importante en los sistemas y en el desarrollo de muchas áreas como: la ingeniería química, mecánica, eléctrica, electrónica, así como las ciencias físicas y la economía, entre otras, pues se propone lograr desempeños específicos, óptimos y confiables en cada uno de los sistemas de dichos campos. Estos desarrollos, provienen desde tiempos remotos, donde el hombre era capaz de imitar a su entorno y desarrollar avances que le permitieran tener una vida más confortable. Con el advenimiento de la era tecnológica, se ha contribuido a mejorar estos procesos productivos y de servicio al hombre, con el fin de liberarse de tareas rutinarias y/o riesgosas y obtener el mejor provecho de los sistemas sobre los cuales tiene posibilidad de intervenir por medio de acciones de control, lo que ha conducido desde hace más de 200 años a abordar estudios rigurosos en el área. El análisis de sistemas de control, particularmente, está dedicado al estudio de comportamientos de estos sistemas, entre otras cosas, basado en diferentes técnicas y enfoques que permitan obtener resultados satisfactorios al momento de abordar el diseño como tal.

Por otra parte, el hombre se ha visto también en la necesidad de crear medios que le faciliten sus actividades cada vez más complejas producto del desarrollo tecnológico, surgiendo así los medios de comunicación, los cuales nacen de la necesidad de intercambiar información entre seres humanos. Con los avances



tecnológicos se ha logrado contar con sistemas de comunicación más efectivos, rápidos, prácticos, innovadores, de fácil acceso y de mayor alcance.

En los últimos años, los medios de comunicación han constituido una herramienta persuasiva que ha permitido mantenerse en continua comunicación con los distintos sucesos educativos, sociales, políticos, económicos, culturales, tecnológicos, entre otros, tanto a nivel nacional como internacional.

Entre los principales medios de comunicación se encuentran: los libros, periódicos, revistas, teléfono, radio, televisión y la red de Internet.

Con la aparición de los libros, se han ampliado las posibilidades de la comunicación y la difusión de la lectura y escritura y a su vez han sido fundamentales en el desarrollo educativo y cultural de la humanidad, y hoy en día, resulta evidente el impacto que han tenido y tienen los avances tecnológicos en estos medios. En este sentido, y basándose en que el desarrollo de un libro requiere de objetivos claros para lograr una buena transmisión de conocimientos a través de sus contenidos, se plantea la creación de un libro impreso y su versión electrónica como una herramienta de apoyo didáctico en el área de Ingeniería específicamente en el estudio de Sistemas de Control, Lineales e Invariantes en el Tiempo.

De acuerdo a lo anterior, el presente trabajo de investigación busca ser una contribución a las necesidades que han de existir en los estudiantes de pregrado y postgrado para solidificar los conocimientos adquiridos en sus cursos de formación en el área. Para ello, se llevó a cabo una metodología, en la cual se revisaron

diversos contenidos programáticos relacionados con el tema sobre la Teoría de Control y la nueva reforma del p nsu m curricular de la Universidad de los Andes con el fin de reforzar las bases de conocimiento para la formación del profesional; el desarrollo del contenido programático se estructuró en 7 capítulos presentando algunos ejemplos con el fin de ilustrar el caso en estudio, procediendo luego a la creación del libro electrónico, aspectos que serán detallados a lo largo de la presente investigación y que tienen como fin último la elaboración de un libro impreso y su modelo en electrónico sobre el Análisis de Sistemas de Control, Lineales e Invariantes en el Tiempo. El presente trabajo de Grado consta de cinco capítulos organizados de la siguiente manera: Capítulo I detalla el problema en estudio, el objetivo general y los objetivos específicos, la importancia y justificación y las limitaciones presentadas en el desarrollo de la investigación. En el Capítulo II se desarrollan los fundamentos teóricos, todo lo referente a los antecedentes relacionados con la investigación, basados en el estudio de las referencias bibliográficas. En el capitulo III se detalla la metodología de la investigación. En el capítulo IV, se presentan los resultados de la investigación y el Capítulo V presenta las Conclusiones y Recomendaciones del estudio y los anexos muestran los resultados de la investigación. Finalmente, se presentan las referencias bibliográficas que sirvieron de apoyo para la realización de este trabajo.

# **CAPÍTULO I**

## **EL PROBLEMA**

### **1.1 Planteamiento del Problema**

La información que el hombre ha generado a lo largo de su historia ha adquirido diversos formatos: periódicos, revistas, reportes, publicaciones, tesis, libros y videos. Cada vez que el ser humano ha tenido que hacer constar por escrito y conservar los instantes que se lleva la historia, la necesidad de la escritura se ha hecho presente. Alguna vez hemos pensado en: ¿Qué hubiera pasado en nuestro entorno y el mundo si no existiera la escritura? Sencillamente no podríamos comunicarnos ni transmitir nuestros conocimientos a otras personas, no existirían periódicos ni libros, tampoco las computadoras. La escritura fue un avance histórico para la humanidad. Su evolución fue lenta, nació en Asia en la antigua Mesopotamia hace 3500a.C., con el propósito de registrar los hechos históricos. Su evolución se ve enmarcada desde la utilización de símbolos hasta la formación de palabras.

Con la aparición de la escritura se ha dado pauta a los libros, los cuales además de almacenarla, ampliaron las posibilidades de la comunicación y la difusión de la lectura. El libro es el soporte que mejor ha contribuido a cumplir funciones de

comunicación y archivo a lo largo de la historia brindando una serie de servicios para su manipulación, tales como el acceso, recuperación, análisis, síntesis y diseminación de la información [Mintzer et al. 1996]. No obstante, como respuesta a las necesidades de mantener la información en un esquema de orden como lo es un libro y que además brinde las ventajas de la tecnología de cómputo, surge en la era tecnológica, el concepto de libros electrónicos. Las ventajas que estos libros presentan sobre los convencionales se refieren a la explotación de los recursos de comunicación, a la capacidad de almacenamiento digital y rápido procesamiento, a la protección y búsqueda de información, a la capacidad de integrar las bondades del computador con el libro, como son las funciones de búsqueda, resaltar textos, establecer marcadores, adjuntar archivos, realizar anotaciones, etc., así como el hecho de estrechar la comunicación y colaboración entre los usuarios de la misma.

Con el advenimiento de la era tecnológica, el hombre ha buscado a través del tiempo nuevas formas de mejorar sus procesos productivos con el fin de liberarse de tareas rutinarias y/o riesgosas.

La automatización de equipos y procesos industriales ha sido una de las áreas del conocimiento donde se han producido grandes avances en los últimos años. El diseño de sistemas de control es y ha sido una parte fundamental en la automatización de los procesos en el área de Ingeniería.

Los sistemas de control no son invención del hombre, la naturaleza está conformada por muchos de estos sistemas; un ejemplo claro son los sistemas que

posee el ser humano en su organismo para el desempeño de muchas de sus funciones (Ej. El movimiento coordinado que es capaz de realizar al tomar un objeto con sus manos). Sin embargo, a través del tiempo, el hombre ha ido evolucionando y ha sido capaz de desarrollar nuevos avances que le permitan tener una vida más confortable. Desde la invención del reloj de agua, basado en un sistema de regulación con flotador para mantener el nivel de agua constante en los años 300 a.C., hasta los últimos avances en diseño de control fuertemente apoyados en la tecnología, como lo son los pilotos automáticos para el control de vuelo de un avión, han contribuido al desarrollo de esta área tan importante.

La búsqueda por alcanzar “tales” objetivos, de acuerdo a propósitos específicos es un reto que todo ingeniero y diseñador de sistemas en general, desea y debe superar. El desarrollo físico y real de los sistemas, en términos de diseño basado en conocimientos más que en la experiencia misma, debe estar acompañado de modelos analíticos cuya representación matemática permita la elaboración de diseños de control que luego serán adaptados a la realidad del sistema para su implementación física.

En la Teoría de Control se distinguen dos disciplinas: la Teoría de Control Clásica, basada principalmente en los métodos de variables complejas de Bode y la Teoría de Control Moderna, la cual considera las ecuaciones diferenciales ordinarias como un modelo para el diseño de sistemas de control.

Este proyecto pretende abarcar el desarrollo de un libro impreso y presentar su modelo en electrónico sobre el Análisis de Sistemas de Control, Lineales e

Invariantes en el tiempo basados en la Teoría de control Moderna, permitiendo brindar un apoyo a los estudiantes y aporte un servicio nuevo a la Universidad, como lo es la inclusión de libros electrónicos que se encuentren a la disponibilidad de cualquier persona, con el fin de permitir a los usuarios la facilidad de explotar los recursos que este tipo de libros permite. A su vez constituye una herramienta de gran utilidad al lector, ofreciendo la posibilidad de tener un libro al alcance de los estudios de pregrado y postgrado. A lo largo del libro se presenta un tratamiento completo del Análisis de Sistemas de Control en Tiempo Continuo, describiendo las diferentes técnicas y enfoques que existen sobre el Análisis de Sistemas de Control Lineales y se ilustran con algunos ejemplos teóricos.

Con el uso de las herramientas computacionales las cuales juegan un papel muy importante en el análisis, diseño y simulación de sistemas de control moderno, es posible la obtención de gráficas con mayor precisión y mejores resultados en un tiempo óptimo y a menor costo que las simulaciones realizadas de forma manual. Hoy en día existen muchas herramientas disponibles; algunos de los ejemplos presentados en este libro fueron desarrollados utilizando *Matlab*® para la obtención de respuestas temporales y frecuenciales, partiendo de modelos puramente matemáticos para abordar los problemas de la Teoría de Control Moderna.

## 1.2 Objetivos

### 1.2.1 Objetivo general

Desarrollar un libro y su modelo en electrónico sobre el Análisis de Sistemas de Control para Sistemas Lineales e Invariantes en el tiempo.

### 1.2.2 Objetivos Específicos

- Elaborar un contenido que abarque las áreas que se desean desarrollar en cada capítulo sobre el Análisis de Sistemas de Control, Lineales e Invariantes en el Tiempo
- Elaborar dos versiones del libro: un libro impreso y un libro electrónico con los contenidos planteados.
- Presentar ejemplos en los distintos capítulos con la finalidad de ilustrar al lector
- Utilizar *Matlab*® para abordar algunos problemas de cálculo y realizar comparaciones con las herramientas de análisis gráfico realizadas manualmente

### **1.3 Importancia y Justificación de la Investigación**

La realización de este trabajo de grado, constituye un aporte importante al aprendizaje del lector, reforzando sus conocimientos adquiridos en estudios previos sobre el Análisis de Sistemas de Control Lineales, permitiendo así incrementar y enriquecer su potencial a través de las diversas técnicas y enfoques que se proponen sobre el tema.

Por otra parte, la creación del libro como el que se presenta en este proyecto, sentará precedentes y se espera que contribuya a mejorar la enseñanza de la Teoría de Control a través de un adecuado enfoque de su contenido de forma clara y actualizada, beneficiando así no solamente al lector sino a las Instituciones de Educación Superior ya que recibirá un recurso didáctico que refleja la labor pedagógica del autor y sus colaboradores.

Además se justifica el estudio porque servirá de orientación y referencia para futuras investigaciones sobre el tópico.

Con la digitalización del libro se creará un recurso nuevo que ayudará a elevar la calidad de la educación y mejorar los procesos de enseñanza aprendizaje gracias a las ventajas que estos libros brindan. El uso de ellos, ha permitido lograr que un libro no sea exclusivamente una combinación de textos e imágenes estáticas, sino que permiten incorporar elementos como son las funciones de búsqueda, resaltar textos, establecer marcadores, adjuntar archivos, realizar anotaciones, entre otros,



así como el hecho de estrechar la comunicación y colaboración entre los usuarios de la misma.

La importancia y utilidad de esta investigación no sólo radica en las aplicaciones que pueden dársele a este libro con las tecnologías digitales que van más allá de la presentación de textos en pantalla, sino en cómo estos textos se encuentran reflejados en la edición impresa. A criterio propio, los avances tecnológicos no harán que los libros impresos queden obsoletos, sino por el contrario, ayudarán a potenciar, facilitar y promover su edición, logrando elaborar textos en diversos formatos que bien diseñados, se complementen entre sí.

#### **1.4 Limitaciones de la Investigación**

En toda investigación se presentan dificultades que en la gran mayoría de los casos es difícil preverlas.

En el presente trabajo de grado no se presentaron limitaciones que incidieran directamente sobre el estudio, ya que al momento de encontrar dificultades, se resolvieron indagando en fuentes bibliográficas relacionadas con el tema y con la asesoría del tutor experto en el área.

## CAPÍTULO II

### MARCO TEÓRICO REFERENCIAL

#### 2.1 Antecedentes

De acuerdo a la revisión documental consultada para la realización de este Proyecto de Investigación son varias las publicaciones relacionadas con el tópico sobre la Teoría de Control y los Sistemas Lineales. Entre ellos se encuentran:

- Dorf, Richard C., Sistemas Automáticos de Control – Teoría y práctica –, Segunda Edición, Addison Wesley, 1986

El propósito de este texto es presentar la estructura de la Teoría de Control en el dominio de la frecuencia y del tiempo y proporcionar una serie de descubrimientos interesantes a medida que se avanza a través de él y de los problemas que contiene. A pesar de dedicar la mayor parte de su contenido a los sistemas lineales de control con parámetros constantes, en algunos casos realiza una descripción de los sistemas no lineales.

Analizando el contenido programático del libro, se abarcan todos los conceptos fundamentales de los sistemas lineales, invariantes en el tiempo. Este libro ha sido actualizado y en Abril de 2004 fue publicada la décima edición.

- Nise, Norman S., *Control Systems Engineering, Second Edition*, Addison Wesley, 1995

El contenido de este libro se centra en el análisis y diseño de los sistemas de control en lazo cerrado. Los temas se presentan de una manera lógica y progresiva de manera de hacer comprensible al lector el diseño de los sistemas de control. A su vez, se detallan ejemplos teóricos y se introduce al lector en el uso de *Matlab*® con el fin de que aprendan a utilizar esta herramienta computacional en el análisis y diseño de sistemas de control. Cada capítulo contiene un gran número de ejemplos, problemas y preguntas acerca del tema en estudio. La última versión del libro contiene un *CD – ROM*, el cual contiene aplicaciones informáticas, códigos de programas en *Matlab*® relacionados con los ejemplos que aparecen en el texto, entre otros.

- Van de Vegte, John, *Feedback Control Systems, Third Edition*, Prentice Hall, 1993

Este libro ofrece un análisis cuidadoso de los principios del control clásico y moderno, acentuando en particular los aspectos prácticos del análisis y diseño de control en lazo cerrado. Su contenido se encuentra dividido en tres áreas principales: análisis y diseño de los sistemas de control, sistemas de control digital y luego se enfoca al estudio de los sistemas de control no lineales.

A su vez, el texto se complementa con el desarrollo de ejemplos y problemas propuestos con el fin de ilustrar al lector. La tercera edición contiene un

software de los sistemas de control (CPS) y la documentación para la PC de IBM y computadoras compatibles.

- Kuo, Benjamin C., *Sistemas de Control Automático*, Séptima Edición, Prentice Hall, 1996.

El autor del libro a través de sus ediciones, ha ido incluyendo las mejoras necesarias de tal forma que actualmente es un texto excelente para el estudio de los sistemas lineales continuos. En todos los temas hay apartados dedicados a los sistemas discretos, que son útiles para su comparación con los sistemas continuos, sin embargo, el libro que se propone solo contempla los sistemas de control, lineales e invariantes en el tiempo.

Algunas de las mejoras significativas respecto a la edición anterior, se ha centrado en mejorar las soluciones por computadora e incrementar el uso de gráficas con el fin de ilustrar al lector.

En relación con el contenido programático, en los capítulos del 1 al 10 y en los apéndices A, B y C se tratan todos los conceptos fundamentales de los sistemas lineales continuos y se introducen paralelamente los sistemas discretos. En el capítulo 11 se trata el diseño de sistemas de control en tiempo discreto.

- Lewis, Paul H. y Chang, Yang, *Basic Control Systems Engineering*, Prentice Hall, 1997.

Este libro es un buen texto para el estudio de los sistemas lineales continuos. Presenta una introducción a las técnicas asistidas por el computador y el uso

de *Matlab®* y *Simulink* con el fin de mejorar la comprensión de las distintas áreas de estudio. En relación al contenido del programa se estudian todos los conceptos fundamentales de los sistemas lineales continuos. A su vez, se incluyen temas sobre simulación de sistemas no lineales, diseño de sistemas de control de eventos discretos y controladores PID e introducción al control robusto, donde el lector puede ampliar sus conocimientos.

- Ogata, Katsuhiko, Ingeniería de Control Moderna, Tercera Edición, Prentice Hall. 1998

Este libro, titulado "Ingeniería de Control Moderna" es un libro clásico, ampliamente utilizado en la enseñanza de sistemas continuos.

Presenta una gran cantidad de ejemplos, ejercicios, problemas resueltos y problemas propuestos, que permiten aclarar y profundizar en los conceptos teóricos.

La gran diferencia que existe entre la segunda edición y la tercera, es que presenta una mejor reestructuración de contenidos y la ventaja de integrar el uso de *Matlab®*. El contenido está estructurado en 13 capítulos y un apéndice, contemplando los conceptos básicos e indispensables de la Teoría de Control. Contiene diversos ejemplos y problemas resueltos y problemas sin resolver, con el fin de mejorar la comprensión y la ejercitación del lector. Ya se encuentra disponible la cuarta edición, publicada en Noviembre de 2001.

En la División del Postgrado en Ingeniería de Control y Automatización de la Universidad de Los Andes, se han realizado diversas publicaciones relacionadas en el área, entre ellas se encuentran:

- Dulhoste, Jean C. Componentes de Sistemas de Control, 1993.
- Rodríguez, Jesús, Lugar de las Raíces, 1994.
- Rodríguez, Jesús, Sistemas Dinámicos Lineales Finitodimensionales, Capítulo I, II, III, IV, V y VI, 1995.
- Rodríguez, Jesús, Controlabilidad de los Sistemas Dinámicos Lineales, 1997.
- Rodríguez, Jesús, Observabilidad de los Sistemas Dinámicos Lineales, 1997.
- Bolívar, Addison R., Análisis y Diseño de Control Asistido por Computador, 1999.

## **2.2 Fundamentos Teóricos**

### ***Evolución del Control Automático***

En esta sección, se presenta una breve historia sobre el desarrollo del Control Automático con el fin de dar a conocer los aspectos y avances más importantes que marcaron las pautas en la era de la teoría de control; área a la cual se orienta esta investigación.

En el área del Control automático se han producido notables cambios a lo largo de estos últimos años, aunque el término automatización no es nuevo, proviene de la antigua Grecia de la palabra “autómatas” que significa “máquina que se mueve por si mismo”.

El control es una disciplina de la ingeniería. Su progreso está fuertemente relacionado con los problemas que necesitaron ser resueltos en diferentes épocas de la historia del hombre. Puede decirse que los acontecimientos más importantes que ocasionaron la evolución de la teoría de control fueron los siguientes:

- Los mecanismos reguladores de flotador (entre los años 300a.C.)
- La preocupación de los griegos y los árabes por medir el tiempo. Este periodo abarca desde el año 300a.C. al año 1200 d.C.
- La Revolución Industrial en Europa a mediados del siglo XVIII, en donde se desarrollaron autómatas con formas humanas llamados androides
- El auge de los sistemas de comunicación. Este periodo está comprendido entre los años 1910 y 1945.
- El principio de la era espacial y digital, en 1957.

En el periodo comprendido entre la Revolución Industrial y las Guerras Mundiales, surgieron hechos muy importantes, entre ellos se mencionan:

**James Watt** en 1788, construye el primer regulador de velocidad centrífugo que sirve como control de velocidad de una máquina de vapor. Esta fue la primera aplicación a nivel industrial de los sistemas realimentados.<sup>1</sup>

Fue **Maxwell** el primero en realizar un análisis matemático riguroso de los sistemas de control realimentados, en 1868. Por tanto, es muy común denominar al periodo anterior a esta fecha la “prehistoria del control automático”.

En 1874, **John Routh**, determina las condiciones de estabilidad para sistemas de orden superior hasta orden 5 y en 1895 **Hurwitz** extiende este concepto hasta sistemas de orden 7. **Bompiani**, en 1911, estableció la equivalencia de los criterios empleados por **Routh** y **Hurwitz**. En 1892, Lyapunov publica su trabajo de tesis doctoral, en el cual trata el problema de la estabilidad de los sistemas lineales y no lineales.

Con la revolución industrial se generan grandes desarrollos teóricos, el método de la Transformada de Laplace por **Pierre Simón Laplace** y la variable compleja de **Jean B. Joseph Fourier**, estos desarrollos sentaron las bases de la Teoría de Control. En 1922, **Nicholas Minorsky** crea un controlador automático para dirigir embarcaciones y mostró que la estabilidad puede determinarse a partir de las ecuaciones diferenciales que describen el sistema.

Con el auge de los sistemas de comunicación, fue necesario construir y diseñar sistemas automáticos y otros dispositivos que contribuyeron al desarrollo de la

---

<sup>1</sup> Los sistemas realimentados son aquellos sistemas donde la señal de salida es comparada por medio de un sensor con la señal de entrada



automatización de procesos. En 1932, **Harry Nyquist** diseñó un procedimiento para determinar la estabilidad en lazo cerrado, a partir de la respuesta en lazo abierto cuando la entrada es una señal senoidal. A su vez, autores como **H.S. Black** y **J. Bode** postulan nuevas teorías y métodos para el análisis de sistemas en el dominio frecuencial y **Evans** desarrolla el método del lugar de las raíces, ambos métodos constituyen las bases fundamentales de la Teoría del Control Clásico <sup>2</sup>.

Con la llegada de la era espacial, el diseño de sistemas de control en los Estados Unidos dio un giro muy significativo, pasando de emplear las técnicas en el dominio de la frecuencia (de la teoría de control clásico), a emplear técnicas en el dominio del tiempo.

Las técnicas en el dominio de la frecuencia son muy apropiadas para el estudio de sistemas lineales invariantes en el tiempo, sin embargo, a medida que los sistemas se hacen más complejos, con múltiples entradas y salidas, las ecuaciones de estos sistemas se vuelven cada vez más complicadas. En este sentido, la Teoría del Control Clásica pierde solidez ante estos sistemas y de esta forma, alrededor de 1960, surge la Teoría de Control Moderna que junto a la disponibilidad de las computadoras digitales permite estudiar los sistemas complejos en el dominio del tiempo y resolver problemas en control.

Con la aparición de los microprocesadores se desarrollan las computadoras de uso personal o *Laptop*. Basados en estos microprocesadores, en la década de los

---

<sup>2</sup> La Teoría de Control clásico se aplica a sistemas lineales invariantes en el tiempo de una entrada y una salida (MIMO)

80, los ingenieros comienzan a realizar aplicaciones con estos dispositivos en los sistemas mecánicos con el fin de mejorar su funcionamiento. Extendiéndose su uso a la industria automotriz como es el caso de los frenos antibloqueos (ABS). Otro aspecto importante en este período, es el desarrollo de *softwares* como *Matlab®*, *Simnon®*, *Matriz®*, los cuales son herramientas importantes en el análisis y diseño de sistemas de control moderno.

Posteriormente en los 90's, no sólo se observan aplicaciones significativas en la teoría de control moderna sino que se explotan otras áreas como la biología, biomédica, economía, entre otras.

### ***Sistemas de Control, Lineales e Invariantes en el Tiempo***

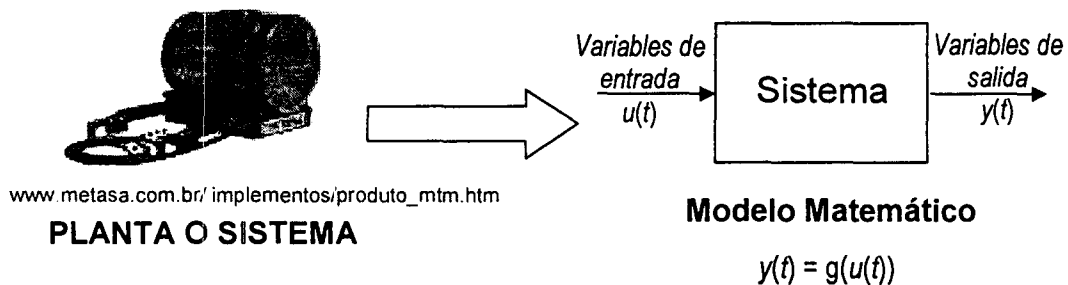
El propósito de esta sección, es definir el área de estudio que contempla el desarrollo de esta investigación.

Antes de definir los sistemas de control, lineales e invariantes en el tiempo, es importante definir que es un sistema. En un sentido amplio, se entiende que un **sistema** "es un conjunto de objetos que interactúan entre sí o que son interdependientes entre sí".

Para entender un sistema es conveniente realizar una representación de la realidad del mismo; tal representación se conoce como "modelo" del sistema. Estas representaciones pueden ser ecuaciones, gráficas, etc. En el caso de los sistemas de control es conveniente realizar un modelo matemático de la planta o

sistema. En este sentido, un sistema se puede representar a través de diferentes modelos.

Un **modelo matemático** es un conjunto de ecuaciones que intentan aproximar el efecto que tienen unas variables de entrada sobre otras variables de salidas en un sistema a lo largo del tiempo (Ver Figura. 1).



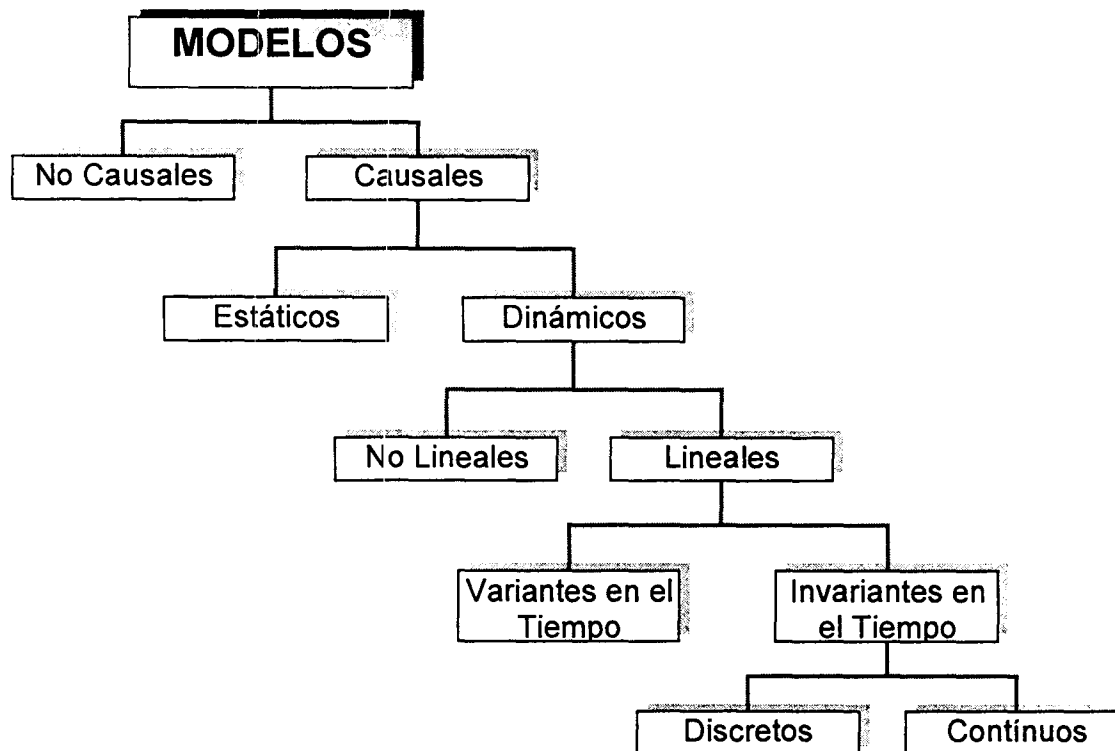
*Figura. 1. Representación del modelo matemático de una planta*

Existen dos formas de obtener estos modelos matemáticos, analíticamente o experimentalmente.

- **Analíticamente:** se necesitan conocer los componentes que forman el sistema y las interrelaciones que existen entre ellos, con el fin de plantear las ecuaciones que rigen el sistema.
- **Experimentalmente:** el sistema se observa como una caja negra y a través de distintas pruebas realizadas al mismo se determina el comportamiento de las entradas y salidas con el fin de establecer las ecuaciones que modelan ese comportamiento.

### ***Clasificación de los modelos***

En base a las propiedades de las ecuaciones que caracterizan el sistema, los modelos matemáticos se clasifican en:



*Figura. 2. Clasificación de los modelos*

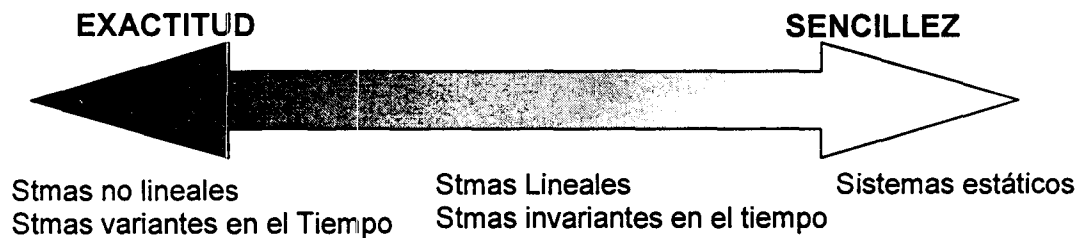
La Figura. 2 muestra algunas de las posibles clasificaciones que pueden tener los modelos. En la Tabla 1 se definen estos tipos de modelos.

En este contexto, un modelo nunca es una representación completa de la realidad, por lo tanto no es exacto, sin embargo implica sencillez. A medida que los sistemas se hacen más complejos, es difícil encontrar un modelo matemático que represente exactamente al sistema físico, siendo necesario obviar ciertas

características, realizar algunas suposiciones sobre el sistema y, en la mayoría de los casos, hacer aproximaciones a sistemas más sencillos y manipulables matemáticamente. El grado de complejidad de los modelos matemáticos puede considerarse entre la sencillez y exactitud.

*Tabla 1. Definición de los Modelos*

Modelo	Definición del modelo	Modelo Opuesto
Causales	El sistema no responde antes de que se le aplique una entrada	No causales
Dinámicos	Un sistema dinámico es un sistema cuya salida puede depender de entradas en instantes anteriores	Estáticos
Lineales	En los sistemas lineales, las ecuaciones que modelan el sistema son lineales	No Lineales
Invariantes en el Tiempo	Ningún componente del sistema contiene parámetros que cambian con el tiempo	Variantes en el Tiempo
Continuos	Cuando se describe el comportamiento a través del tiempo	Discretos



*Figura. 3. Grados de complejidad entre exactitud y sencillez de algunos modelos.*

De la Figura. 3 se observa que los sistemas lineales permiten tener un equilibrio entre la exactitud y la sencillez del modelo. Una de las ventajas que presenta un

sistema lineal sobre los no lineales, es la determinación de la solución del sistema utilizando métodos analíticos y gráficos que existen para su análisis y diseño.

Cuando los parámetros del sistema permanecen constantes en el tiempo, mientras el sistema está en operación, se dice que el sistema es invariante en el tiempo. Esta suposición de invarianza en el tiempo es muy importante al momento de simplificar un sistema, luego de lograr la representación lineal del mismo.

Las técnicas de linealización de sistemas, suelen ser sencillas. Sin embargo, en la presente investigación no son contempladas, sólo se orientara el contenido del libro al análisis de sistemas de control, lineal e invariantes en el tiempo.

### ***Del Libro Impreso al Libro Electrónico***

Uno de los hallazgos mas importante que han ocurrido en el mundo son los libros, estos constituyen un portador por excelencia y además son representantes de la cultura escrita.

Las nuevas tecnologías de información y comunicación han transformado el libro no solamente en su formato de presentación sino en su diseño y manejo. Se llegó a pensar en que el libro estaba amenazado y que llegaría el fin de la "era del libro", a causa de los avances tecnológicos. Sin embargo el uso de la tecnología ayuda a potenciar y enriquecer el modo de almacenar, manipular, aplicar y acceder la

información de los libros; siempre teniendo en cuenta el contexto y la finalidad de sus aplicaciones

En 1938 se afirmaba que el lápiz había sido sustituido por la máquina de escribir, sin embargo éste perduro ante los grandes avances tecnológicos por su accesibilidad y utilidad social. Por tal razón se puede asegurar que los libros impresos seguirán existiendo por mucho tiempo.

No obstante, como respuesta a las necesidades de mantener la información en un esquema de orden como lo es un libro y que además brinde las ventajas de la tecnología de cómputo, surge el concepto de libros electrónicos o *e-books*. En los cuales, la lectura presenta una estructura hipertextual y por consiguiente deviene en una lectura no secuencial, no lineal, presentando la posibilidad de varias rutas o caminos alternativos en la apropiación de conocimiento, a diferencia del libro impreso en el cual la lectura es secuencial, es decir, está predeterminada por la estructura que diseña el autor.

El término "hipertextual" deriva del hipertexto, creado por el Ingeniero Ted Nelson en el año 1965, quien lo vincula a una forma de escritura no secuencial. Los hipertextos son medios tecnológicos que permiten organizar el conocimiento de manera no lineal y proporcionan acceso a la información mediante hipervínculos o enlaces. Su aplicación se ve reflejada en los libros electrónicos.

Existen distintas definiciones del libro electrónico. Según Cabiró, C. (1995), citado por Ortiz (2004):

Los libros electrónicos son conjuntos de piezas de información de distintos tipos y de naturaleza heterogénea y multimedia que constituyen una unidad lógica desde el punto de vista de la comunicación y están organizados según una estructura susceptible de consulta no-secuencial, por navegación y otros medios, así como, eventualmente, susceptibles de manipulaciones diversas, en función de la naturaleza de su información y del uso a que se destinen, están provistos del software aplicativo necesario para su consulta, manipulación y uso, y encapsulados en soportes electrónicos susceptibles de reproducción masiva o bien distribuidos en línea y cuyo objetivo es la distribución pública.

Según Díaz, C. y Cuevas, A. (1996), citado por Ortiz (2004), ambos autores, coinciden en que los libros electrónicos pueden definirse como:

sistemas de información capaces de poner a disposición de sus usuarios una serie de páginas conceptualmente organizadas del mismo modo que las de un libro de papel, con las que además pueden interaccionar. Por lo tanto, no se considera que los libros electrónicos son meras simulaciones de libros impresos, sino que incluyen propiedades y herramientas que aumentan sus funciones, sirviéndose de la potencia suministrada por el soporte electrónico.

Continuando con las citas de Ortiz (2004), para Baker (1996), “un libro electrónico es esencialmente una colección de páginas de información electrónica que esta organizada, conceptualmente, como las páginas de un libro convencional.”

En otras palabras, los libros electrónicos (*e-books*), son textos escritos en formato electrónico, lo cual permite su acceso por medio de la computadora, presentando los ventajas que posee un recurso multimedia como imágenes, gráficos, sonidos,



videos, animaciones, entre otros y a su vez permiten la posibilidad de añadir anotaciones, subrayar, realizar búsquedas de palabras o frases, enlaces de hipertexto, etc.

Según Baker (1996) (citado en Ortiz (2004)), la clasificación de los libros electrónicos dependerá del tipo de información que contiene, las funciones que ejecutan y de los tipos de metáforas que siguen. A continuación se presenta la clasificación que propone Baker:

- *Libro de texto*: esta formado por páginas de textos organizados de forma lineal.
- *Libro parlante*: contiene páginas de información narradas en audio.
- *Libro de imagen estática*: contiene imágenes.
- *Libro de imagen en movimiento*: contiene animación y material de vídeo en movimiento.
- *Libro multimedia*: combinaciones de texto, sonido, imagen, animación y vídeo.
- *Libro polimedia*: contiene diferentes medios para transportar sus informaciones. Puede ser en papel, discos magnéticos, discos ópticos, redes computacionales, y otros.
- *Libro hypermedia*: similares a los libros multimedia pero contienen información que es organizada en una forma no lineal.

- *Libro electrónico inteligente:* emplean técnicas de inteligencia artificial, como sistemas expertos o redes neuronales, que les permiten aprender acerca de sus usuarios y adapta sus comportamientos en varias formas de manera de alcanzar las necesidades individuales y particulares.
- *Libro telemática:* requiere el uso de facilidades de las telecomunicaciones para proveer características especiales como la participación del mismo en teleconferencias, el envío de correos electrónicos, y acceso remoto a recursos como a las bibliotecas digitales.
- *Libro del ciberespacio:* depende del uso de técnicas de realidad virtual para crear simulaciones poderosas y experiencias de inmersión al lector entrar.

Es importante tener en cuenta que tanto los libros impresos como los libros electrónicos poseen ventajas y limitaciones que los hagan atractivos o no; su selección queda al criterio del usuario. Entre las ventajas y desventajas se destacan las siguientes:

### ***Ventajas***

Los materiales impresos tienen una larga trayectoria en el campo educativo por las ventajas que representan:

- Son fáciles de leer
- Pueden trasladarse fácilmente de un sitio a otro

- Pueden ser utilizados como material de apoyo y recurso didáctico
- Su acceso no requiere elementos físicos adicionales
- Tienen normas de diseño y tipografía claramente establecidas
- Tienen mucha durabilidad

Sin embargo las versiones electrónicas de los libros tienen también sus ventajas, entre ellas se tienen:

- Fácil acceso y navegación
- Disponibilidad inmediata
- Facilidades de copiado
- No ocupan espacio físico
- No consumen papel y por tanto contribuyen a la conservación ambiental
- Poseen todas las ventajas de un archivo electrónico como: búsqueda de palabras, añadir comentarios y marcadores, modificar tamaño de letra, entre otras
- Los costos de una edición digital son inferiores en un 40% a una edición impresa

### ***Desventajas***

Entre las desventajas que tienen los libros impresos:

- Es bastante laborioso actualizar los contenidos
- No tienen las ventajas de un documento electrónico como sonido, animación, video
- Los costos de difusión son altos
- Requieren de espacio para su almacenamiento
- Se deterioran con el tiempo
- Realizar una búsqueda dentro del libro puede ser difícil

Los libros electrónicos tienen también sus limitaciones:

- No es muy cómodo leer sobre una pantalla ya que cansa la vista
- Se requiere de un computador u otro dispositivo electrónico para poder trasladar el libro electrónico de un lugar a otro
- Los libros electrónicos solo se pueden leer en el dispositivo que se descargan, por razones de propiedad intelectual
- Limitada demanda por parte de los usuarios
- La inseguridad que provoca el avance tecnológico en cuanto a cambios, aumentos y adelanto de los equipos y programas genera inestabilidad en la conservación y la preservación de los mismos

Las editoriales tradicionales de libros impresos constan en su organización de autores, editores, proveedores, productores, entre otros, los cuales hacen posible la edición del libro impreso para su publicación, sin embargo los patrones

establecidos para la creación y publicación de libros electrónicos presentan ciertas diferencias respecto a los libros impresos. Es por eso que se hace necesario tener un *software* que permita la conversión de un formato a otro para poder leerlos. Los visualizadores de estos formatos son gratuitos y con una interfaz fácil al usuario, los más utilizados son: *Adobe Reader 6.0* ® y el *MS Reader* ®, los cuales permiten leer archivos en "PDF" y "LIT" respectivamente. También es común encontrar libros electrónicos en formato "HTML" y en archivos ".EXE", que a pesar de ser portables, no en todos los casos, presentan las bondades de los *softwares* mencionados anteriormente.

Entre las herramientas que se ofrecen al lector a través de los libros electrónicos, se encuentran el poder realizar búsquedas, copiar textos, imprimir, descarga de archivos adjuntos, subrayar o resaltar palabras e innumerables funciones adicionales.

### ***Educación a distancia***

En la actualidad, el ser humano tiene el deseo de aprender constantemente cosas nuevas, esto lo ha llevado a tener mejores oportunidades en su entorno. Muchas veces este aprendizaje se encuentra limitado por las posibilidades que tenga la persona en accederlo.

Cada día existen mayores avances tecnológicos y la necesidad de aprender y estar a la par con estas tecnologías es mayor. En este sentido la educación a distancia juega un papel muy importante ya que permite romper las distancias de

tiempo y espacio, al ofrecer recursos que hacen más flexible el proceso de enseñanza – aprendizaje, en este caso con la incorporación de los libros electrónicos, Internet, *cd-roms*, entre otros.

La modalidad de la educación a distancia se ha caracterizado, por la permanente búsqueda de innovaciones pedagógicas con el fin de favorecer los procesos de comprensión, teniendo en cuenta que quienes optan por esta modalidad no tienen una asistencia presencial. Aparte del uso de herramientas multimediales, la educación a distancia debe sustentarse en un buen desarrollo de contenidos.

La educación a distancia surge de una demanda social que la educación presencial no ha podido atender; sin embargo, una no sustituye a la otra, sino que se complementan y pueden beneficiarse entre ellas.

Con la educación a distancia se ha abierto una nueva área de investigación y desarrollo en donde es posible elaborar contenidos a través de *e-books*, los cuales son una herramienta de trabajo que ayudan a enriquecer los procesos de aprendizaje, no solo en la educación a distancia sino en los sistemas educativos tradicionales.

## **CAPÍTULO III**

### **MARCO METODOLÓGICO**

#### **3.1 Metodología de la Investigación**

##### **3.1.1 Tipo de Investigación**

El estudio que se llevó a cabo se enmarcó en la modalidad de Proyecto Especial apoyado en una Investigación Documental. Los proyectos especiales son, según la UPEL (2003):

trabajos que lleven a creaciones tangibles, susceptibles de ser utilizadas como soluciones a problemas demostrados, o que respondan a necesidades e intereses de tipo cultural. Se incluyen en esta categoría los trabajos de elaboración de libros de texto y de materiales de apoyo educativo, el desarrollo de software, entre otros.

En este sentido, se ha ubicado el presente trabajo de grado dentro de esta modalidad ya que consiste en la elaboración de un libro impreso y su modelo en electrónico sobre el Análisis de Sistemas de Control, Lineales e Invariantes en el Tiempo con el fin de satisfacer los requerimientos planteados a través de los objetivos, permitiendo así contribuir con los procesos de enseñanza y aprendizaje del lector.

Según Arias, F. (1997), citado por Ramírez, W. (2003), la investigación documental: "es aquella que se basa en la obtención y análisis de datos provenientes de materiales impresos u otros tipos de documentos". Esta investigación consiste en la elaboración de un libro impreso y su modelo en electrónico sobre el Análisis de Sistemas de Control, Lineales e Invariantes en el Tiempo basado en la recopilación de información bibliográfica utilizando distintos documentos impresos y/o electrónicos relacionados con la Teoría de Control, Análisis de Sistemas Lineales, entre otras.

Adicionalmente, se plantearon al principio de este proyecto los objetivos que se esperan alcanzar, lo cual a la vez permite definir un poco más en profundidad el área que pretende abarcar este proyecto. Es necesario tener objetivos claros y precisos para lograr un buen resultado.

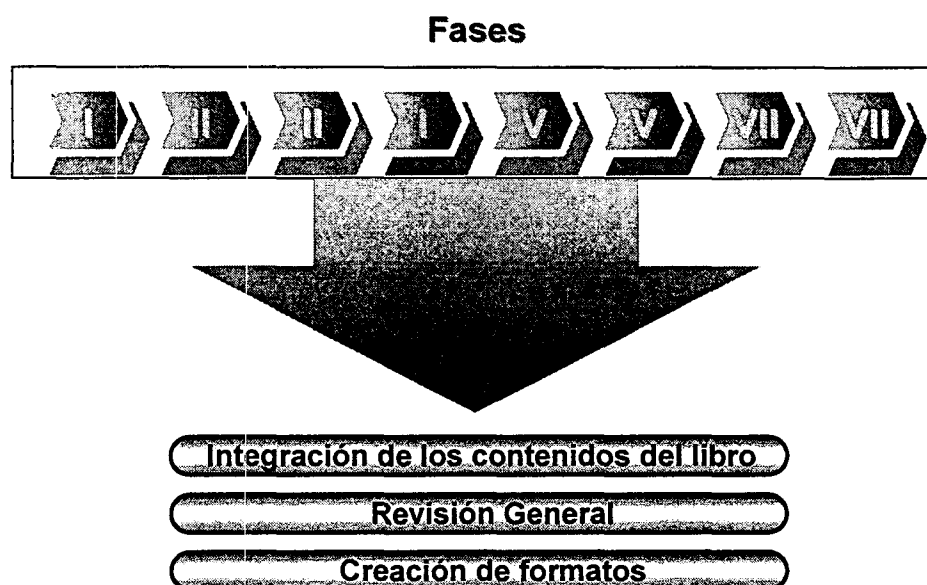
### **3.1.2 Fases Metodológicas de la Investigación**

Suárez (1991) afirma que:

Toda investigación científica se realiza a través de una metodología (...) Cuando hablamos de metodología, nos referimos al manejo racional de un conjunto de procedimientos (estrategias), métodos y técnicas que usados en forma dinámica y flexible, pueden canalizar acertadamente una investigación.



Para la realización de la presente investigación se llevó a cabo una serie de fases que, más allá de constituir un recetario para alcanzar un objetivo particular, se concibieron tal como lo menciona Suárez (1991), como vías de abordar las particularidades del problema, como pautas y diseño de estrategias que mejor facilitaran la explotación del problema planteado, a criterio propio.



*Figura 4. Fases de la Metodología.*

### **Fase I. Delimitación del Tema**

En primer lugar se seleccionó y delimitó el área temática objeto de estudio, el análisis de sistemas de control continuos, lineales e invariantes en el tiempo. Se requirió para ello abordar una documentación previa sobre cada uno de los aspectos considerados como fundamentales en el inicio del estudio de los sistemas de

control, desde el punto de vista de la creación de un material de soporte a los cursos básicos del área. Además, no se perdió de vista la posibilidad de que este proyecto pudiese ser complementado con algún otro proyecto en particular.

## **Fase II. *Selección y consulta de la información***

En esta fase, luego de haber efectuado una clara delimitación del tema, se realizó la búsqueda y recopilación de la información asociada a éste, vélgase mencionar: libros impresos y material en formato electrónico, constituyendo éstos la documentación que soportaría de inicio, la investigación. Según referencia empleada por Suárez (1991) de Amat, N. (1987), un documento para fines de una investigación documental, remite a “todo conocimiento fijado materialmente sobre un soporte, y susceptible de ser utilizado para consulta, estudio o trabajo”. La selección estuvo fundamentada en el conocimiento a priori de ciertas referencias bibliográficas y, su consulta estuvo limitada a la disposición material de tales recursos, en cuanto a los textos impresos se refiere. Por su parte, el material electrónico fue hallado por medio de búsquedas automáticas en Internet, nunca perdiendo de vista que la selección de este material se realizaría en base a criterios propios de validación de la información que éste presentaba.

### **Fase III. *Revisión de los contenidos programáticos y bibliográficos***

Esta fase complementó a la fase anterior con dos procesos adicionales de mucha importancia como lo fueron la validez y la confiabilidad de la información, entendidas éstas como la manera de evaluarlas y garantizar la veracidad de los contenidos a desarrollar, para su posterior clasificación.

El contenido programático del pensum de estudios de Ingeniería de Sistemas, opción Control y Automatización está formado por varias asignaturas relacionadas con la teoría de control de sistemas de control lineales; los diversos contenidos bibliográficos revisados, abarcan muchos de los temas de dichas asignaturas. A continuación se detallan las asignaturas relacionadas al área:

#### **Control 1**

##### ***Unidad I: Análisis de Sistemas Lineales***

- *Tema 1. Introducción a los Sistemas de Control.*
  - Antecedentes Históricos.
  - Sistemas en lazo abierto y Sistemas en Lazo cerrado.
  - Concepto de Realimentación, sensores, actuadores y elementos de control.
  - Aspectos metodológicos para el diseño e implantación de Sistemas de Control (funciones de transferencia, variable de estado, respuesta frecuencial, etc.).
  - Sistemas no lineales, linealización.
- *Tema 2. Respuesta temporal.*
  - Cálculo de errores en estado estacionario.

- Respuesta de un sistema de primer orden.
- Características de un sistema de segundo orden.
- *Tema 3. Estabilidad*
  - Estabilidad de los sistemas lineales usando la forma canónica de Jordan.
  - Relación entre estabilidad y autovalores.
  - Estabilidad por el método de Hurwitz.
  - Estabilidad por Lyapunov.
  - Método directo.
  - Segundo método de Lyapunov, funciones de Lyapunov.
- *Tema 4. Análisis mediante la técnica del lugar de las raíces*
  - Gráficas del lugar de las raíces.
  - Comandos del *Matlab*®.
  - Sistemas con retardos.
  - Contorno de las raíces.
- *Tema 5. Análisis en el espacio de estado*
  - Representación en el espacio de estado a partir de la función de transferencia.
    - Realización de una función de transferencia en formas canónicas.
    - (Controlable, Observable, Jordan, etc.).
    - Subespacios Controlable y Observables.
    - Descomposición de los sistemas lineales en subespacios controlable e incontrolable.
    - Descomposición de los sistemas lineales en subespacios observable e inobservable.
    - Forma Canónica de Kalman.
  - Solución de la ecuación de estado.
  - Controlabilidad.
    - Caracterización de los conceptos básicos de controlabilidad a través de la matriz Grammiana correspondiente.
    - Las matrices de Kalman.
    - El criterio de rango de Kalman para la controlabilidad.
    - Forma Canónica Controlable, Estabilizabilidad.
  - Observabilidad.

- Caracterización de los conceptos básicos de observabilidad a través
- de la matriz Grammiana correspondiente.
- Las matrices de Kalman.
- El criterio de rango de Kalman para la observabilidad.
- Forma Canónica Observabilidad, detectabilidad.

## **Control 2**

### ***Unidad II: Respuesta frecuencial de sistemas***

- *Tema 1.* Diagrama de Bode, interpretación de filtraje.
- *Tema 2.* Criterio de estabilidad de Nyquist.
- *Tema 3.* Estabilidad relativa; márgenes de fase y de ganancia.
- *Tema 4.* Sistemas con retardo, sistemas de fase mínima.
- *Tema 5.* Diagrama de Nichols.
- *Tema 6.* Funciones de transferencia PR y SPR, pasividad en sistemas lineales.

### ***Unidad III: Especificaciones de los sistemas de control en el dominio de la frecuencia***

- *Tema 1.* Relación entre las especificaciones temporales y frecuenciales.
- *Tema 2.* Ancho de banda.
- *Tema 3.* Seguimiento.
- *Tema 4.* Rechazo de perturbaciones.
- *Tema 5.* Sensibilidad.
- *Tema 6.* Estabilidad robusta.

### ▪ **Fase IV. *Análisis de la Información de los contenidos***

Analizar la información de los contenidos se refiere al estudio, contraste y asociación de los contenidos hallados en aquellas referencias catalogadas como de mayor validez y que se

relacionaban con los intereses de crear contenidos para la constitución de un material de apoyo al estudio en el área. Para este análisis se empleó como base, el contenido del p<sup>é</sup>nsu<sup>m</sup> de estudios, referenciado en la fase anterior. Esta fase condujo, entonces, al establecimiento del contenido temático del libro que, en fases posteriores, sería desarrollado. La definición del contenido temático estableció a su vez, la manera en la cual estaría estructurado: capítulos, secciones y sub-secciones.

▪ **Fase V. *Desarrollo de Contenidos***

La búsqueda de la información necesaria para desarrollar cada una de las divisiones que constituirían la estructura definida para los contenidos, fue el paso inicial en esta fase. Fue efectuada para alcanzar el desarrollo de los contenidos de dichas divisiones. El desarrollo, propiamente dicho, fue abordado por medio del análisis e interpretación de la información contenida en la documentación seleccionada para una posterior redacción.

▪ **Fase VI. *Redacción y revisión de los contenidos***

La redacción, en esta fase, fue abordada tal como Suárez (1991) define al proceso de condensación de información, a la traducción de un documento analizado a un nuevo lenguaje, sólo que en esta fase,

haciendo una compilación de los análisis e interpretaciones efectuados sobre cada documento catalogado para el desarrollo de cada división particular. Se procedió así a redactar los contenidos del libro y a transcribirlos directamente en un documento digital. Como es de suponerse, de acciones humanas como lo es la redacción, surgen revisiones y correcciones de los contenidos ya sea de forma (enunciados, ortografía, gramática, entre otros) o de fondo; en esta etapa de la fase, se analizó el sentido (denotación y connotación) de los contenidos escritos. Además, se dio lugar a los siguientes pasos:

- Re-lectura, que permitiera la revisión del contenido redactado.
- Análisis de fondo y forma de los contenidos, que determinara si estas características se encontraban en concordancia con lo que se pretendía expresar y con el resto de los contenidos desarrollados. Este paso permitió la determinación de abordar acciones correctivas del contenido en desarrollo y de retomar estos pasos para la verificación de la nueva redacción.
- Correcciones, que permitieran “amoldar” el contenido de acuerdo a las características de fondo y forma que realmente se le pretendían dar.

- **Fase VII. *Elaboración de los modelos empleados en los ejemplos***

En esta fase se definieron los modelos que permitieran ilustrar, al lector, el tema en estudio. Los modelos creados son de carácter teórico, lo cual implica que no están asociados a ningún sistema físico. A la mayoría de los contenidos teóricos desarrollados, se le fue asociado un modelo de estos, de manera que complementara la técnica de análisis que se presentaba en cada división. Al igual que la fase anterior se procedió a la redacción y revisión de los ejemplos desarrollados. Por su parte, la redacción de los ejemplos desarrollados, implicó no sólo una narración paso a paso de cómo fue abordado cada uno de ellos, sino el uso de las figuras y expresiones matemáticas que mejor ilustraran lo que la narración no es capaz de expresar.

- **Fase VIII. *Utilización de herramientas computacionales gráficas***

Esta fase no se aplicó para todos los contenidos del libro, sólo se abordó en aquellos casos donde se necesitaban realizar comparaciones con las herramientas gráficas obtenidas de la aplicación de los métodos y técnicas de análisis, con el fin de validarlas. Para el caso particular de este proyecto, se empleó como herramienta computacional principal, el software *Matlab*® el cual,



pese a ser comercial, es muy conocido por estudiantes e investigadores del área por sus grandes potencialidades. Particularmente para el caso donde las ventajas electrónicas pueden ser aprovechadas al máximo, el *e-book*, se desarrollaron además, en algunos ejemplos de las herramientas gráficas de análisis, animaciones que permitieran ilustrar paso a paso cómo alcanzar la construcción de las mismas. Para ello, se seleccionó una segunda herramienta computacional: *Windows Movie Maker*® v. 5.1, como alternativa más directa, pero sobre la cual no se efectuó evaluación alguna.

Estas fases se realizaron para cada una de las divisiones contenidas en los distintos capítulos del libro. Luego de desarrollar todos los contenidos del libro, se procedió a la integración de los mismos bajo ciertos formatos de diseño de acuerdo a la versión del libro (impresa o electrónica).

- a. Libro impreso: se efectuó un proceso de edición e impresión. La edición fue efectuada en Microsoft Word 2003 ®, software en el cual se realizó la transcripción. Este paso constituyó la definición de formatos de letra, tamaño de figuras, disposición de títulos y ecuaciones dentro del contexto, de manera uniforme para todos los contenidos.

- b. Libro electrónico: se efectuó un proceso de conversión electrónica del documento digital editado para el libro impreso, al formato que definiría sus propiedades de libro electrónico. Una vez convertido el documento, se le adicionaron hipervínculos a las referencias textuales realizadas dentro de los contenidos desarrollados, que ofrecieran al lector el acceso automatizado a cada elemento de referencia.

El formato del libro electrónico fue seleccionado como consecuencia de las bondades que ofrece el *software* de creación y visualización del mismo. Para ello se realizaron:

- i. Búsquedas informativas en Internet sobre los recursos más empleados para la creación y visualización de los formatos.
- ii. Comparaciones entre las características que cada uno de estos formatos ofrece al lector, considerando entre ellas, la disponibilidad y popularidad dentro del grupo de usuarios a quienes se dirige el libro, así como las herramientas de lectura y tipo de interfaz que les ofrece.
- iii. Revisiones sobre qué tipo de *software* se hacía necesario para la conversión electrónica de cada formato particular y su facilidad de uso.

## **CAPÍTULO IV**

### **RESULTADOS**

#### **4.1 Resultado de la Investigación**

A través de la metodología explicada en el capítulo anterior se logró llevar a cabo el objetivo de este Trabajo de Grado: la elaboración de un libro impreso y su modelo en electrónico sobre el Análisis de Sistemas Control, Lineales e Invariantes en el Tiempo.

El libro está organizado en siete capítulos, el cual va dirigido a una gran variedad de personas, el único requisito que contempla es tener conocimientos básicos de álgebra lineal y cálculo numérico. Su contenido es el siguiente:

#### **Capítulo 1 Introducción a los Sistemas de Control**

- 1.1 Introducción
- 1.2 Sistemas lineales, causales e invariantes en el tiempo
- 1.3 El problema de control
- 1.4 Elementos básicos de un sistema de control
- 1.5 Sistemas de control en lazo abierto y en lazo cerrado
- 1.6 Criterios u objetivos de los sistemas de control realimentados

#### **Capítulo 2 Modelos Dinámicos de Sistemas Lineales Invariantes en el Tiempo**

- 2.1 Introducción

- 2.2 Transformada de Laplace
- 2.3 Modelos de entrada - salida
- 2.4 Diagramas de Bloques
- 2.5 Diagramas de flujo de señal
- 2.6 Modelo en el espacio de estados
- 2.7 Representación de las ecuaciones de estado en el dominio del tiempo
- 2.8 Diagrama de bloques del modelo de estados
- 2.9 Representación de las ecuaciones de estado en el dominio del tiempo
- 2.10 Diagrama de Bloques del Modelo de Estado
- 2.11 Relación entre la Ecuación de Estado y la Función de Transferencia
- 2.12 Realización

### **Capítulo 3 Análisis de Sistemas de Control en el Dominio del Tiempo**

- 3.1 Introducción
- 3.2 Polos y Ceros de la Función de Transferencia Modelos de entrada - salida
- 3.3 Respuesta Transitoria de Sistemas de Primer Orden
- 3.4 Estudio de la rapidez y la precisión de los sistemas de primer orden
- 3.5 Respuesta Transitoria de Sistemas de Segundo Orden
- 3.6 Especificaciones de diseño en función de los Polos
- 3.7 Respuesta Transitoria de Sistemas de Orden Superior
- 3.8 Error en Estado estacionario

### **Capítulo 4 Análisis de Sistemas de Control en el Dominio de la Frecuencia**

- 4.1 Introducción
- 4.2 Respuesta en frecuencia
- 4.3 Diagramas polares
- 4.4 Diagrama de Bode
- 4.5 Especificaciones de la respuesta en frecuencia

### **Capítulo 5 Análisis de Estabilidad de Sistemas Lineales**

- 5.1 Introducción
- 5.2 Estabilidad
- 5.3 Criterio de estabilidad de Routh – Hurwitz
- 5.4 Criterio de estabilidad de Nyquist
- 5.5 Estabilidad relativa
- 5.6 Estabilidad – diagrama de Bode
- 5.7 Estabilidad – sistemas de fase no mínima

## **Capítulo 6 Análisis de sistemas de control en el dominio del tiempo**

- 6.1 Introducción
- 6.2 Definiciones básicas
- 6.3 Concepto de Controlabilidad
- 6.4 Concepto de observabilidad
- 6.5 Formas canónicas

## **Capítulo 7 Análisis de Sistemas de Control utilizando el Lugar Geométrico de las Raíces**

- 7.1 Introducción
- 7.2 Lugar Geométrico de las Raíces
- 7.3 Construcción del Lugar Geométrico de las Raíces (L.G.R.)
- 7.4 Lugar geométrico de las raíces para sistemas con realimentación positiva
- 7.5 Estabilidad utilizando el Lugar Geométrico de Las Raíces
- 7.6 Efecto de la adición de polos y ceros a la función de transferencia

A grandes rasgos el contenido de cada capítulo es el siguiente: El Capítulo 1 proporciona una introducción e historia básica sobre los sistemas de Control. El Capítulo 2 trata de los desarrollos de los modelos matemáticos de estos sistemas y desarrolla modelos mediante la función de transferencia y el espacio de estados. El Capítulo 3 trata del análisis de los sistemas lineales en el dominio del tiempo para sistemas de primer orden, segundo orden y sistemas de orden superior. El Capítulo 4 se enfrenta con el análisis de respuesta en frecuencia de los sistemas de control. Analiza los diagramas de Bode, los diagramas polares, entre otros puntos. El Capítulo 5 proporciona el análisis de estabilidad y se describen algunos criterios (Routh - Hurwitz, Nyquist y Bode) utilizados en estos análisis. En el Capítulo 6 se estudia la controlabilidad y observabilidad de los sistemas lineales e

invariantes en el tiempo y las formas canónicas controlable y observable y el Capítulo 7, aborda la construcción del lugar geométrico de las raíces y el análisis de estabilidad a través de este método.

Algunos de los ejemplos presentados en este libro fueron desarrollados utilizando la herramienta computacional *Matlab*®, a modo de verificación y comparación entre los diagramas efectuados manualmente y los efectuados en *Matlab*®. A su vez, se ofrece al lector códigos en *Matlab*® documentados y detallados en los anexos del libro. También se presenta como anexo, a modo de referencia para el lector, una tabla con los comandos básicos de la librería de control para la mejor comprensión de los códigos.

El uso de herramientas computacionales es muy importante en el análisis, diseño y simulación de sistemas de control, ya que se obtienen gráficas con mayor precisión y mejores resultados en un tiempo óptimo y a menor costo de cálculo que las simulaciones realizadas de forma manual.

El libro está orientado a dar a conocer al lector las bases teóricas que se requieren para lograr un buen diseño de control. Se seleccionó un formato estándar para todo el contenido de la versión impresa del libro con el fin de realizar una presentación agradable al lector. La información del libro se presenta de una forma clara y organizada con apoyo en recursos como ilustraciones, diagramas, tablas y ejemplos, que además de hacer atractivo el contenido del libro, sirven de apoyo y complemento al texto.

En la versión electrónica se seleccionó un formato estándar de fácil lectura en la pantalla y luego se procedió a la conversión al formato electrónico. Se realizó la edición de los hipervínculos que permiten crear relaciones entre elementos dentro del texto como el llamado a una figura, ecuación, un enlace a otro capítulo, entre otros. Una de las potencialidades de esta versión son las presentaciones que se diseñaron en *Windows Movie Maker*®, las cuales permiten visualizar paso a paso la construcción de las herramientas gráficas de análisis como son los diagramas de Bode, Nyquist, lugar de las raíces.

Con la versión impresa y electrónica del libro, se requiere del apoyo de un grupo interdisciplinario de expertos en el contenido de la materia, diseñadores gráficos, editores, entre otros expertos con el objetivo de obtener un buen ejemplar que a futuro se logre publicar no sólo como un recurso informativo, sino con fines educativos en donde se logre promover los procesos de aprendizaje del lector.

#### **4.2 Impacto esperado de la investigación**

Regularmente los libros impresos son textos estáticos en donde el lector se apropia del conocimiento a través de la estructura en que están diseñados. Muchas veces estos materiales poseen grandes cantidades de información donde en ocasiones el desarrollo del tema pierde el enfoque directo, haciendo más compleja la asimilación de los métodos y técnicas de análisis. Con la versión electrónica se rompe la rigidez de estos libros y se logra que el lector construya su propio conocimiento a través de los hipervínculos y de las animaciones diseñadas

en *Windows Movie Maker*®, las cuales permiten guiar al lector de una manera directa y sencilla en la construcción de los métodos gráficos de análisis.

La simulación en el estudio de sistemas de control es una herramienta muy útil. Matlab® se ha venido destacando como una de estas herramientas computacionales; ha desarrollado desde algunas versiones anteriores una librería de funciones dedicadas al estudio de los sistemas de control (*control toolbox*), abarcando entre ellas, la generación de las gráficas mas empleadas en el análisis, por ejecución de comandos. Las dos versiones del libro pretenden, además de guiar los aprendizajes teóricos y el trazado manual de estas gráficas, estimular al lector al uso de este tipo de herramientas, sin desatender los fundamentos de análisis que ellas significan.



## **CAPÍTULO V**

### **CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

#### **5.1 Conclusiones**

El hombre a lo largo del tiempo, ha encontrado nuevas y mejores maneras de resolver los problemas que se le presentan y de satisfacer sus necesidades; es así como ha aplicado sus conocimientos en diversas áreas como lo es la ingeniería. El análisis de los sistemas de control forma parte de esta área, la cual fue el objeto de estudio en esta investigación.

A través de este Trabajo de Grado, se lograron alcanzar los objetivos planteados y se creó un libro impreso y su versión electrónica sobre el Análisis de Sistemas de Control, Lineales e Invariantes en el Tiempo con el fin de ofrecer una herramienta de soporte al estudiante local, lo cual contribuye en sus procesos de enseñanza – aprendizaje y a su vez sea un aporte a las Instituciones de Educación Superior.

El contenido del libro sobre Análisis de Sistemas de Control, Lineales e Invariantes en el Tiempo, fue desarrollado de manera tal de ofrecer al lector un recurso para apoyar y sustentar sus conocimientos sobre el Análisis. Esta información fue presentada bajo dos formatos distintos, sin embargo, difieren entre sí la manera de

presentarla, lo cual ofrece al lector la posibilidad de seleccionar el formato que más le convenga según su criterio.

Con la incidencia de la tecnología, en los cursos a distancia se ha abierto una nueva área multidisciplinaria de investigación y desarrollo, que además del interés científico y técnico que conlleva, tiene grandes perspectivas de aplicación debido a la gran demanda de capacitación a nivel nacional que el proceso de modernización requiere, y que no es posible cubrir con los métodos tradicionales de enseñanza. Con la creación del *ebook* se tiene una herramienta útil para la enseñanza de estos cursos a distancia, los cuales permiten una flexibilidad en términos de disponibilidad.

Gracias al uso de herramientas computacionales como Matlab®, se ofrece al lector un medio para la adquisición de conocimientos permitiéndole hacer comparaciones y verificaciones de los métodos y técnicas que se utilizan para el trazado manual. Por otra parte, la adición de animaciones al formato electrónico fue un recurso empleado para complementar la ilustración de los métodos de construcción de las herramientas gráficas de análisis, considerado esto como un valor agregado a la presentación del contenido.

El hipertexto, los materiales multimedias, la educación a distancia y todas las nuevas tecnologías de la información, aún no se sabe con certeza a donde nos llevarán; sin embargo el reto educativo está en aprovechar estos nuevos escenarios para lograr potenciar nuestros conocimientos.

Las tecnologías ayudan al crecimiento económico, educativo, cultural, entre otros de un país, es importante tener en cuenta que no toda aplicación tecnológica da iguales resultados en diferentes contextos, el éxito depende tanto de una buena selección de recursos tecnológicos como de los modelos y metodologías que se emplean para desarrollar los contenidos.

Con el uso de herramientas computacionales como *Matlab*®, se logra que el lector adquiera conocimientos y puede realizar comparaciones y verificaciones de los métodos y técnicas que se utilizan para el trazado manual.

El hipertexto, los materiales multimedia, la educación a distancia y todas las nuevas tecnologías de la información, aún no se sabe con certeza a donde nos llevarán; sin embargo el reto educativo está en aprovechar estos nuevos escenarios para lograr potenciar nuestros conocimientos.

## **5.2 Recomendaciones**

Son muchas las expectativas que se generan luego de terminar un proyecto. El principal reto que se quisiera lograr a través de este proyecto es lograr que el libro sea un recurso didáctico que sirva de apoyo y formación a estas y nuevas generaciones; para ello es necesario que los contenidos del libro se revisen por personas expertas en el área. Sería recomendable, entonces, utilizar recursos de evaluación que permitan, a estos expertos, la calificación de los contenidos de una manera estandarizada. Lo más idóneo es que estos recursos fuesen diseñados

por el equipo del proyecto general al cual pertenece esta investigación en particular, con base a estrategias de evaluación estandarizadas.

El fin de realizar las revisiones y correcciones posteriores de los contenidos del libro, es lograr la publicación y distribución de ambos formatos de presentación: impreso y electrónico. Este proyecto se complementa con el libro de Diseño de Sistemas de Control Continuos, Lineales e Invariantes en el Tiempo, por lo tanto, como recomendación al equipo de este proyecto general, se sugiere la uniformización de formatos y redacción.

Se espera que este proyecto constituya un recurso completo para el estudio del Análisis y Diseño de Sistemas de Control, Lineales e Invariantes en el Tiempo que muy bien pueden ser un excelente material de apoyo que promuevan los procesos de enseñanza – aprendizaje del estudiante local, sin pretensión de desplazar el uso de los textos tradicionales en el área. Se recomienda que se incentive a abordar proyectos similares que contribuyan a complementar el contenido del libro con otras técnicas y enfoques, además a la búsqueda de otras alternativas en cuanto al uso de herramientas computacionales se refiere, de manera que redefina su portabilidad entre sistemas operativos distintos y alivie el problema del uso de *software* comercial. Otra posibilidad considerable al momento de abordar proyectos similares, es el planteamiento de propuestas más abiertas a cubrir las necesidades de los planes de educación a distancia, por medio de presentación de los contenidos ya no de una manera técnica como la categoría dentro de la

cual se enmarcan los libros desarrollados en esta investigación, sino más orientada hacia la preparación de cursos interactivos.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Álvarez, Delia y otros. "Historia de la Escritura, Evolución y Tipos. Introducción". [Página web en línea]. Disponible en: <http://centros5.pntic.mec.es/ies.arzobispo.valdes.salas/alumnos/escr/intro.html>
- Athabasca University. "Theory and Practice of Online Learning". Consultado en Octubre, 2004 en: [cde.athabascau.ca/online\\_book](http://cde.athabascau.ca/online_book)
- Chapter 1: Introduction to Modern Control Theory, in: *F.L. Lewis, Applied Optimal Control and Estimation* (Reprinted by permission). [Página web en línea]. Disponible en: <http://www.theorem.net/theorem/lewis1.htm>
- DORF, RICHARD C. Modern control systems. Addison-Wesley. Reading, Mass, c1992. ISBN : 0-2016-0701-8
- GALVIS, ALVARO,. Ingeniería de Software Educativo (1ª edición). Universidad de Los Andes, Santafé de Bogotá, Colombia. 1992
- MINTZER, F., BOYLE, L. Cazes, A., Christian, B. Cox, C. Toward on-line, worldwide access to Vatican Library materials. IBM. Journal in research and development. 40, 2 (march), 139-159. 1996
- NISE, NORMAN S. Control systems engineering. The Benjamin/Cummings Publishing Company. Redwood City, c1992. ISBN : 0-8053-5420-4
- OGATA, KATSUHIKO. Modern control engineering. Prentice-Hall International. Englewood Cliffs, N. J., c1990. ISBN : 0-13-598731-8
- ORTIZ, LAURIE. "El Libro Electrónico, Nueva Versión de un Antiguo Medio." [Página web en línea]. Disponible en: <http://rayuela.uc3m.es/~ann/LIBRO10.htm>.

- RAMÍREZ, W. "Estrategia Gerencial para Registrar y Controlar el Proceso de Totalización Electoral del Consejo Nacional Electoral a través de la WEB". [Página web en línea]. Disponible en:  
[http://es.geocities.com/wilmer\\_ramirez/seminario/cap\\_iii.htm](http://es.geocities.com/wilmer_ramirez/seminario/cap_iii.htm)
- RODRÍGUEZ-ILLERA, J. "La lectura electrónica". [Página web en línea]. Disponible en:  
<http://www.ingenta.com/isis/searching/Expand/ingenta?pub=infobike://fias/cye/2003/00000015/00000003/art00002>
- SUÁREZ, NIRIA. La Investigación Paso a Paso. Universidad de Los Andes, Consejo de Publicaciones. Mérida, Venezuela. 1991.
- Universidad Pedagógica Experimental Libertador –UPEL. Manual de Trabajos de Grado de Especialización y Maestría y Tesis Doctorales (3ª edición). Caracas: FEDUPEL. 2003.