

**DISEÑO DE UN SISTEMA DE CONTROL ROBUSTO PARA ESTABILIZACION DE ALTITUD DE UN
MISIL TIERRA-TIERRA**

JULIO ANDRES BARRANTES

CRISTIAN JAVER CERQUERA

UNIVERSIDAD DISTRITAL FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS

FACULTAD TECNOLÓGICA

INGENIERIA MECÁNICA

BOGOTÁ

2012

**DISEÑO DE UN SISTEMA DE CONTROL ROBUSTO PARA ESTABILIZACION DE ALTITUD DE UN
MISIL TIERRA-TIERRA**

JULIO ANDRES BARRANTES

CRISTIAN JAVIER CERQUERA

PRESENTADO A:

PROYECTO CURRICULAR DE INGENIERIA MECÁNICA

UNIVERSIDAD DISTRITAL FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS

FACULTAD TECNOLÓGICA

BOGOTÁ

2012

Tabla de contenido

1. INTRODUCCION	1
2. ASPECTOS CIENTÍFICO-TÉCNICOS	2
2.1. EL PROBLEMA Y OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN	2
2.2. ANTECEDENTES Y REVISIÓN DEL CONOCIMIENTO DISPONIBLE	2
2.3. JUSTIFICACIÓN. CONVENIENCIA SOCIAL O ECONÓMICA DE LA INVESTICACION	5
2.4. FORMULACIÓN CLARA Y PRECISA DEL PROBLEMA DE LA INVESTIGACIÓN	6
2.5. TIPO DE INVESTIGACIÓN Y LIMITACIONES QUE SE TENDRAN	6
2.6. OBJETIVOS GENERALES Y ESPECÍFICOS QUE SE PERSIGUEN CON LA INVESTIGACIÓN	7
2.6.1.OBJETIVO GENERAL	7
2.6.2.OBJETIVOS ESPECÍFICOS	7
2.7. RESULTADOS ESPERADOS DE LA INVESTIGACIÓN	7
3. METODOLOGÍA GENERAL	8
4. MARCO TEÓRICO DENTRO DEL CUAL SE CONCIBE Y ADELANTARA LA INVESTIGACIÓN	9
4.1. CAD-FUNCIONES DEL MODELADO Y PARADIGMAS DE DISEÑO	9
4.2. PARADIGMAS DE DISEÑO	9
4.3. ERGONOMÍA	12
5. DEFINICIÓN DE LOS DIFERENTES CONCEPTOS Y VARIABLES QUE SE EMPLEARAN	14
6. HIPÓTESIS O PAUTAS QUE GUIARAN LA INVESTIGACIÓN	15

7. INDICACIÓN DEL UNIVERSO, LA POBLACIÓN Y LA MUESTRA CON LOS CUALES SE TRABAJARA	
	15
8. PROCEDIMIENTOS Y TÉCNICAS PARA LA RECOLECCIÓN DE LA INFORMACIÓN	
	16
9. ASPECTOS DE LA ADMINISTRACIÓN Y CONTROL	
	17
9.1. CRONOGRAMA DE ACTIVIDADES	
	17
9.2. PRESUPUESTO DE LA INVESTIGACIÓN	
	18
10. ASPECTOS INFORMATIVOS SOBRE LA INFRAESTRUCTURA DISPONIBLE	
	18
10.1. HOJA DE VIDA DEL ASESOR	
	18
10.2. INFORMACIÓN GENERAL SOBRE LA INSTITUCIÓN O EMPRESA DONDE SE REALIZARA LA INVESTIGACIÓN	
	18
11. ANEXOS	
	19
11.1. BIBLIOGRAFÍA REFERENCIADA	
	19
11.2. BIBLIOGRAFÍA CONSULTADA	
	20

DISEÑO DE UN SISTEMA ROBUSTO PARA ESTABILIZACION DE ALTITUD DE UN ROCKET.

1. Introducción.

La construcción de misiles en la actualidad sigue siendo un área en la que incursionan unas cuantas naciones, generalmente las que se consideran de primer mundo o desarrolladas, la fabricación en un vehículo de este tipo ha tenido muy poco desarrollo en Colombia o no tanto como se debería, este problema que no solo es de área armamentista, es un interesante tema de estudio en las ingenierías, ya que se abordan variedad de temas desde diferentes puntos de vista, tales como, termodinámico, mecánica de fluidos, sistemas de control, resistencia de materiales, y otros más que no solo se encierran en una sola ingeniería; más bien en la que una forma de ingeniería convergente es la forma adecuada de abordar este dispositivo. De todos los problemas que se presentan al diseñar un elemento aéreo de este tipo, los sistemas de control son parte fundamental debido a que mayoría de misiles no son tripulados ni pilotados, por el contrario se intenta que sean dispositivos autónomos en los que la tarea a cumplir por parte del misil sea de una forma simplificada y lo más automatizada posible.

Dentro de todos los sistemas automatizados que podemos encontrar en un elemento de este tipo, podemos encontrar los que se encargan de mantener estable la trayectoria de vuelo del rocket después de que este ha conseguido una altura de vuelo predeterminada y una velocidad crucero. El diseño de un misil alrededor de su centro de gravedad y su centro de presión donde las fuerzas aerodinámicas hacen efecto, no es suficiente para que tenga una trayectoria de vuelo adecuada, esto se debe a que las condiciones climáticas por donde transcurre la trayectoria del misil, no son constantes por tanto cualquier perturbación, ya sea de pequeñas proporciones y que sean relativamente predecibles u otras en las cuales sea imposible conocer la intensidad con la cual se presentaran y en qué tiempo o lugar. Hace que la implementación de un sistema de control sea imprescindible, sin embargo los sistemas de control son un área de la ingeniería bastante extensa a partir de la cual se requiere un análisis minucioso para escoger el sistema de control adecuado para las necesidades que necesitamos en el misil.

Debido a que para escoger una solución adecuada al problema, primero se necesitan algunos datos iniciales con los cuales acotar los límites del sistema. Entre ellos encontramos: las dimensiones del misil, el modo de propulsión con sus diferentes variantes, la investigación de los diferentes aspectos aerodinámicos que influyen en el vuelo en un dispositivo de este tipo, entre otros. Y así de esta forma entrever los diferentes inconvenientes del misil en lo que respecta a su estabilidad en el aire, de esta el sistema de control que se utilizara se adecuara de la mejor forma a las diferentes variables que se manejaran.

Se espera que una investigación de este tipo nos tome aproximadamente de seis a ocho meses, debido a que la recolección de información es compleja, además de comprender la dinámica de un dispositivo de este tipo de la forma a adecuada para que, los resultados esperados sean lo más fiables posibles. Sin embargo a parte del trabajo autónomo por parte

de los realizadores, es necesaria la asesoría de personal adicional con mayor experiencia y conocimiento en el área, y en consecuencia es posible que el avance de la investigación se condicione también a la disponibilidad de tiempo del asesor, además de los costos asociados a material de investigación como libros, fotocopias y uso de software el cual es primordial para el avance del proyecto.

2. Aspectos científico-técnicos.

2.1 El problema y objetivos de la investigación:

Dentro del contexto de los vehículos aéreos más específicamente los no tripulados, la precisión de sus trayectorias ha sido un problema difícil de superar, la utilización de sensores que perciban el entorno por el cual vuela este dispositivo y el uso de software y hardware que procese adecuadamente esta información con el fin corregir, si es necesario la posición del vehículo. En el contexto colombiano el desarrollo de este tipo de tecnologías puede considerarse como un avance en el campo de sistemas de automatización industriales en vehículos y sistemas de producción industriales.

El demostrar que se pueden sintetizar sistemas de control de calidad, en vehículos aéreos en los cuales la reacción de los elementos de estabilización son clave para la correcta trayectoria. Puede mostrar que la tecnología colombiana podría desarrollar dispositivos comerciales aplicables al ámbito industrial, de la manufactura, de vehículos y armamentista.

2.2 Antecedentes y revisión del conocimiento disponible:

Desde la perspectiva de los problemas en los que es útil por no decir necesaria la utilización de sistemas de control, Morales y otros¹ proponen la implementación de sistemas de control proyectivo, lógica difusa y sistemas de control óptimo en H_v en un estabilizador de sistemas de potencia con el fin de aumentar la estabilidad y mejorar la respuesta de un sistema multimaquina mediante la simulación a partir de dos generadores conectados a una barra infinita con los cuales se demuestran estabilización del sistema mediante las técnicas antes propuestas a diferencia del rendimiento de un sistema convencional .

En este documento se menciona la complejidad que supone el control de los sistemas eléctricos de potencia, debido a que se necesita de ellos una operación fiable y económica con un alto grado de seguridad con condiciones muy cercanas a los límites de estabilidad. El inconveniente que presenta la implementación de técnicas de sintonización coordinada de estabilizadores para sistemas multimáquinas es que la utilización del método de sintonización secuencial de compensadores de adelanto o atraso de fase disminuye la necesidad de encontrar los modelos suficientemente precisos. El análisis de la presencia de perturbaciones, el desconocimiento en los parámetros del sistema, la aleatoriedad de las condiciones de operaciones, entre otras. Que dificultan la implementación de un nuevo

¹ Morales, F., Cipriano, A., Rudnick, H. (2002). Control Robusto en Sistema de Potencia multimaquinas utilizando lógica difusa y teorías de control H_v y control proyectivo. Facultad de Ingeniería. Santiago: Pontificia universidad católica de Chile.

sistema de estabilización. Pero con la implementación de los sistemas de control robusto se reduciría la energía en las señales reguladas producto de perturbaciones exógenas y se incrementaría la estabilidad a perturbaciones pequeñas en un gran rango de condiciones de operación.

Otra área en la que se han hecho estudios similares, son los vehículos voladores autónomos en tres ejes, en un trabajo de la Universidad Nacional de Colombia,² con el cual se pretendía crear implementar sistemas de control adecuados para el vehículo aéreo mejorando los motores de los cuales ya se tenía referencia previa y en el cual se buscaba la reducción de peso y aumento de potencia, a partir de la implementación de sistemas control robusto en la velocidad de los motores Brushless. Con los cuales se logro poner en movimiento este tipo de motores y dispositivos con una programación simple del esquema de lazo abierto.

Como se puede ver el área de los sistemas de control, se extiende por múltiples áreas tecnológicas, esto se puede observar en el documento Aplicación de la técnica H2 de control Robusto a un sistema de levitación magnético bajo condiciones de incertidumbre³ en los cuales se buscaba diseñar un controlador PID que cumpliera con las restricciones de estabilidad robusta y minimice el índice de desempeño H2, en las que se concluyo que la utilización de un controlador robusto reduciría ampliamente el error cuando existieran perturbaciones en cualquier sistema .

La utilización de controladores robustos, en el área de la robótica tiene un uso intenso y primordial, como se demuestra según Scaglia, G.,⁴ y otros en el cual se propone el control de un robot móvil utilizando un modelo lineal con incertidumbre, con la utilización de un controlador basado en la teoría de Control Robusto, de esta forma encontraron un rendimiento aceptable y fácil de implementar.

La utilización de sensores en los sistemas de control, en el documento titulado “Control difuso de vehículo volador no tripulado”⁵, en los cuales se utilizan circuitos electrónicos de última tecnología, y consisten generalmente para vehículos aéreos en: un sensor de presión diferencia para captar la rapidez del avión mediante un tubo de Pitot, un sensor de presión absoluta para obtener la altitud del avión con un cierto margen de error en todo el rango de operación, y un sonar ultrasónico para obtener la distancia a tierra. La información de los sensores se procesa con circuitos lineales y microprocesadores especialmente programados, y la salida se envía en forma digital mediante ondas de radio a un computador en tierra. El sistema de control analiza la información proveniente de los sensores y las restricciones impuestas por las necesidades del vuelo, para generar las variables manipuladas que

² Cotte, J.M., Moreno, F.A., (2010). Diseño de control robusto de velocidad de motores brushless para robótica aérea. Facultad de Ingeniería. Bogotá: Universidad Nacional de Colombia

³ Mejia, H.F., (2009). Aplicación de la técnica H2 de control robusto a un sistema de levitación magnético bajo condiciones de incertidumbre. Facultad de ingenierías Eléctrica, Electrónica, Física y ciencias de la computación. Pereira: Universidad Tecnológica de Pereira.

⁴ Scaglia, G, J., Mut, V,A., Postigo, J,F.,(2010). Control de robots moviles aplicando tecnicas de control robusto. San Juan, Argentina: Universidad Nacional de San Juan

⁵ Abusleme, C, A., (2009). Control difuso de vehículo volador no tripulado. Santiago de Chile, Chile: Pontificia Universidad Catolica de Chile

corresponden a la potencia del motor y la deflexión de los elevadores, cuyos valores se transmiten al avión utilizando su radiocontrol.

Normalmente en los sistemas de control se consideran diversas estrategias de control en el caso nombrado, se tomaron como opciones: el control PID, control difuso y control híbrido, una combinación entre PID y difuso. El comportamiento obtenido con las tres estrategias se comparará por simulación, empleando un modelo matemático del avión desarrollado para diferentes condiciones de vuelo, y haciendo volar el avión en forma experimental bajo diferentes condiciones.

En el caso colombiano, según Aponte, J. y otros⁶, el desarrollo tecnológico aeronáutico en Colombia, se ha orientado al diseño y desarrollo de motores de reacción de propelente sólido; sin embargo, son pocos los trabajos encaminados al control de cohetes, y se considera éste, un tema en constante desarrollo que involucra técnica de control convencionales, y modernas como los algoritmos genéticos, entre otras.

En las trayectorias aéreas, existen dos aspectos fundamentales que garantizan el seguimiento de una ruta, propuesta en el planteamiento de la misión; el primer aspecto tiene que ver con la estabilidad (evitar que comience a girar sobre su centro de gravedad), que se logra, ubicando el centro de presiones más cerca de la cola que el centro de gravedad; el segundo aspecto está relacionado con la capacidad del cohete para seguir la trayectoria planeada, lo cual se logra mediante un sistema de control.

Las estrategias de control comúnmente utilizadas en la aeronáutica, son el control pasivo y el activo. La primera de estas estrategias se caracteriza por ubicar elementos fijos en el aeroplano para estabilizar el dispositivo, trabajando adecuadamente cuando se logra un movimiento relativo entre el aeroplano y una masa de aire. La segunda estrategia utiliza elementos móviles, capaces de corregir la trayectoria en función de parámetros preestablecidos, involucrando un sistema de control; algunos de los más utilizados son: voletas, aletas móviles, canards, toberas giratorias (empuje vectorial), y motores auxiliares.

En el estudio de los sistemas de control robusto en “Una herramienta para el diseño de controladores robustos”⁷, plantea el problema de diseñar sistemas de control realimentados robustos, en los cuales una solución válida sería obtener una ley de control que mantenga la respuesta del sistema y la señal de error dentro de límites preestablecidos, a pesar del efecto de las incertidumbres en el sistema. Durante el proceso de diseño, estas consideraciones, presentan gran dificultad al diseñador. A pesar de la existencia de múltiples herramientas de cálculo, no es fácil la interpretación o la toma de decisiones frente al proceso realizado.

Para este tipo de proyecto se utilizó el programa MATLAB, que cuenta con una herramienta de diseño de interfaces gráficas GUI, que permite crear entornos de trabajo utilizando los

⁶ Aponte, J.A., Amaya, D.A., Fonseca, A.R., Prada, V., (2010). Modelado, diseño y construcción de un sistema activo de control de estabilidad de bajo costo para aeronaves experimentales tipo aficionado. Bogotá, Colombia: Universidad Militar Nueva Granada

⁷ Hurtado, L., Villareal, L., (2007). Una herramienta para el diseño de controladores robustos. Bogotá, Colombia: Universidad Autónoma de Colombia

comandos de las toolbox con que cuenta, para este caso, se utilizó la **Robust Control Toolbox**.

Según Galindo, R., y otros⁸, los controladores robustos se diseñan para un modelo nominal conocido $P(s)$, que contiene las características esenciales del sistema, y se garantiza la estabilidad del sistema al aplicar el controlador al sistema real. El control robusto funciona para un conjunto de sistemas alrededor del modelo nominal, lo que permite extender la región alrededor del punto o trayectoria de equilibrio, y mantener la estabilidad y el desempeño.

El problema óptimo general estándar de control robusto busca atenuar el efecto de la incertidumbre y de las perturbaciones de energía acotada, en una banda de frecuencia, sobre la energía de salida regulada, y garantiza estabilidad, con un controlador $K(s)$ estabiliza a $P(s)$.

Los modelos de incertidumbre se clasifican en estructurados o paramétricos, los cuales tienen un número finito de parámetros de incertidumbre, y no estructurados, en los que la respuesta en frecuencia permanece dentro de un conjunto para todas las frecuencias.

Una de las técnicas de control robusto para sistemas lineales utilizada como un primer paso de diseño es la de conformación de lazo, la cual busca dar un comportamiento frecuencial preespecificado a la función de transferencia de lazo abierto. Se asume que la peor incertidumbre ocurre en altas frecuencias y que las perturbaciones externas son de baja frecuencia. Un criterio semejante que utiliza funciones de transferencia de lazo cerrado en lugar de la función de transferencia de lazo abierto es el de sensibilidad mezclada, que resuelve simultáneamente los siguientes dos problemas: Estabilidad robusta y Desempeños robusto nominal.

En “Análisis de operabilidad y control robusto de un reactor de polimerización”⁹ la presencia de no linealidades en un proceso ocasiona que las propiedades deseadas en el producto final sean difíciles de obtener. En el caso de la industria de los polímeros es algo muy notable debido a que se presentan conductas altamente no lineales (histéresis, bifurcación, entre otros). Se vuelve importante determinar la existencia de este tipo de comportamientos no lineales para lograr un adecuado diseño y control a lazo cerrado del sistema. Esto motiva la necesidad de comprender el efecto de estas no linealidades, para determinar las acciones que se deben tomar, tanto en el diseño como en la operación de los equipos bajo consideración. Dichas acciones pueden tener como objetivo disminuir o remover las no linealidades, o aprovecharlas para satisfacer los requisitos de operación.

En el caso de Molins, C.,¹⁰ se desarrolla un modelado general de la lanzadera espacial en el que se tienen en cuenta las variaciones de masa, gravedad, densidad del aire, etc. En el que

⁸ Galindo, R.,(2008) ,Revisión de una nueva técnica de control robusto de sensibilidad mezclada. México D.F., México: Universidad Autónoma de Nuevo León

⁹ Silva, M.,(2011), Analisis de operabilidad y control robusto de un reactor de polimerización. México D.F., México: Universidad Iberoamericana

¹⁰ Molins, C., (2010),Elsó, J., Eguinoa, I., Garcia, Mario., Control Robusto QFT de una lanzadera espacial tipo VEGA. Pamplona., España: Universidad Pública de Navarra

se determina un área de trabajo y se extrae un modelo lineal al que se asocia una incertidumbre en los parámetros. Sobre dicho modelo se aplica la técnica de control robusto QFT para diseñar los controladores que gobiernan los ángulos de inclinación y la coordenada de altura del centro de gravedad de la lanzadera espacial. Y finalmente, se realiza la validación del sistema mediante simulación.

Pero también, según Villarreal, L.,¹¹ es imposible capturar perfectamente todos los detalles del comportamiento real de un proceso de forma matemática. Y esto obedece a la existencia inevitable de incertidumbres que pueden poner en peligro el logro de los objetivos del sistema de control. Sin embargo, en las últimas dos décadas ha surgido gran interés por el diseño de control tolerantes a las incertidumbres, es decir, *robustos*.

El objetivo para el diseño de un sistema de control retroalimentado robusto, es obtener una ley de control que mantenga la respuesta del sistema y la señal de error dentro de límites preestablecidos a pesar del efecto de las incertidumbres presentes. Durante el diseño, estas consideraciones pueden presentar gran dificultad para el ingeniero en la interpretación o toma de decisiones, a pesar de la existencia de múltiples herramientas de cálculo.



Figura 1. Robot móvil Pioneer 2

Fuente. Scaglia, G, J., Mut, V,A., Postigo, J,F.,(2010). Control de robots moviles aplicando tecnicas de control robusto.

¹¹ Villarreal, Luis.,(2009), Control robusto de un sistema mecánico simple mediante una herramienta grafica. Bogotá, Colombia: Universidad Manuela Beltrán

2.3 Justificación. Conveniencia Social o económica de la investigación:

El área de sistemas de control corresponde desde hace tiempo un tema importante en la fabricación de maquinaria y montajes de sistemas de producción; el cálculo estructural, mecánico, termodinámico, entre otros. Ya no es suficiente para el correcto diseño de un dispositivo, debido a que la automatización es una realidad en la industrial Colombiana, los sistemas de control comienzan a formar parte primordial de la formación de los ingenieros más específicamente la ingeniería mecánica en la Universidad Distrital, que cuenta con una formación en lo que respecta a mecánica convencional suficiente, sin embargo se deja a un lado la utilización de componentes que puedan facilitar el diseño de maquinaria autónoma.

La utilización de elementos de automatización PLC combinados con dispositivos neumáticos o hidráulicos constituye solo una parte de la implementación de sistemas autónomos en la industria. La innovación por parte nuestra en áreas de automatización, pueden ser un puente para aumentar nuestra competitividad en sistemas de producción, ya que estaríamos en la capacidad de comprender, rediseñar o crear nuevos sistemas autónomos que pondrían en alto la formación que ofrece la universidad Distrital a sus ingenieros mecánicos.

2.4 Formulación clara y precisa del problema de la investigación.

El pilotaje de vehículos aéreos se ha considerado desde siempre un problema a solucionar debido a que mantener el comportamiento del vehículo por parte del piloto no siempre es posible ya que su tiempo de reacción, algunas veces no es el requerido y además convierte el problema de mantener en curso el dispositivo en la tarea principal, desviándose la atención del piloto en otras tareas menos importantes.

En el área de los misiles el problema es similar, ya que se necesita que el misil llegue a su objetivo sin ningún tipo de contratiempo, sin embargo durante el trayecto se presentan problemas de forma aleatoria, pues los fenómenos climáticos que pueden ocurrir durante el vuelo, no son del todo predecibles y por tanto es necesario un sistema de corrección de posicionamiento del misil, con el fin de que este no pierda el rumbo o en su defecto pierda por completo el control.

La utilización de medios de control como el PID, resulta insuficiente debido a que normalmente están hechos para hacer frente a pequeñas perturbaciones que son en cierto grado predecibles y que además, en caso de se presentase algún tipo de desviación en la

señal deseada de salida del proceso, es muy posible que no se lograra una estabilización a adecuada de la operación. Es por esto que el desarrollo de un controlador robusto para una aplicación aeronáutica, es apropiado ya que resulta un sistema que se adapta a las necesidades del proceso, en pocas palabras a las condiciones meteorológicas que puedan hacer perder el control del misil.

2.5 Tipo de investigación y limitaciones que se tendrán:

Debido al carácter de este proyecto a los datos que existen y los que se deben investigar, es claro que se puede encasillar esta investigación dentro del tipo descriptivo debido a que lo que se quiere es demostrar la implementación de sistemas de control en misiles. Un área que lleva mucho tiempo de investigación debido a sus usos en el ámbito militar, sin embargo en Colombia el desarrollo de este tipo de dispositivos es pequeño en comparación y es por esta razón que esta investigación busca dar una representación clara de lo que se conoce como misiles; sus características principales y más específicamente sus sistemas de control.

La demostración de uso de estas tecnologías en la Universidad Distrital, se podría usar como inicio de un semillero de investigación acerca de sistemas de automatización en la ingeniería mecánica; la demostración del uso, y la implementación en dispositivos aeroespaciales como los misiles, serian parte primordial de la investigación.

Sin embargo el abordar este tema, con lleva ciertas dificultades ya que, como se menciona antes la misilística no es un área de alto desarrollo en nuestro país, y en consecuencia la obtención de datos acerca de la geometría y rendimiento de un misil, seria compleja por tanto el rastreo de datos dentro de universidades en la ciudad de Bogotá en la que se tratasen temas similares, se considerarían como bibliografía de mucha importancia. Además de que se acotarían los límites del proyecto comparándose con los resultados de otras investigaciones relacionadas.

2.6 Objetivos generales y específicos que se persiguen con la investigación.

2.6.1 Objetivo general.

2.6.2 Objetivos específicos.

2.7 Resultados esperados de la investigación.

Se pretende diseñar un sistema de control de estabilización de un misil, realizado con el software MATLAB en el cual se implementarían las correspondientes ecuaciones del

comportamiento del misil, y de esta forma utilizar sistemas de control robusto para representar gráficamente la afectación del sistema de control diseñado en el vuelo del misil.

3. Metodología general.

En la fase preliminar del desarrollo del proyecto, será necesaria la investigación y escogencia de los diferentes tipos de misiles; sus dimensiones, propulsión y características de vuelo con el fin de encontrar un modelo que se ajuste a las necesidades del proyecto. A partir de esta información base, será necesario también iniciar paralelamente un aprendizaje acerca de los diferentes sistemas de control con los que sería posible y apropiado desarrollar la aplicación, posteriormente es necesario modelar matemáticamente el comportamiento del vuelo del misil, es decir hallar las funciones de transferencia que describan con el mayor grado de precisión lo que sería la trayectoria de vuelo con todas la perturbaciones climáticas que se pudieran presentar en el espacio analizado. Esto nos da como resultado una serie de ecuaciones diferenciales, de los diferentes marcos de referencia que se manejaran para facilitar la descripción del vuelo de misil, y de forma poder ser modificadas con la implementación del sistemas control elegido.

Deducir las ecuaciones anteriores nos lleva a tener que usar un sistema computarizado que realice los cálculos de forma rápida, eficiente y además que los diferentes valores numéricos obtenidos posean facilidad de ser manipulados para posteriores cálculos, de esta forma se inicia la programación en el software MATLAB. El haber elegido este software se debe a su facilidad de uso, en el ámbito matemático, contar con diferentes “Toolbox” referentes al área del proyecto y ser software licenciado en la universidad. A lo anteriormente descrito, también es necesario añadir que no solo las funciones de transferencias pertenecientes al comportamiento del misil, serán programadas en el software; también tienen que ser ingresados los comandos relacionados con el sistemas de control que se ha escogido, para así ser manipulados con la aplicación Simulink de Matlab, y de esta forma obtener resultados graficos, que nos permitan juzgar la eficiencia del sistema de control en las diferentes variables del vuelo.

4. Marco teórico dentro del cual se concibe y adelantara la investigación.

4.1 Dinámica de sistemas

4.1.1 Definición de sistema.

Según K. Ogata¹² un *sistema* es una combinación de componentes que actúan conjuntamente para alcanzar un objetivo específico. Una *componente* es una unidad particular en su función en un sistema. Un sistema se llama *dinámico* si su salida en el presente depende de una entrada en el pasado; si su salida en curso depende solamente de la entrada en curso, el sistema se conoce como estático. La salida de un sistema estático permanece constante si la entrada no cambia y cambia sólo cuando la entrada cambia. En un sistema dinámico la salida cambia con el tiempo cuando no está en su estado de equilibrio.

4.1.2 Modelos matemáticos.

El diseñar un sistema conlleva necesariamente a realizar una predicción de su funcionamiento. Esta predicción se basa en una descripción matemática de las características dinámicas del sistema. A esta descripción matemática se le llama *modelo matemático*.

4.2 Sistemas de control.

4.2.1 Control retroalimentado.

Se refiere a una operación que, en presencia de perturbaciones, tiende a reducir la diferencia entre la salida de un sistema y alguna entrada de referencia y lo continúa haciendo con base en esta diferencia. Aquí solo se especifican con este término las perturbaciones impredecibles, dado que las perturbaciones predecibles o conocidas siempre pueden compensarse dentro del sistema.

4.2.2. Sistemas de control realimentados.

Un sistema que mantiene una relación prescrita entre la salida y la entrada de referencia, comparándolas y usando la diferencia como medio de control, se denomina *sistema de control realimentado*. Un ejemplo sería el sistema de control de temperatura de una habitación. Midiendo la temperatura real y comparándola con la temperatura de referencia (la temperatura deseada), el termostato activa o desactiva el equipo de calefacción o de enfriamiento para asegurar que la temperatura de la habitación se conserve en un nivel cómodo sin considerar las condiciones externas.

4.2.3. Sistemas de control en lazo cerrado.

Los sistemas de control de realimentados se denominan también *sistemas de control en lazo cerrado*. En la práctica los términos control realimentado y control en lazo cerrado se usan

¹² Ogata, K. (1998). *Ingeniería de control moderna*. México: Editorial Prentice-Hall. New York: John Wiley and Sons. Inc.

indistintamente. En un sistema de control en lazo cerrado, se alimenta al controlador la señal de error de actuación, que es la diferencia entre la señal de entrada y la señal de realimentación (que puede ser la señal de salida misma o una función de la señal de salida y sus derivadas y/o integrales), a fin de reducir el error, y llevar la salida del sistema a un valor conveniente. El término control en lazo cerrado siempre implica el uso de una acción de control realimentado para reducir el error del sistema.

4.2.4. Sistemas de control en lazo abierto.

Los sistemas en los cuales la salida no afecta la acción de control se denominan *sistemas de control en lazo abierto*. En otras palabras, en un sistema de control en lazo abierto no se mide la salida ni se realimenta para compararla con la entrada. Un ejemplo práctico es una lavadora. El remojo, el lavado y el enjuague en la lavadora operan con una base de tiempo. La máquina no mide la señal de salida, que es la limpieza de la ropa.

4.2.5. Sistemas de control en lazo cerrado en comparación con los sistemas en lazo abierto.

Una ventaja del sistema de control en lazo cerrado es que el uso de la realimentación vuelve la respuesta del sistema relativamente insensible a las perturbaciones externas y a las variaciones internas en los parámetros del sistema. Por tanto, es posible usar componentes relativamente precisos y baratos para obtener el control adecuado de una planta determinada, en tanto que hacer eso es imposible en el caso de un sistema en lazo abierto.

4.3. Control en aeronaves.

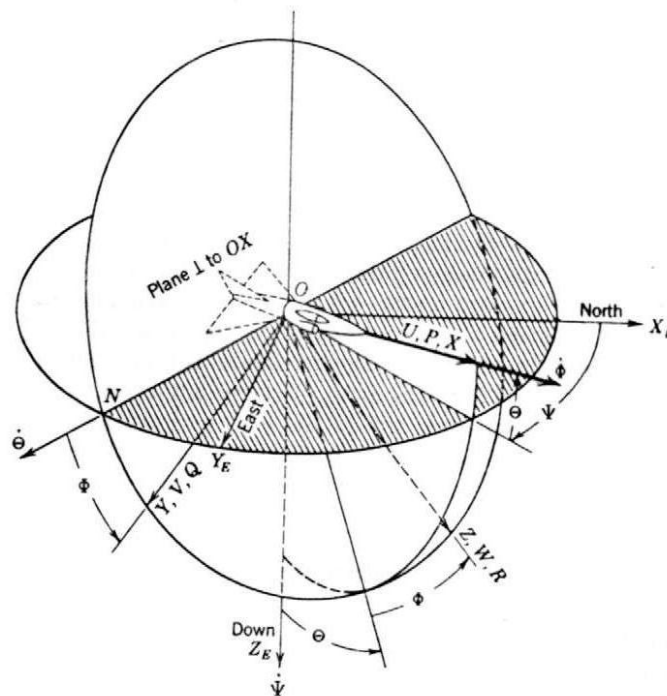
4.3.1 Dinámica longitudinal.

Según Blakelock¹³, para obtener la función de transferencia de una aeronave es primero necesario obtener las ecuaciones de movimiento del misil. Las ecuaciones de movimientos se derivan de la aplicación de las leyes de Newton las cuales describen la totalidad de las fuerzas externas y momentos para las aceleraciones lineales y angulares del sistema o cuerpo. Sin embargo para hacer esto, se debe realizar ciertas suposiciones y se debe definir un sistema de coordenadas.

El centro de sistemas de coordenadas es por definición, localizado en el centro de gravedad de la aeronave. En general, el sistema de coordenadas se fija a el vehículo y rota con él. Este sistema de coordenadas normalmente es nombrado como "ejes de cuerpo".

¹³ Blakelock, J.H. (1990). *Control automatico de aeronaves y misiles*. New York: John Wiley and Sons. Inc.

Figura 2. Diagrama de sistema de coordenadas en aeronaves.



Fuente: Blakelock, J.H. (1990). *Control automático de aeronaves y misiles*.

5. Hipótesis que guiaran la investigación.

- Debido a que el desarrollo de aeronaves está bastante desarrollado, y se han realizado proyectos relacionados en universidades Colombianas, es posible encontrar modelos de misiles con los cuales se facilitara hallar variables aerodinámicas.
- El uso del software MATLAB, facilita la programación de los sistemas control, debido a que este cuenta con varios módulos independientes llamados "Toolbox".

6. Indicación del universo, la población y la muestra con los cuales se trabaja.

Este proyecto se desarrollara en el área de la automatización en general debido a que se realizara una simulación de los resultados de la aplicación de un sistema de control en un vehículo aéreo, que implica tomar conceptos tanto del área aeronáutica como de la automatización industrial. Siendo la culminación del proyecto una muestra de la aplicación de variados conceptos del ámbito ingenieril.

7. Procedimientos y técnicas para la recolección de información.

Se espera que para la recolección de la información se pueda contar con la búsqueda de la misma a través de varios medios, entre ellos estarían la indagación por internet, el uso de libros especializados, la interacción en diversos semilleros de mecánica computacional de la Universidad Distrital Facultad Tecnológica, los tutoriales y la ayuda expuestos sobre la temática del proyecto en programas como MATLAB.

8. Aspectos de la administración de control.

8.1 Cronograma de actividades.

8.2 Presupuesto de la investigación.

Mano de obra				
Item	Unidad	Valor unidad	No de unidades	Total de unidades
Investigador 1	Hora	\$ 10.000	600	\$ 6.000.000
Investigador 2	Hora	\$ 10.000	600	\$ 6.000.000
Asesor	Hora	\$ 50.000	60	\$ 3.000.000
			subtotal	\$ 15.000.000
Gastos generales				
Item	Unidad	Valor unidad	No de unidades	Total de unidades
Fotocopias	Hoja	\$ 50	400	\$ 20.000
Impresiones	Hoja	\$ 100	600	\$ 60.000
Internet	Hora	\$ 1.200	240	\$ 288.000
			subtotal	\$ 393.000
			total	\$ 15.393.000

9. Aspectos informativos sobre la infraestructura disponible.

9.1 Hoja de vida del asesor.

Como propuesta para el asesor se plantea la posibilidad de que sea el Ingeniero Luini Hurtado.

9.2 Información general sobre la institución o empresa donde se realizara la investigación.

En la Universidad Distrital Francisco José de Caldas Facultad Tecnológica, la infraestructura requerida para el desarrollo del proyecto es de fácil adquisición, ya que se cuenta con los recursos necesarios como los son: un computador y el acceso a la información; además de contar con licencias gratuitas dadas por la universidad para programas como Matlab.

10. Anexos.

10.1 Bibliografía Referenciada.

Morales, F., Cipriano, A., Rudnick, H. (2002). Control Robusto en Sistema de Potencia multimaquinas utilizando lógica difusa y teorías de control H_∞ y control proyectivo. Facultad de Ingeniería. Santiago: Pontificia universidad católica de Chile.

Cotte, J,M., Moreno, F,A., (2010). Diseño de control robusto de velocidad de motores brushless para robótica aérea. Facultad de Ingeniería. Bogotá: Universidad Nacional de Colombia.

Mejia, H,F., (2009). Aplicación de la técnica H_2 de control robusto a un sistema de levitación magnético bajo condiciones de incertidumbre. Facultad de ingenierías Eléctrica, Electrónica, Física y ciencias de la computación. Pereira: Universidad Tecnológica de Pereira.

Scaglia, G, J., Mut, V,A., Postigo, J,F.,(2010). Control de robots moviles aplicando tecnicas de control robusto. San Juan, Argentina: Universidad Nacional de San Juan.

Abusleme, C, A., (2009). Control difuso de vehículo volador no tripulado. Santiago de Chile, Chile: Pontificia Universidad Catolica de Chile.

Aponte, J,A., Amaya, D,A., Fonseca,A,R.,Prada,V.,(2010). Modelado, diseño y construcción de un sistema activo de control de estabilidad de bajo costo para aeronaves experimentales tipo aficionado. Bogotá, Colombia: Universidad Militar Nueva Granada.

Hurtado,L,, Villareal,L,, (2007). Una herramienta para el diseño de controladores robustos. Bogotá, Colombia: Universidad Autónoma de Colombia.

Galindo, R.,(2008) ,Revisión de una nueva técnica de control robusto de sensibilidad mezclada. México D.F., México: Universidad Autónoma de Nuevo León.

Silva, M.,(2011), Analisis de operabilidad y control robusto de un reactor de polimerización. México D.F., México: Universidad Iberoamericana.

Molins, C., (2010),Elso, J., Eguinoa, I., Garcia, Mario., Control Robusto QFT de una lanzadera espacial tipo VEGA. Pamplona., España: Universidad Pública de Navarra.

Villarreal, Luis.,(2009), Control robusto de un sistema mecánico simple mediante una herramienta grafica. Bogotá, Colombia: Universidad Manuela Beltrán.

10.2 Bibliografía consultada.

Ogata, K. (1998). Ingenieria de control moderna. México: Editorial Prentice-Hall.

Blakelock, J,H. (1990). Control automatico de aeronaves y misiles. New York: John Wiley and Sons. Inc.