

ESCUELA POLITECNICA NACIONAL

FACULTAD DE INGENIERIA ELECTRICA

**“ SISTEMAS DE CONTROL DE ESTRUCTURA  
VARIABLE Y SU APLICACIÓN A DRIVERS PARA  
DISCOS MAGNETICOS “**

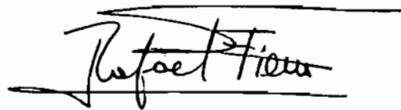
TESIS PREVIA A LA OBTENCION DEL TITULO DE INGENIERO

EN ELECTRONICA Y CONTROL

NOEMI ELIZABETH JARA VACA

QUITO, JULIO, 1999

Certifico que el presente trabajo ha sido  
realizado en su totalidad por la Sra.  
Noemí E. Jara V.

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'Rafael Fierro', is written over a horizontal line. The signature is stylized and cursive.

Rafael Fierro B., PhD.  
Director de Tesis

## **Agradecimiento**

Un agradecimiento especial al Dr. Rafael Fierro por su ayuda y asesoramiento, brindado para el desarrollo de la presente Tesis y a todas las personas que me brindaron su apoyo.

### **Dedicatoria**

Este trabajo de tesis está dedicado a mis padres que con sus palabras de aliento me impulsaron para salir adelante en los momentos difíciles.

## INDICE

	PAG
<b>Capítulo 1: INTRODUCCION</b>	
1.1 Antecedentes	2
1.2 Objetivos	3
1.3 Contenidos	3
<b>Capítulo 2: DRIVERS PARA DISCOS MAGNETICOS</b>	
2.1 Conceptos Básicos	6
2.2 Proceso de Lectura/Escritura	8
2.3 Estructura Física	10
2.3.1 Brazo de las Cabezas de Lectura/Escritura	11
2.3.2 Cabezas de Lectura/Escritura	12
2.3.3 Actuador	13
2.3.4 Motor del Actuador (VCM)	17
2.4 Ejemplo de un Disco Común	17
<b>Capítulo 3: SISTEMAS DE ESTRUCTURA VARIABLE</b>	
3.1 Introducción	17
3.2 Control por Conmutación	17
3.3 Análisis de Estabilidad	18
3.3.1 Modelo no Lineal	19
3.3.2 Modelo Lineal	20
3.4 Ejemplos y Aplicaciones	21
3.4.1 Modo de Búsqueda	21
3.4.2 Modo de Posicionamiento y Seguimiento	25

## **Capítulo 4: TECNICAS DE CONTROL EN DRIVERS DE DISCOS MAGNETICOS**

4.1 Introducción	28
4.2 Modelo a la Planta	28
4.3 Modos de Operación	30
4.3.1 Modo de Búsqueda de Pista	30
4.3.2 Modo de Posicionamiento y Seguimiento de Pista	31
4.4 Esquema de Control	31
4.5 Criterios de Conmutación	39
4.6 Compensación con Valores Iniciales	40

## **Capítulo 5: SIMULACION DEL SISTEMA**

5.1 Introducción	48
5.2 Interface del Usuario	48
5.2.1 Diagramas de Bloques de las Subpantallas	53
5.2.2 Interface Descripción de las Subpantallas	55

## **Capítulo 6: ANALISIS DE RESULTADOS**

6.1 Comparación de los Métodos de Compensación	62
6.1.1 Simulación del Sistema sin emplear métodos de Compensación de Valor Inicial	62
6.1.2 Simulación del Sistema con Compensación de Valor Inicial	65
6.1.2.a Método de Compensación de Valor Inicial Función de Mínimo Costo	66
6.1.2.b Método de Cancelación de Polos y Ceros	69

## **Capítulo 7: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

7.1 Conclusiones y Recomendaciones	79
------------------------------------	----

**BIBLIOGRAFIA**

**ANEXOS**

## **Capítulo 1: INTRODUCCION**

1.1 Antecedentes

1.2 Objetivos y Alcance

1.3 Contenido

# 1. INTRODUCCION

## 1.1 ANTECEDENTES

Los sistemas de control actuales, resultan ser cada vez más complejos y que deben responder a las crecientes demandas de un mundo globalizante, donde impera la eficiencia de la industria moderna. Y que por supuesto el empleo de un solo controlador no es suficiente, para determinar de modo preciso las respuestas que satisfagan los requerimientos de diversas operaciones de trabajo, así, como variados puntos de operación y fines diversos.

Por ello que resulta atractivo e interesante buscar una alternativa que permita mayor inteligencia al Sistema de Control. Una manera de conseguir este objetivo es definiendo varios controladores, para las varias condiciones de trabajo de una planta, mediante un supervisor ( control del alto nivel ) que es el encargado de decidir cual controlador se conecta a la planta, en función de las condiciones de operación.

Esta técnica forma parte de los métodos, conocidos como *Sistemas de Control de Estructura Variable* VSS cuya aplicación ha tenido un notable desarrollo en los últimos años gracias a la existencia de sistemas computarizados cada vez más poderosos. Un ejemplo importante de este tipo de sistemas lo constituyen los drivers empleados por discos rígidos con gran capacidad para almacenar información.

El mando en los servomecanismos empleados en drivers de discos rígidos, resulta ser más complejo, que el mando de un servomecanismo convencional por varios aspectos, entre los cuales podemos señalar:

- La estructura de posicionamiento de la cabeza de lectura/escritura está compuesta por una armadura flexible, haciendo que el sistema de control se complique, el mismo que deberá buscar en lo posible

eliminar, o al menos reducir al mínimo el efecto que producen estas oscilaciones no deseadas en el Sistema.

- Para obtener más alta velocidad de transferencia de datos, es indispensable, colocar la cabeza de lectura/escritura de forma precisa sobre la pista deseada y luego, orientarle hacia la pista destino, con el fin de grabar los datos, tan rápido como sea posible. Como la planta, dispone de varias condiciones de operación, requiere de algoritmos con control diferentes.

## **1.2 OBJETIVOS Y ALCANCE**

El presente trabajo, tiene como fin buscar una alternativa a través de un sistema de Control de Estructura Variable que permita mejorar la facultad de Servo Sistemas de posición empleados en drivers, para discos rígidos de gran capacidad.

- El enfoque se orienta hacia el estudio ampliado de los servo mecanismos, utilizados en discos rígidos con una gran capacidad para el almacenamiento de la información.
- Delinear una herramienta de simulación que se base en el programa MATIAB 5, que incluye una interface de usuario versátil.
- Describir e implementar (a nivel de simulación) diversos algoritmos de control, apoyados en Sistemas de Control de Estructura variable, (modo switcheo o conmutación) en servo sistemas empleados en drivers, para discos rígidos de gran capacidad.

## **1.3 CONTENIDO**

La tesis esta organizada de la siguiente manera:

El segundo capítulo describe conceptos básicos de discos duros, operaciones de lectura/escritura estructura física y tipos de discos más usados.

En el tercer capítulo se describe la forma como se realiza el control de posicionamiento de las cabezas magnéticas de una unidad de disco duro, se realiza el análisis de estabilidad de sistemas lineales y no lineales.

El cuarto capítulo describe el modelo de la planta para una unidad de disco duro, los modos de operación en los cuales trabaja el sistema para la lectura/escritura de datos, compensación de la planta, criterios de conmutación de un modo a otro y un estudio de los métodos de compensación de valor inicial que pretenden reducir el efecto de los transitorios causados por el cambio de un modo a otro.

En el quinto capítulo se describe la forma como el usuario se puede relacionar con el programa implementado.

En el sexto capítulo se presentan los resultados obtenidos de la simulación de sistema unidad de disco duro, con condiciones iniciales no nulas, luego se observa los resultados obtenidos al simular el sistema realizando una compensación de valor inicial con el método de *Función de Mínimo Costo y Cancelación de Polos y Ceros*.

Finalmente en el séptimo capítulo se presentan las conclusiones y recomendaciones a las que se han llegado luego de haber desarrollado este trabajo, además una visión general del trabajo futuro que se puede realizar.

## **Capítulo 2: DRIVERS PARA DISCOS MAGNETICOS**

2.1 Conceptos Básicos

2.2 Proceso de Lectura/Escritura

2.3 Estructura Física

2.3.1 Brazo de las Cabezas de Lectura/Escritura

2.3.2 Cabezas de Lectura/Escritura

2.3.3 Actuador

2.3.4 Motor del Actuador (VCM)

2.4 Ejemplo de un Disco Común

## 2. DRIVERS PARA DISCOS MAGNETICOS

### 2.1 CONCEPTOS BASICOS

Los discos duros sirven como un importante medio para almacenar datos e información. Una unidad de disco duro posee múltiples discos que conforman un solo conjunto. Cada disco usa dos cabezas de lectura/escritura, una colocada sobre la parte superior del disco y la otra en la base como se observa en la Fig 2.1, de esta forma se extiende la capacidad de almacenamiento.

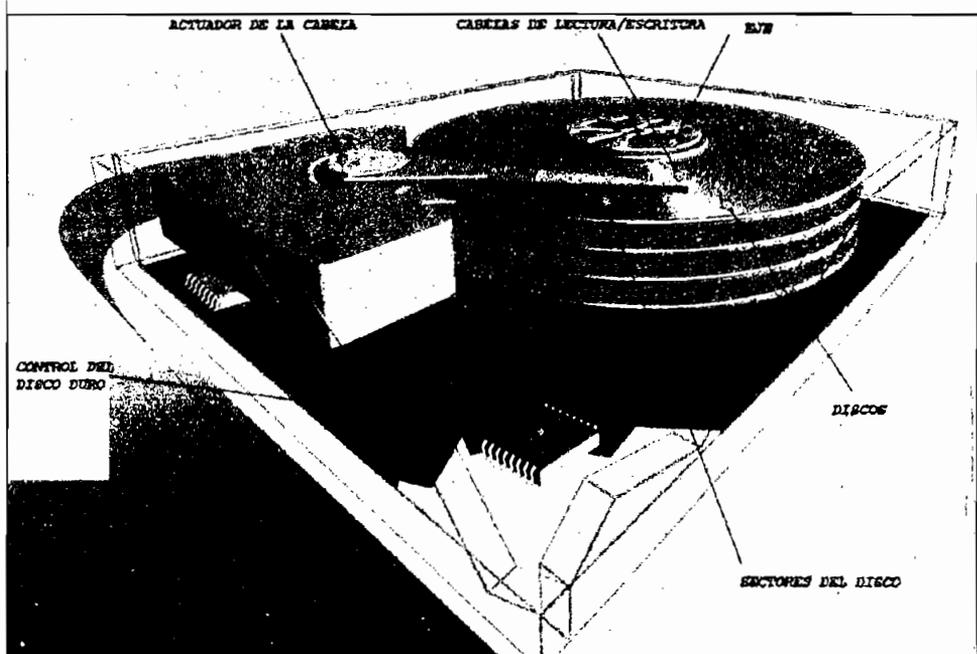


Fig 2.1 Sistema básico de un disco duro

En un disco duro, la superficie está recubierta con una pequeña capa de óxido magnético distribuido uniformemente sobre cada lado del disco. Los datos están escritos en círculos concéntricos o pistas, estos se escriben a través de las cabezas. Las cabezas son electromagnetos en forma de herradura con una abertura muy delgada como se observa en la Fig 2.2.

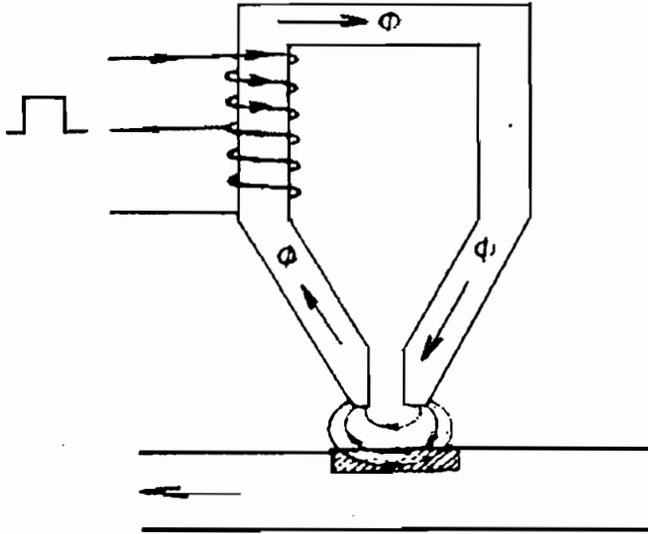
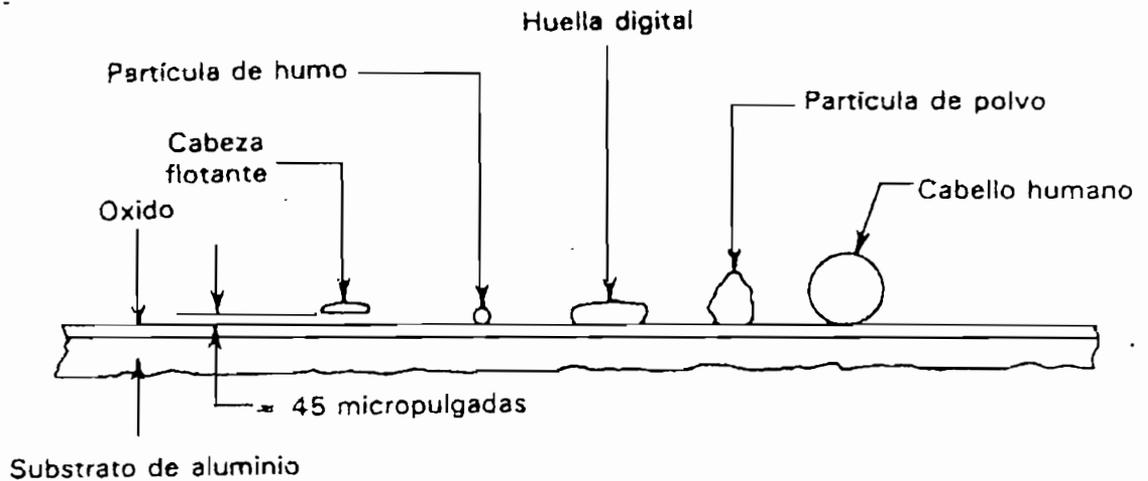


Fig 2.2 Forma de la cabeza de lectura/escritura

El electromagneto se halla colocado a unas micropulgadas sobre el medio de grabación como muestra la Fig 2.3, la abertura del electromagneto energizado produce un fuerte campo de flujo magnético que polariza el medio de grabación. Una vez polarizado el medio de grabación permanece así hasta que es reescrito.



**Fig 2.3** Comparación de diversas partículas en relación con el espacio entre la cabeza y el disco

Las cabezas de L/E (lectura/escritura) son movidas por un actuador a través de la superficie del disco hasta alcanzar la pista destino. El mecanismo para mover las cabezas de L/E a una pista deseada del disco es un factor importante para determinar la velocidad total de la operación de L/E. La velocidad de acceso de la cabeza generalmente es mucho más lenta que una revolución del disco y es el factor predominante para ajustar el tiempo de acceso de L/E.

## ***2.2 PROCESO DE LECTURA ESCRITURA***

Para escribir información en una unidad de disco duro, se aplica una corriente eléctrica a través de una bobina produciendo un campo magnético. La dirección del campo magnético depende de la dirección en que fluye la corriente por la bobina.

Para leer la información se aplica un campo magnético a la bobina con lo cual se consigue que una corriente eléctrica fluya, la dirección de ésta depende de la dirección en la cual se aplica el campo en la bobina [1].

En una unidad de disco duro se graban datos como signos eléctricos. Estos signos son numéricamente expresados como 1s y 0s en el sistema binario de dos dígitos. La capa magnética en un disco duro está compuesta de áreas microscópicas llamadas dominios; cada dominio es como un imán diminuto con dos polos opuestos (un positivo y un negativo). Antes de grabar datos, la unidad de disco duro usa las cabezas de L/E, para orientar los dominios en una pequeña región y en una misma dirección.

La unidad de disco duro usa un eficaz método de grabación, llamado inversión de flujo. Cuando ésta encuentra un 1 la cabeza de L/E invierte la dirección del polo magnético y si encuentra un 0 no cambian la dirección de los polos magnéticos.

Los datos son grabados en pistas o círculos concéntricos que se numeran desde el borde externo al mas interno; se puede recuperar datos guardados en cualquier parte del disco y en cualquier orden.

Las cabezas de L/E de una unidad de disco duro pueden cambiar a una nueva localidad una vez que el CPU provee la dirección.

La unidad de disco duro puede grabar datos en ambos lados del disco ya que se colocan cabezas de L/E a cada lado. Por ejemplo, una unidad de disco duro con dos discos debería tener cuatro sectores de almacenamiento de datos y cuatro cabezas de L/E; una unidad de disco duro con tres discos deberían tener seis áreas de almacenamiento de datos y seis cabezas de L/E y así sucesivamente.

El brazo del actuador del drive sincroniza todas las cabezas de L/E para que queden en alineación perfecta (sincronismo) cuando ellas se mueven al mismo tiempo sobre el área del disco. El área del disco es organizada de tal manera que la unidad de disco duro pueda fácilmente encontrar los datos. Las pistas concéntricas son divididas en unidades llamadas sectores.

La información está gravada en la pista mas externa del primer disco. Una vez que la pista exterior es llenada con los datos, las cabezas se mueven al interior y empiezan a escribir en la próxima pista libre. Esta estrategia de grabación permite que la cabeza de L/E pueda grabar más datos en una posición antes de moverse a otra pista.

### 2.3 ESTRUCTURA FISICA

Una unidad de disco duro por lo general consta de varios discos como se observa en la Fig 2.4. Cada disco requiere de dos cabezas de L/E, una para cada lado. Todas las cabezas de lectura escritura son unidas por un solo brazo de acceso de tal forma que ellas no pueden moverse independientemente [2].

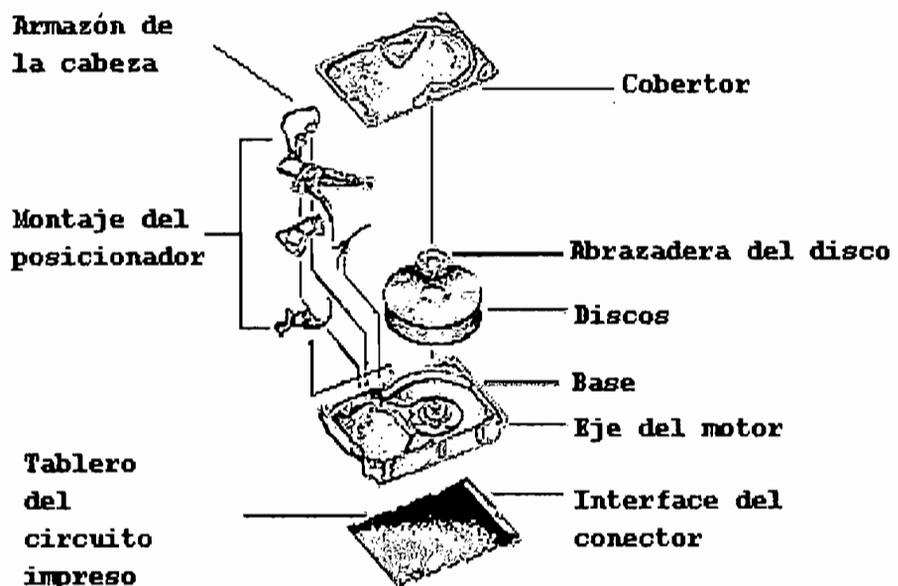


Fig 2.4 Esquema del ensamblado de una unidad de disco duro

Cada disco tiene un mismo número de pistas, las pistas alineadas a los dos lados de los discos definen un *Cilindro* como se observa en la Fig 2.5.

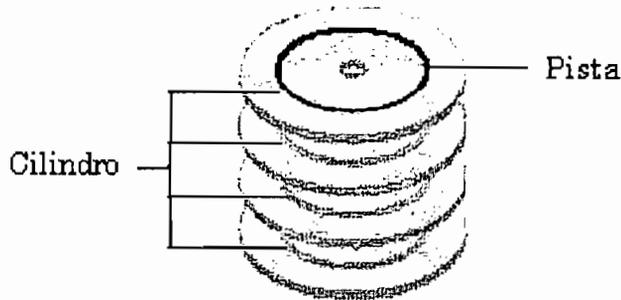


Fig 2.5 Discos, pista y sectores de una unidad de disco duro

### ***2.3.1 BRAZO DE LAS CABEZAS DE LECTURA/ESCRITURA***

El brazo está constituido por delgadas piezas triangulares de metal sobre las cuales están montadas las cabezas de L/E. A cada cabeza le corresponde un brazo y todas ellas son alineadas y montadas al actuador. Esto indica que cuando el actuador se mueve, todas las cabezas se mueven a un mismo tiempo en forma sincronizada. Las cabezas no pueden ser enviadas individualmente a diferentes números de pista.

Los brazos deben ser de peso ligero y de material delgado para que puedan ser movidos rápidamente desde la parte interna hacia afuera del drive y viceversa.

### ***2.3.2 CABEZAS DE LECTURA/ESCRITURA***

Las cabezas de L/E quizá son las partes más complejas de la tecnología de discos duros, ellas convierten señales eléctricas a señales magnéticas y viceversa.

Las cabezas de discos duros trabajan usando dos principios fundamentales de fuerza electromagnética. El primero, es la aplicación de una corriente eléctrica a través de una bobina produciendo un campo magnético que se emplea en la operación de escritura. La dirección del campo magnético

producido depende de la dirección de la corriente que está fluyendo a través de la bobina. El segundo, es aplicando un campo magnético a la bobina el cual causa el flujo de una corriente eléctrica que es usado para la operación de lectura, aquí la dirección en la que fluye la corriente depende de la dirección del campo magnético aplicado a la bobina.

Las cabezas de L/E son en esencia diminutos electroimanes que llevan a cabo esta conversión de información eléctrica a magnética.

### **2.3.3 ACTUADOR**

El actuador es un dispositivo usado para posicionar el brazo de las cabezas de L/E sobre una pista en la superficie del disco. El actuador es una parte muy importante de la unidad de disco duro porque el cambio de una pista a otra requiere de un movimiento físico, el cual debe ser rápido y preciso.

### **2.3.4 MOTOR DEL ACTUADOR (VCM)**

En unidades de discos duros que contienen actuadores lineales, esto es, actuadores que se mueven en una dirección hacia dentro o hacia fuera a lo largo del radio del disco, el motor es conocido como un VCM. El VCM trabaja usando atracción y repulsión electromagnética y mueve la cabeza hacia el centro o hacia fuera del área del disco.

El VCM usa una bobina de alambre rigidamente unida al núcleo móvil del motor que es suspendida en un campo magnético creado por un imán permanente como muestra la Fig 2.6

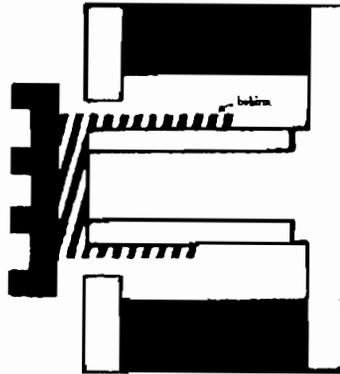


Fig 2.6 Esquema del VCM

Cuando una corriente pasa a través de la bobina se produce una fuerza que tiende a dirigirle radialmente hacia adentro o hacia fuera dependiendo de la dirección de la corriente.

#### ***2.4 EJEMPLO DE UN DISCO COMUN***

En esta sección presentamos en forma breve cuatro discos comunmente utilizados:

- ◆ Unidad de disco CO30104H de alta ejecución de 3.5 pulgadas, 121 Mb, cabezas tipo MIG, VCM, consta de dos discos por lo tanto 4 areas de datos, cuatro cabezas, 15241 pistas por área, densidad de la pista 1850 pistas por pulgada, 19968 bytes de capacidad, 39 sectores por pista.
- ◆ Unidad de disco duro de 3.5 pulgadas, densidad 6000 pistas por pulgada, microprocesador TMS 320C30 para control de la unidad de disco duro.
- ◆ La Fig 2.7 presenta una unidad de disco duro de 3.5 pulgadas, 1800 pistas por pulgada, velocidad angular 3600 rpm y tiempo de búsqueda 16.8 ms.

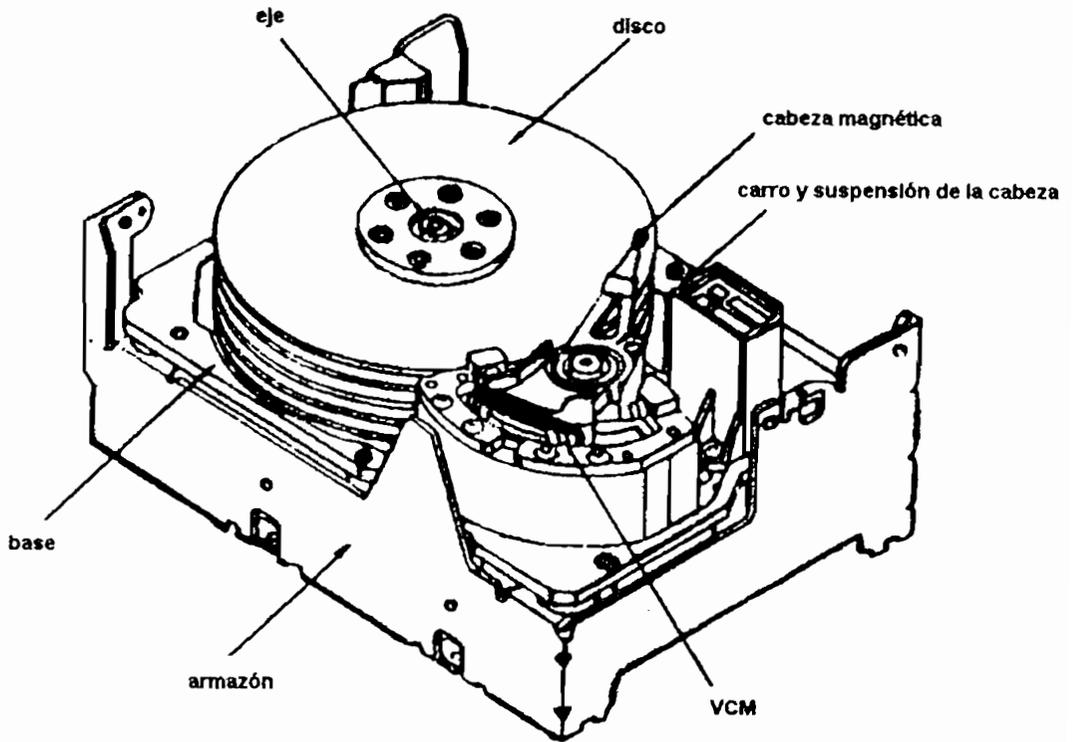
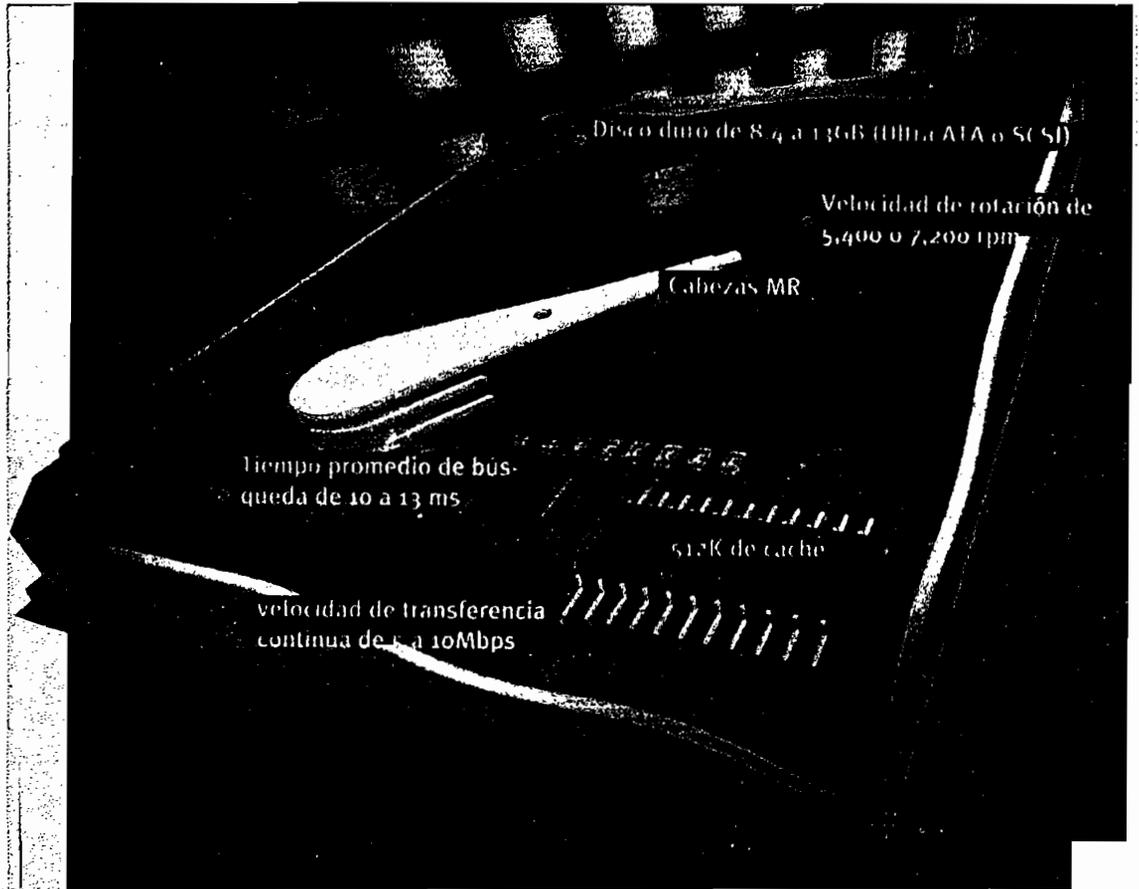


Fig 2.7 Unidad de disco duro 1800 pistas por pulgada

- ◆ Unidad de disco duro de 8.4 Gb presentada en la Fig 2.8, velocidad de rotación de 5400 rpm, cabezas tipo MR, tiempo de búsqueda 10 ms. y velocidad de transferencia de 5 Mb/s.



**Fig 2.8** Unidad de disco duro de 8.4Gb

En el siguiente capítulo realizamos un análisis detallado de los sistemas de control y los modos de operación de un drive de disco duro.

## **Capítulo 3: SISTEMAS DE ESTRUCTURA VARIABLE**

### 3.1 Introducción

### 3.2 Control por Conmutación

### 3.3 Análisis de Estabilidad

#### 3.3.1 Modelo no Lineal

#### 3.3.2 Modelo Lineal

### 3.4 Ejemplos y Aplicaciones

#### 3.4.1 Modo de Búsqueda

#### 3.4.2 Modo de Posicionamiento y Seguimiento

### 3. SISTEMAS DE ESTRUCTURA VARIABLE

#### 3.1 INTRODUCCION.

El propósito de este capítulo es describir la forma como se realiza el control del posicionamiento de las cabezas magnéticas de una unidad de disco duro, luego se estudia determinados métodos para análisis de estabilidad de sistemas no lineales y lineales. Finalmente se realiza el análisis de estabilidad de los diferentes modos de operación para el control de posicionamiento de cabezas magnéticas.

#### 3.2 CONTROL POR CONMUTACION.

En la Fig 3.1 se presenta un esquema de control de la unidad de disco duro [3].

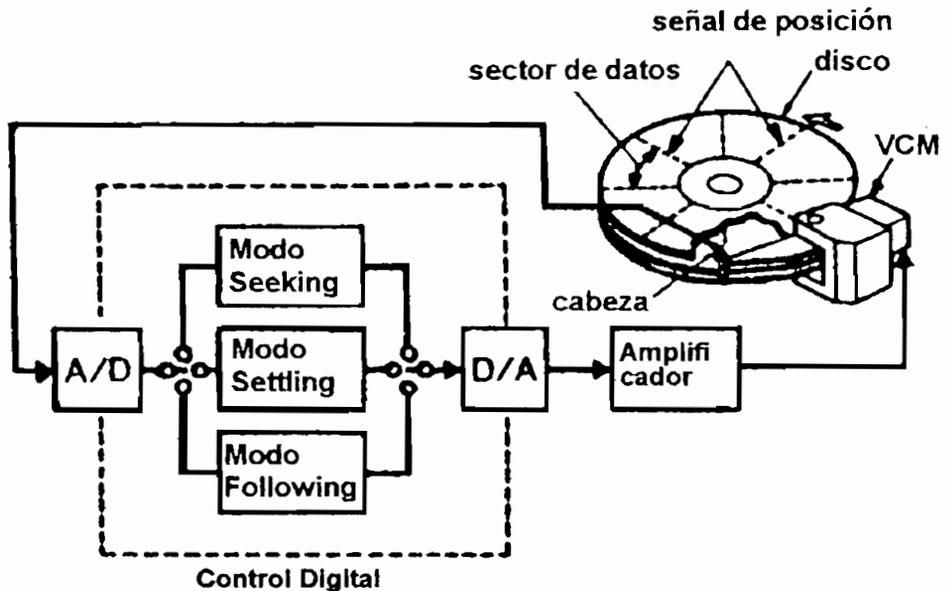


Fig 3.1 Esquema de Control de la Unidad de Disco Duro

Las cabezas magnéticas tienen que ser posicionadas rápida y exactamente en el centro de la pista destino. Ya que se requiere de un acceso rápido y posición precisa, un solo algoritmo de control no cumple con todos estos requerimientos. Razón por la cual, se requieren esquemas adicionales que cumplan estos objetivos.

Muchas unidades actualmente de discos duros están usando técnicas de conmutación basadas en la teoría de Sistemas de Estructura Variable [2]

El sistema de control consiste de tres modos de operación:

1. Búsqueda de la pista
2. Posicionamiento sobre la pista
3. Seguimiento a la pista

Con el *Modo de Búsqueda* se logra un rápido acceso a la pista destino, el *Modo de Posicionamiento* proporciona la posición precisa y el *Modo de Seguimiento* se utiliza para seguir el centro de la pista.

Cuando un dato es escrito o una orden de lectura es enviada a la unidad de disco duro, el *Modo de Búsqueda* es seleccionado primero, si la cabeza L/E (lectura/escritura) se encuentra cerca de la pista destino, se cambia *del Modo de Búsqueda a Modo de Posicionamiento* y después de un cierto intervalo, el *Modo de Seguimiento* es seleccionado.

Cada modo de control se diseña independientemente para satisfacer una cierta función de costo y es cambiado bajo una cierta condición. El principal problema que se presenta es como realizar el cambio desde un modo a otro.

La condición de cambio entre modos es el desplazamiento entre la posición presente y la posición destino.

### **3.3 ANALISIS DE ESTABILIDAD.**

En esta sección se realiza el análisis de estabilidad de un modelo no lineal y uno lineal de los modos de control que utiliza una unidad de disco duro.

### 3.3.1 MODELO NO LINEAL

Un sistema no lineal puede ser representado como el de la Fig 3.2

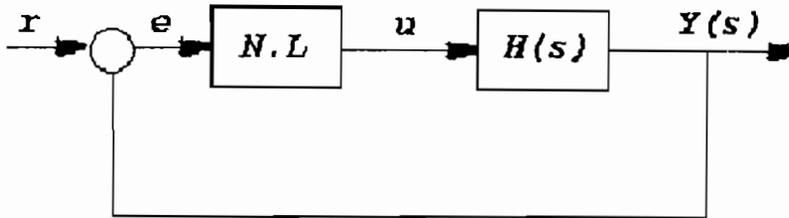


Fig 3.2 Diagrama de Bloques del Modelo no Lineal

Donde  $H(s)$  representa la función de transferencia del sistema y  $N.L$  el elemento no lineal del sistema.

Existen varias técnicas de análisis de sistemas no lineales, por ejemplo :

- ◆ Plano de fase
- ◆ Teoría de Lyapunov
- ◆ Función descriptiva

La técnica de análisis que se empleará en este trabajo para el sistema de posicionamiento de cabezas magnéticas es de la función descriptiva.

**Función Descriptiva.** Se realiza un análisis de respuesta de frecuencia del sistema no lineal [4]. El objetivo es observar si existen oscilaciones y si las

hay encontrar la amplitud  $A$  y la frecuencia  $\omega = \frac{2 \cdot \pi i}{T}$  .

Para la representación de un componente no lineal por función descriptiva se considera una entrada sinusoidal  $e(t) = A \cdot \text{sen}(\omega t)$  y la salida

$$u(t) = a_0 + a_1 \cdot \cos \omega t + a_2 \cos 2 \omega t + \dots + b_1 \text{sen} \omega t + b_2 \text{sen} 2 \omega t + \dots +$$

Donde  $a_0=0$

$$u(t) = a_1 \cos \omega t + b_1 \operatorname{sen} \omega t \quad (3.1)$$

$$u(t) = B \cdot \operatorname{sen}(\omega t + \phi) \quad (3.2)$$

$$u(t) = B \cdot e^{j \cdot (\omega t + \phi)} \quad (3.3)$$

$$e(t) = A \cdot \operatorname{sen}(\omega t + \theta) \quad ; \theta = 0 \quad (3.4)$$

$$e(t) = A \cdot e^{j \omega t} \quad (3.5)$$

$$y(t) = -A \cdot \operatorname{sen}(\omega t + \theta) \quad (3.6)$$

$$N(A, \omega) = \frac{B \cdot e^{j \cdot (\omega t + \phi)}}{A \cdot e^{j \omega t}} \quad (3.7)$$

$$1 + H(j\omega) \cdot N(A, \omega) = 0 \quad (3.8)$$

La ecuación (3.7) representa la función descriptiva del sistema para análisis de estabilidad y ciclo límite en lazo cerrado.

Si (3.8) tienen solución, indica la presencia de un ciclo límite. Luego se analiza si el ciclo límite es estable o inestable.

### 3.3.2 MODELO LINEAL

El análisis de estabilidad se determina para un sistema SISO.

Sea la función de transferencia en lazo cerrado

$$\frac{Y(z)}{R(z)} = \frac{G(z)}{1 + GH(z)} \quad (3.9)$$

donde la ecuación característica es

$$1 + GH(z) = 0 \quad (3.10)$$

La tabla 3.1 presenta las condiciones de estabilidad para sistemas en tiempo discreto [5].

**Tabla 3.1: Condición de estabilidad de sistemas en tiempo discreto SISO**

<b>CONDICIÓN DE ESTABILIDAD</b>	<b>VALORES DE LAS RAÍCES</b>
Estable	$ z_i  < 1$ ( $i = 1, \dots, n$ ), Todas las raíces están dentro del círculo unitario.
Marginalmente estable	$ z_i  = 1$ ( $i = 1, \dots, n$ ), puede ser una raíz simple, ninguna raíz de orden múltiple debe estar sobre el círculo unitario y ninguna raíz fuera del círculo.
Inestable	$ z_i  = 1$ ( $i = 1, \dots, n$ ), para cualquier raíz incluso de orden múltiple, al menos una raíz simple debe estar fuera del círculo y por lo menos una raíz de orden múltiple sobre el círculo unitario.

### 3.4 EJEMPLOS Y APLICACIONES

#### 3.4.1 MODO DE DE BUSQUEDA

Un ejemplo de sistema no lineal lo representa el *Modo de Búsqueda*. Para este modo la no linealidad está representada en el efecto de saturación que es muy común en sistemas de control.

Para el diseño de sistemas de control se debe tener en cuenta que luego de cierto rango, el amplificador de potencia puede entrar en saturación, momento en el cual el sistema funciona en lazo abierto, este método se utiliza para una aproximación rápida a la pista destino.

Para realizar el análisis de estabilidad se utiliza la función descriptiva de la no linealidad del modelo. Donde  $N.L$  corresponde al bloque de saturación como se indica en la Fig 3.3

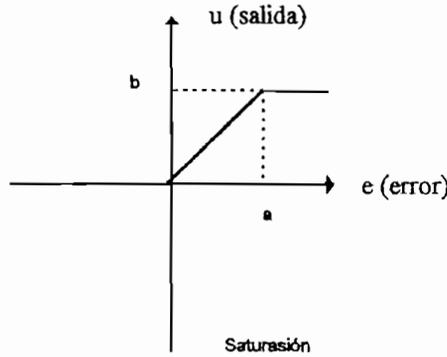


Fig 3.3 Diagrama del Elemento no Lineal

y cuya función descriptiva es:

$$N(A) = \begin{cases} m & A \leq a \\ \frac{2.m}{\pi} \left[ \sin^{-1} \frac{a}{A} + \frac{a}{A} \sqrt{1 - \left( \frac{a}{A} \right)^2} \right] & A \geq a \end{cases} \quad (3.11)$$

Donde  $m$  es la pendiente  $m = \frac{b}{a}$ . Para nuestro análisis  $a = 1$ .

Se determina la función de transferencia equivalente del sistema  $H(s)$  donde

$$H(s) = e^{-Ls} . k_a . k_f . G_p(s) \quad (3.12)$$

Donde  $G_p(s)$  es la función de transferencia de la parte mecánica y se asume como:

donde

$$N_a = 0.072\omega^4 - 2.6891 \cdot 10^5 + 2.24 \cdot 10^8 \quad (3.20)$$

$$N_b = (278.4\omega^2 - 3.216 \cdot 10^5) \cdot \omega \quad (3.21)$$

$$D_t = 0.000144\omega^6 - 578.568\omega^4 - 9.597 \cdot 10^5\omega^2 + 4 \cdot 10^8 \quad (3.22)$$

Se cumple que  $\text{Im } g H(j\omega) = 0$

esto es 
$$\frac{N_b}{D_t} = 0 \quad (3.23)$$

Obteniendo el valor de  $\omega = 34$

Ahora 
$$\text{Re } H(j\omega) = -\frac{1}{N(A)} \quad (3.24)$$

$$\frac{N_a}{D_t} = -\frac{1}{N(A)}$$

Reemplazando en  $N_a$  y  $D_t$  el valor de  $\omega$  se obtiene  $N(A) = 0.4$

y para que exista oscilación 
$$-\frac{1}{m} > -\frac{1}{0.4}$$

con lo cual  $m > 0.4$

Suponiendo que  $m = 1$  se tiene:

$$\frac{2}{\pi} \left[ \sin^{-1} \frac{1}{A} + \frac{1}{A} \sqrt{1 - \left(\frac{1}{A}\right)^2} \right] = 0.4 \quad (3.25)$$

Resolviendo la ecuación numéricamente se tiene que  $A = 3.1281$

Con lo cual se concluye que bajo estas condiciones el sistema es estable y es factible su análisis.

Para el *Modo de Posicionamiento* y el *Modo de Seguimiento* el sistema se reduce a un sistema lineal.

### 3.4.2 MODO DE POSICIONAMIENTO Y SEGUIMIENTO

En la Fig 3.4 se presenta un ejemplo del *Modo de Posicionamiento* y el *Modo de Seguimiento* de pista en lazo cerrado.

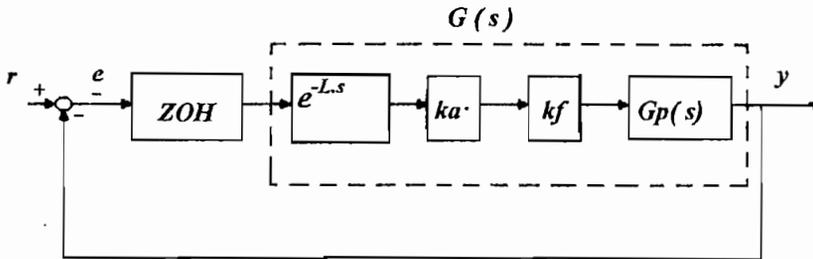


Fig 3.3 Diagrama de Bloques del *Modo de Seguimiento*

De donde  $G_p(s)$  es la función de transferencia de la parte mecánica (3.13),  $ka = 2 \text{ A/V}$  y  $kf = 2.8 \text{ N/A}$  son constantes del amplificador y constante de fuerza respectivamente,  $e^{-sL}$  es retardo de transporte.

Se tiene entonces:

$$H(s) = \frac{-6s + 1.12 \cdot 10^4}{0.012s^3 + 24s^2 + 18s + 2 \cdot 10^4} \quad (3.26)$$

discretizando este sistema con el empleo del *ZOH* y  $T = 0.005$  se tiene:

$$G(z) = \frac{0.003728z^2 + 0.007676z + 0.0002326 \cdot 10^{-8}}{z^3 - 1.978z^2 + 0.9984z - 4.532 \cdot 10^{-5}} \quad (3.27)$$

Reemplazando  $G(z)$  en (3.10) nos queda

$$z^3 - 1.974272z^2 + 1.006076z + 0.00018728 = 0 \quad (3.28)$$

y cuyas raíces son:

$$z_1 = 0.9887 + 0.1437 i$$

$$z_2 = 0.9887 - 0.1437 i$$

$$z_3 = 0.00004539$$

El modulo de las raíces  $|z_i| < 1$  ( $i=1,3$ ) con lo que se concluye que el sistema  $G(z)$  es estable.

Para realizar el control por conmutación se considera que todos los métodos son estables. El análisis de estabilidad de cada modo se lo realiza utilizando técnicas convencionales de control lineal y no lineal.

En el siguiente capítulo se presenta la compensación de la planta en los tres modos de operación que trabaja el sistema y métodos para disminuir el transitorio presente en el instante de cambio de un modo de control a otro.

## **Capítulo 4: TECNICAS DE CONTROL EN DRIVERS DE DISCOS MAGNETICOS**

4.1 Introducción

4.2 Modelo a la Planta

4.3 Modos de Operación

4.3.1 Modo de Búsqueda de Pista

4.3.2 Modo de Posicionamiento y Seguimiento de Pista

4.4 Esquema de Control

4.5 Criterios de Conmutación

4.6 Compensación con Valores Iniciales

## 4. TECNICAS DE CONTROL EN DRIVERS DE DISCOS MAGNETICOS.

### 4.1 INTRODUCCION

En el presente capítulo se describe el modelo de la planta para una unidad de disco duro, los parámetros que intervienen en la misma, y los tres modos de operación en los cuales trabaja el sistema para la lectura/escritura de datos. Se determina la forma de compensación para cada modo de operación, estableciendo los criterios de conmutación de un modo a otro. Finalmente se realiza un estudio de los métodos de compensación de valores iniciales descrito en las referencias [3], [6], [7], [8]. Estos métodos pretenden reducir el efecto de los transitorios causados por el cambio de un modo a otro.

### 4.2 MODELO DE LA PLANTA

La planta cuya entrada es  $u(s)$  y su salida  $y(s)$  es la posición de la cabeza de lectura/escritura y se la representa de la siguiente forma:

$$y(s) = k_a \cdot k_f \cdot G_p(s) \cdot e^{-L \cdot s} \cdot u(s) \quad (4.1)$$

$$G(s) = k_a \cdot k_f \cdot G_p(s) \cdot e^{-L \cdot s} \quad (4.2)$$

Donde  $G_p(s)$  es la función de transferencia de la parte mecánica y está modelada como un sistema de segundo orden, con varias frecuencias de resonancia mecánica

$$G_p(s) = \frac{1}{m \cdot s^2 + b \cdot s + k} + \sum_i \frac{k_i \cdot \omega_i^2}{s^2 + 2 \xi_i \cdot \omega_i s + \omega_i^2} \quad (4.3)$$

Asumimos que la resonancia mecánica es cancelada por filtros Notch (Muesca) [5], quedando un sistema de segundo orden

$$G_p(s) = \frac{1}{m \cdot s^2 + b \cdot s + k} \quad (4.4)$$

Donde  $m$  es la masa,  $k$  es una constante de resorte,  $b$  es una constante de amortiguamiento,  $k_a$  representa la ganancia del amplificador y  $k_f$  es la constante de fuerza del VCM.

El retardo del microprocesador y el retardo del amplificador se representa por la aproximación de Padé de primer orden esto es:

$$P_d = \frac{-0.5L \cdot s + 1}{0.5L \cdot s + 1} \quad (4.5)$$

donde  $L$  es el tiempo de retardo.

La unidad de disco duro que se utiliza para el análisis es de 3.5 pulgadas con 6000 pistas por pulgada. Para este disco de prueba se tienen los siguientes parámetros:

- ◆  $k_a = 2 \text{ A/V}$
- ◆  $k_f = 2.8 \text{ N/A}$
- ◆  $m = 12 \text{ gr}$
- ◆  $b = 0.004 \text{ N.m/(rad/seg)}$
- ◆  $k = 10 \text{ N.m}$
- ◆  $L = 0.001 \text{ s}$

### 4.3.2 MODO DE POSICIONAMIENTO Y SEGUIMIENTO DE PISTA

El Modo de Posicionamiento y el Modo de Seguimiento de pista se representa en un sistema compensado con realimentación en la Fig 4.2.

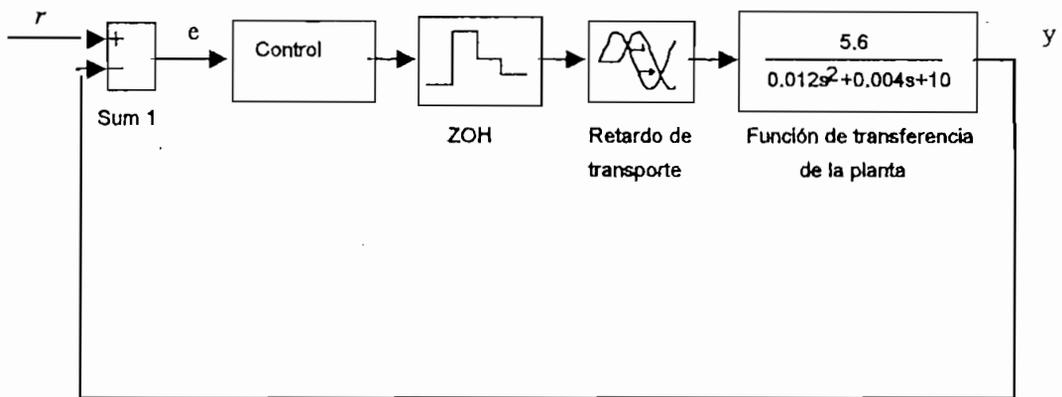


Fig 4.2 Diagrama de bloques para el Modo de Posicionamiento y Modo de Seguimiento de pista.

## 4.4 ESQUEMAS DE CONTROL

Se analiza la respuesta en el tiempo de la parte mecánica de la planta para una señal de entrada paso, obteniéndose la respuesta que se observa en la Fig 4.3

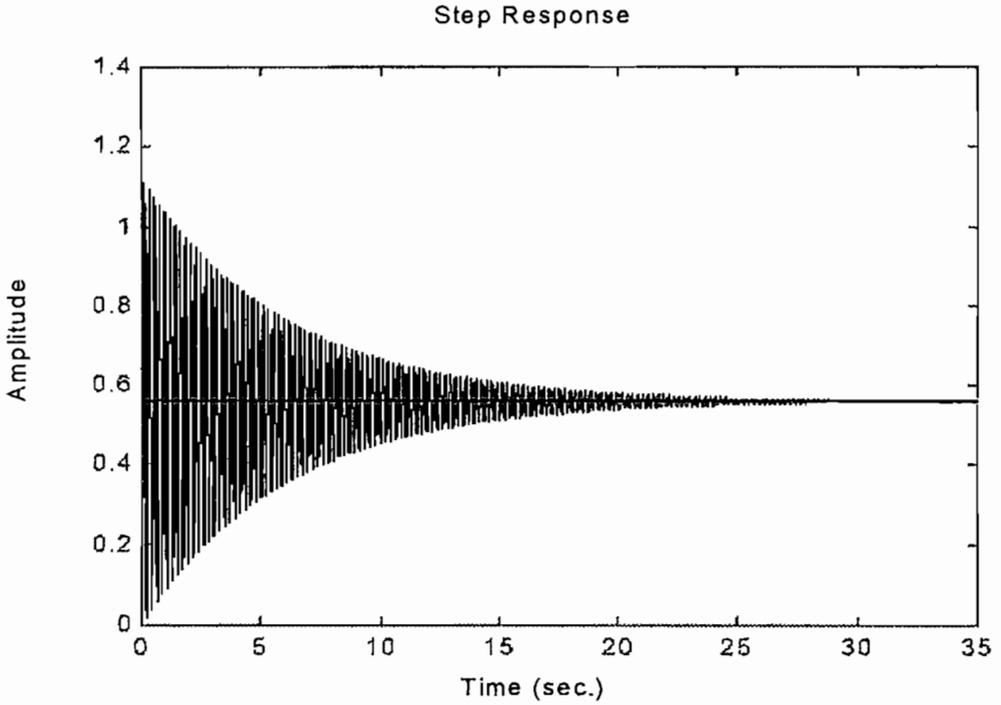


Fig 4.3 Respuesta de la planta a una señal de entrada paso

Como se puede observar el sistema es altamente oscilante y para eliminar estas oscilaciones se realiza la compensación del sistema.

**Modo de Posicionamiento y Modo de Seguimiento de pista.** Para cada modo de operación, se coloca un filtro Notch  $G_n(z)$  que cancela la resonancia mecánica y oscilaciones que se presenta en el sistema, mejorando el desempeño del sistema y minimizando el efecto de los polos complejos de la planta.

$$G_n(z) = kd * \frac{(z^2 + a.z + b)}{(z^2 + c.z + d)} \quad (4.6)$$

El numerador del filtro  $(z^2 + a.z + b)$  debe ser colocado de tal forma que se cancelen los polos complejos no deseados de la planta. Los polos del control se escogen de tal forma que la estabilidad sea la deseada.

Para encontrar la ganancia  $kd$  se cumple que  $G_n(1) = 1$ , con lo cual para el modo de posicionamiento y el modo de seguimiento de pista, el filtro Notch es:

$$G_n(z) = 0.2895 * \frac{(z^2 - 1.9775.z + 0.9983)}{(z - 0.5).(z - 0.9603)} \quad (4.7)$$

La función de transferencia de la plata con filtro Notch es:

$$G_1 = G_n(z).G(z) \quad (4.8)$$

El LGR en el plano  $z$  de  $G_1(z)$  se presenta en la Fig 4.4

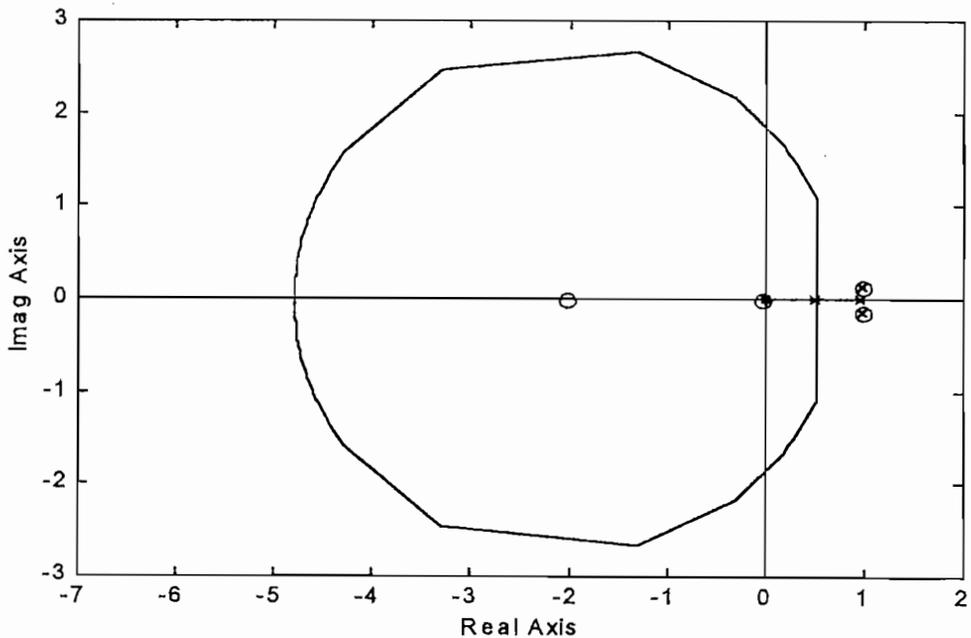


Fig 4.4 LGR discreto del sistema con filtro Notch

El LGR del sistema con filtro Notch abandona rápidamente el círculo unitario por lo cual el sistema sigue siendo inestable, entonces se realiza otra compensación para mejorar el transitorio y el error de posición con una red de adelanto-retraso cuya forma es:

$$G_{el} = \frac{k \cdot (z+a) \cdot (z+c)}{(z+b) \cdot (z+d)} \quad (4.9)$$

Para el diseño, las especificaciones que se deben cumplir son:

- ◆  $M_p \leq 5\%$
- ◆  $t_s \leq 2 \text{ seg}$
- ◆  $E_p \leq 5\%$

Empleando las ecuaciones

$$M_p = e^{-\frac{\pi \cdot \xi}{\sqrt{1-\xi^2}}} \cdot 100 \quad (4.10)$$

$$t_s = \frac{4}{\xi \cdot \omega_n} \quad (4.11)$$

Se encuentra el valor  $\xi = 0.69$  de (4.10) y  $\omega_n = 2.8986$  de (4.11). Con los valores de  $\xi$  y  $\omega_n$  se encuentra los polos deseados  $s_{1,2}$  en el plano  $s$

$$p_{1,2} = -\xi \cdot \omega_n \pm j \omega_n \cdot \sqrt{1-\xi^2} \quad (4.12)$$

Obteniéndose:

$$p_{1,2} = -2 \pm j2$$

Estos puntos son llevados al plano  $z$  utilizando la siguiente ecuación:

$$z_{1,2} = e^{sT} \quad (4.13)$$

obteniendo los siguientes puntos:

$$z_{1,2} = 0.5265 \pm j.0.8384$$

Para el compensador de adelanto se utiliza el método del LGR presentado en la Fig 4.5

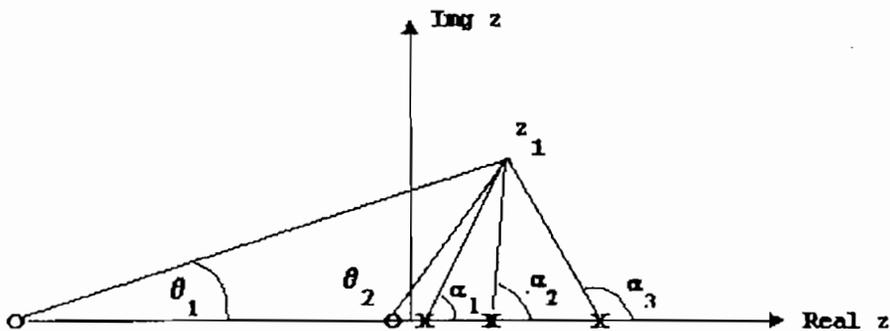


Fig 4.5 Compensación de adelanto de fase utilizando el método de LGR.

Se tiene entonces la siguiente red de adelanto:

$$G_{ad} = \frac{k_{ad} \cdot (z - 0.9603)}{(z - 0.76)} \quad (4.14)$$

Ahora se utiliza una red de retraso para mejorar el error de posición, esta es:

$$G_{\pi} = \frac{k_{\pi} \cdot (z - 0.5)}{(z - 1)} \quad (4.15)$$

Para el valor de la ganancia de la red adelanto-retraso se utiliza la condición de módulo  $\left| G_{e1}(z) \right|_{z=0.5265+j0.8384} = 1$ , entonces la función de transferencia obtenida es:

$$G_{e1} = \frac{1.058 \cdot (z - 0.9603) \cdot (z - 0.5)}{(z - 0.76) \cdot (z - 1)} \quad (4.16)$$

La función de transferencia del sistema  $G_f = G_1 * G_{e1}$  compensado con filtro Notch, red adelanto-retraso y además con un reajuste de ganancia es:

$$G_f = \frac{2 \cdot (z + 2.0284) \cdot (z + 0.03076)}{(z - 0.0000453) \cdot (z - 0.76) \cdot (z - 1)} \quad (4.17)$$

El LGR del sistema compensado es el observado en la Fig 4.6

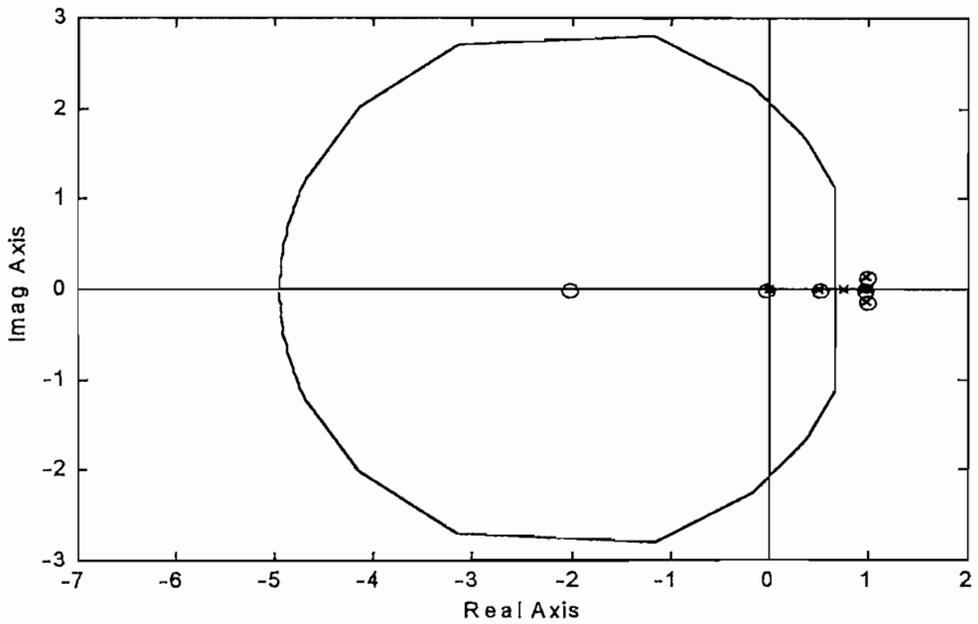


Fig 4.6 LGR del sistema compensado

La respuesta en el tiempo del sistema a una entrada escalón unitario es la que se observa en la Fig 4.7.

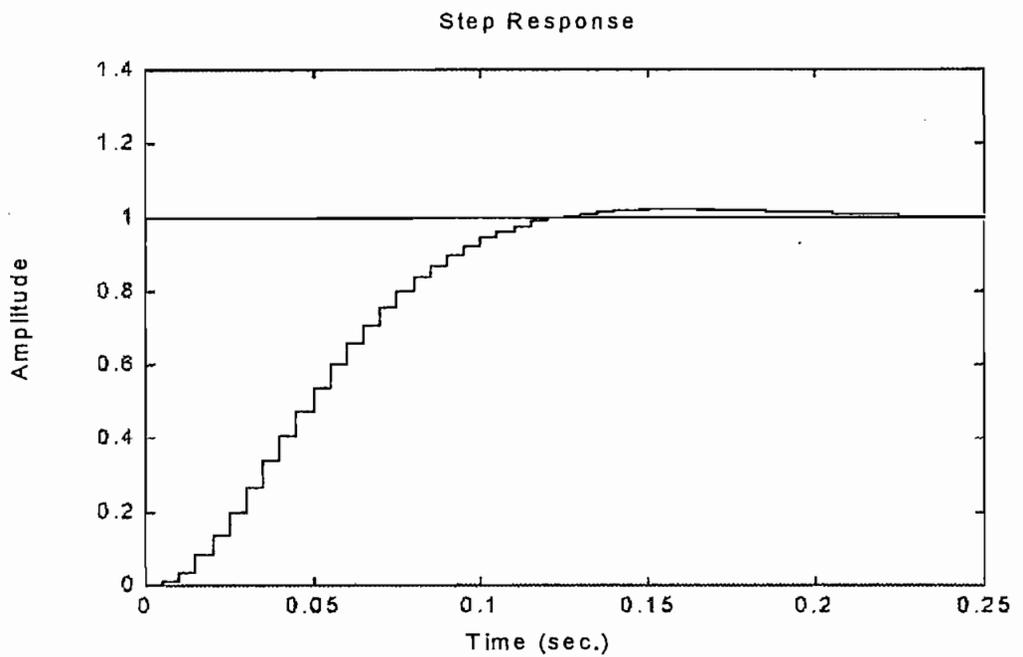


Fig 4.7 Respuesta del sistema compensado a una entrada escalón unitario.

Como se puede observar de la Fig 4.7 el sistema cumple con las especificaciones requeridas de  $M_p$ ,  $t_s$  y  $E_p$ .

**Modo de Búsqueda de pista.** Para el sistema no lineal formado en este modo de operación, se realiza la compensación del sistema colocando un filtro Notch  $G_n(z)$  y una red adelanto-retraso  $G_{cl}(z)$ , igual a los utilizados en los modos anteriores.

Donde la función de transferencia del compensador es:

$$G_{cl} = G_n * G_{cl} \quad (4.18)$$

$$G_{cl} = 0.3063 * \frac{(z^2 - 1.9775z + 0.9983)}{(z - 0.0000453)(z - 1)} \quad (4.19)$$

La respuesta del sistema a una señal de entrada paso es la que se presenta en la Fig 4.8.

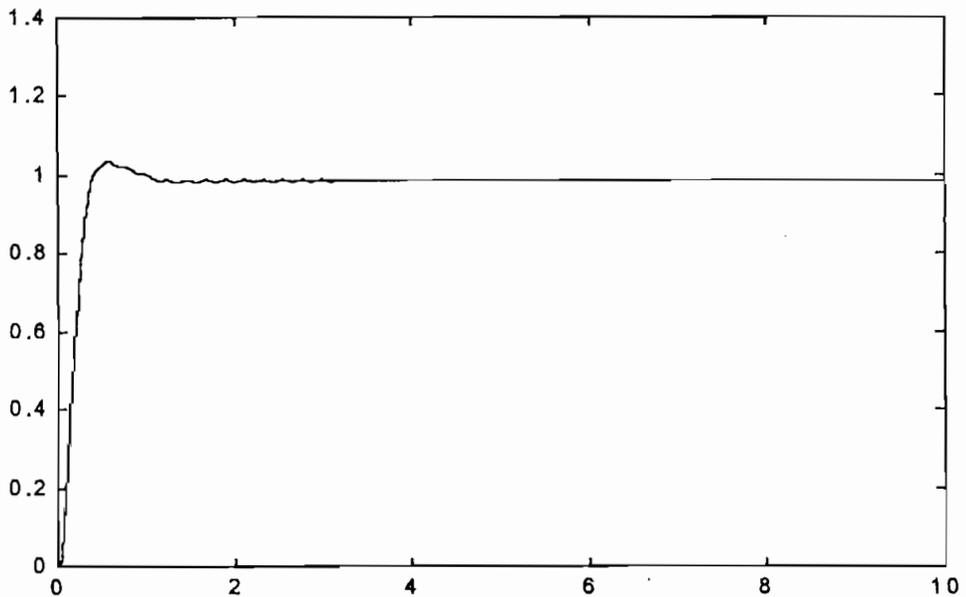


Fig 4.8 Respuesta a una señal de entrada paso del sistema compensado

Se puede observar en la gráfica que el sistema es estable cumpliendo con las especificaciones requeridas, con lo cual nos permite una respuesta eficaz del sistema.

#### **4.5 CRITERIOS DE CONMUTACION**

La tecnología en el control del servo tiene algunos propósitos importantes [6]. Entre los que se pueden mencionar:

1. Mover las cabezas a una pista destino para reproducir o grabar datos tan rápidamente como sea posible. Este tiempo de movimiento se llama *tiempo de búsqueda*. Reducir el *tiempo de búsqueda* es importante para alcanzar un alto rango de transferencia de datos.
2. Mejorar el posicionamiento de las cabezas de lectura/escritura en una pista destino, aunque todas las cabezas son movidas, solo una de ellas lee o escribe los datos.

Para mejorar la respuesta en el momento del cambio, se coloca el *Modo de Posicionamiento* entre el *Modo de Búsqueda* y el *Modo de Seguimiento*. Esto nos permite suavizar el posicionamiento de la cabeza sobre la pista destino.

Para un disco de 3.5 pulgadas hay alrededor de 3000 pistas en cada lado del mismo. Así, la habilidad de movimiento desde la pista presente a la próxima, puede traer consigo el movimiento de sobre las 2999 pistas restantes. El *tiempo de búsqueda* entre pistas adyacentes puede ser tan corto como 2 ms, en cambio el movimiento entre la pista exterior e interior consume aproximadamente 20 ms. En promedio, el *tiempo de búsqueda* (que es el que le toma a las cabezas de L/E posicionarse en una localización al azar), hoy en día maneja rangos de 8 a 14 ms.

Cuando se produce una acción de L/E en una unidad de disco duro, el primer modelo de control seleccionado es el de búsqueda. Cuando la cabeza está cerca de la pista destino, el control se cambia al *Modo de Posicionamiento* e inmediatamente se cambia al *Modo de Seguimiento*.

Para cambiar del *Modo de Búsqueda* al *Modo de Posicionamiento*, es necesario que el espacio entre la posición de pista presente y la posición de la pista destino sea aproximadamente unos 6  $\mu\text{m}$ , mientras que el cambio al *Modo de Seguimiento* es instantáneo, en cuyo caso la posición exacta debe ser mantenida con un rango de  $\pm 0.25 \mu\text{m}$  sobre el centro de la pista destino.

#### 4.6 COMPENSACION CON VALORES INICIALES

En general para los sistemas diseñados se asume condiciones iniciales cero, pero en este caso no se ignoraran las condiciones iniciales del sistema en el momento de cambio de un modo a otro, teniendo las variables de estado tal como la velocidad y posición con valores iniciales distintos de cero.

Para el control por conmutación se emplea una técnica llamada compensación de valor inicial, la cual considera condiciones iniciales no nulas en el momento de cambio [3].

Para el *Modo de Búsqueda*, *Modo de Posicionamiento* y *Modo de Seguimiento* de pista se consideran como sistemas de una entrada y una salida (SISO).

A continuación se presentan las ecuaciones de estado del control y planta en tiempo discreto.

Planta:

$$\begin{aligned} X_p(k+1) &= A_p \cdot X_p(k) + B_p \cdot u(k) \\ y(k) &= C_p \cdot X_p(k) \end{aligned} \quad (4.20)$$

Control:

$$\begin{aligned} X_c(k+1) &= A_c \cdot X_c(k) + B_c (r(k) - y(k)) \\ u(k) &= C_c \cdot X_c(k) + D_c (r(k) - y(k)) \end{aligned} \quad (4.21)$$

Donde  $X_p$ ,  $X_c$  son vectores de estado de la planta y control respectivamente,  $u$  la entrada de la planta,  $r$  la referencia,  $y$  la variable de control y  $A_p, B_p, C_p, A_c, B_c, C_c, D_c$  son matrices reales.

Se obtiene la ecuación a variables de estado en lazo cerrado de la planta (4.20) compensada con el control (4.21)

$$\begin{aligned} X(k+1) &= A.X(k) + B.u(k) \\ y(k) &= C.X(k) \end{aligned} \quad (4.22)$$

cambiando al plano  $z$  la ecuación (4.22)

$$Z[X(k+1)] = Z[A.X(k) + B.u(k)] \quad (4.23)$$

$$z.X(z) - z.X(0) = A.X(z) + B.u(z) \quad (4.24)$$

$$y(z) = C.X(z) \quad (4.25)$$

$$X(z).(z.I - A) = z.X(0) + B.u(z) \quad (4.26)$$

$$y(z) = C.(z.I - A)^{-1}.[z.X(0) + B.u(z)] \quad (4.27)$$

$$y(z) = C.(z.I - A)^{-1}.z.X(0) + C.(z.I - A)^{-1}.B.u(z) \quad (4.28)$$

donde  $X = \begin{bmatrix} X_c^T & X_p^T \end{bmatrix}^T \quad (4.29)$

$$C = \begin{bmatrix} 0 & C_p \end{bmatrix} \quad (4.30)$$

$$A = \begin{bmatrix} A_c & -B_c.C_p \\ B_p.C_c & A_p - B_p.D_c.C_p \end{bmatrix} \quad (4.31)$$

$$B = \begin{bmatrix} B_c \\ B_p.D_c \end{bmatrix} \quad (4.32)$$

se tiene entonces

$$y(z) = \frac{z \cdot N_p(z)}{D(z)} \cdot X_p(0) + \frac{z \cdot N_c(z)}{D(z)} \cdot X_c(0) \quad (4.41)$$

donde

$$D(z) = \det [ zI - A ] \quad (4.42)$$

#### 4.6.1 MÉTODO DE DISEÑO POR FUNCION DE MINIMO COSTO

Se define una función de costo [3], [4]:

$$J = \sum_{k=0}^{\infty} X(k)^T \cdot Q \cdot X(k) \quad (4.43)$$

Donde  $Q$  es una matriz cuadrada cuyos elementos son no negativos.

Utilizando la ecuación de Lyapunov [6]:

$$A^T \cdot P \cdot A - P = -Q \quad (4.44)$$

se obtiene

$$J = X(0)^T \cdot P \cdot X(0) \quad (4.45)$$

$$J = \begin{bmatrix} X_c(0)^T & X_p(0)^T \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} P_{11} & P_{12} \\ P_{12}^T & P_{22} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} X_c(0) \\ X_p(0) \end{bmatrix} \quad (4.46)$$

Donde  $P$  es una matriz definida positiva, se cumple que para  $X_c(0)$   $J > 0$ . Existe un valor mínimo de  $J$  para  $X_c(0)$ , derivando  $J$  respecto a  $X_c(0)$  se obtiene

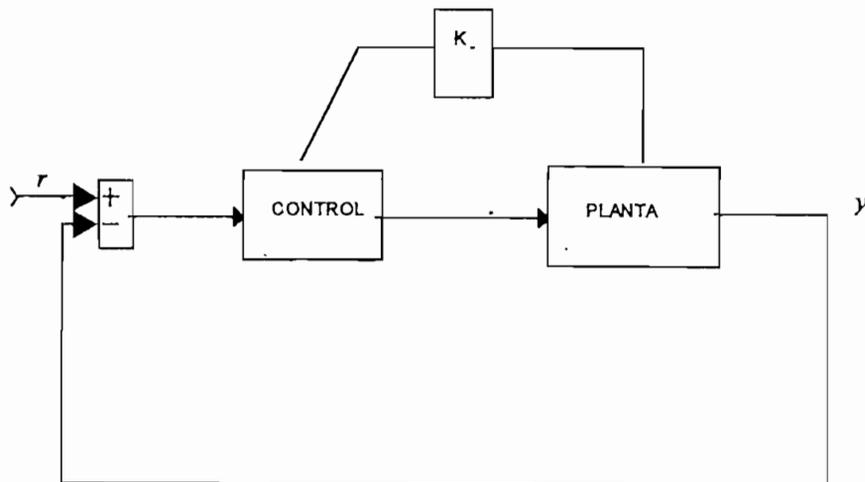
$$\frac{\partial J}{\partial X_c(0)} = 2P_{22} \cdot X_c(0) + 2P_{12}^T \cdot X_p(0) = 0 \quad (4.47)$$

con lo cual

$$X_c(0) = -P_{22}^{-1} \cdot P_{12}^T \cdot X_p(0) \quad (4.48)$$

Como se observa en la Fig 4.9,  $X_c(0)$  esta definida para las variables de estado del control.

Mediante este método se mejora las características transitorias minimizando  $J$ .



**Fig 4.9** Diagrama del método de compensación por *Función de Mínimo Costo*

### 4.6.2 MÉTODO DE DISEÑO POR CANCELACION DE POLOS Y CEROS

Se puede generar los valores iniciales introduciendo una matriz  $K$  de orden  $m \times n$  de coeficientes reales [4]:

$$X_c(0) = K \cdot X_p(0) \quad (4.49)$$

Substituyendo (4.49) en (4.41), tomando por simplicidad  $r = 0$  ya que  $r$  es el centro de la pista destino tenemos:

$$y(z) = \frac{N_p(z) + N_c(z) \cdot K}{D(z)} \cdot X_p(0) \quad (4.50)$$

Se indica con (4.50) que la señal de posición  $y(k)$  respecto a las condiciones iniciales diferentes de cero, pueden ser desplazadas a los valores deseados, seleccionando valores apropiados de  $K$ .

Esto sugiere que la respuesta del sistema puede ser mejorada substituyendo ceros para cancelar los polos indeseables de la ecuación.

Representando la ecuación (4.50) para cada elemento se tiene

$$y(z) = D(z)^{-1} \cdot z \cdot [ (k_{11} \cdot N_1 + k_{12} \cdot N_2 + \dots + k_{n1} \cdot N_n + N_{n+1}) \cdot x_{p1}(0) + (k_{12} \cdot N_1 + k_{22} \cdot N_2 + \dots + k_{n2} \cdot N_n + N_{n+2}) \cdot x_{p2}(0) + \vdots + (k_{1m} \cdot N_1 + k_{2m} \cdot N_2 + \dots + k_{nm} \cdot N_n + N_{n+m}) \cdot x_{pm}(0) ] \quad (4.51)$$

Donde  $k_{ij}$  es un elemento de la matriz  $K$ . En el numerador de la ecuación (4.51) para cada  $x_{pj}(0)$  ( $j = 1, \dots, m$ ) se incluye  $n$  coeficientes desconocidos  $k_{ij}$  respectivamente.

## **Capitulo 5: SIMULACION DEL SISTEMA**

### **5.1 Introducción**

### **5.2 Interface del Usuario**

#### **5.2.1 Diagramas de Bloques de las Subpantallas**

#### **5.2.2 Interface Descripción de las Subpantallas**

## 5. SIMULACION DEL SISTEMA

### 5.1 INTRODUCCION.

En el presente capítulo se describe la forma como el usuario se puede relacionar con el programa implementado, para lo cual inicialmente se determina la interface de usuario.

### 5.2 INTERFACE DEL USUARIO.

Inicialmente se debe correr el programa **MATLAB 5**, luego se ingresa por teclado *dskdemo* que ejecuta el archivo que permite el acceso al programa '*Sistemas de Control de Estructura Variable y su Aplicación a Drivers para Discos Magnéticos*'. La estructura general del programa se presenta en la Fig 5.1 para una mejor comprensión.

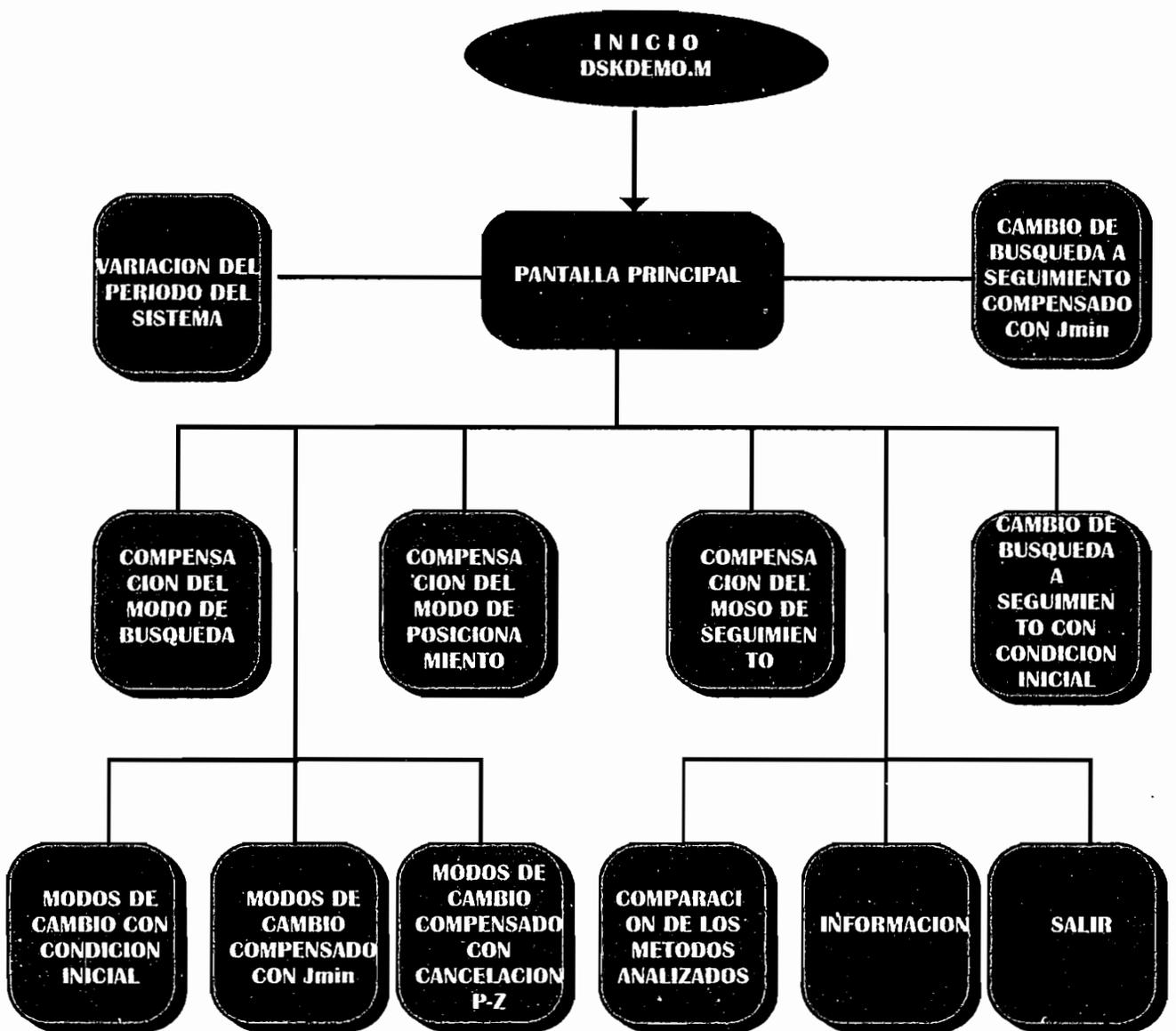


Fig 5.1 Diagrama de bloques de la estructura del programa

La pantalla principal del programa observada en la Fig 5.2 está distribuida de la siguiente manera: tiene en la parte superior izquierda datos informativos, en la parte inferior izquierda consta una gráfica de presentación y el lado derecho de la pantalla se coloca el menú principal que nos permiten seleccionar el acceso a los diferentes módulos de aplicación del sistema.

**Cambio de Búsqueda a Seguimiento con Condición Inicial:** Mediante la selección de este botón se presenta otras opciones que nos permiten observar el momento de cambio del *Modo de Búsqueda* a *Modo de Seguimiento*.

**Cambio de Búsqueda a Seguimiento compensado con  $J_{min}$ :** Seleccionando este botón se presentan otras opciones que nos permiten observar el instante de cambio del *Modo de Búsqueda* a *Modo de Seguimiento* de pista utilizando el método de compensación de *Función de Mínimo Costo* ( $J_{min}$ ).

**Modos de Cambio con Condición Inicial:** Mediante la llamada a este botón se presentan otras opciones que nos permiten observar el cambio del *Modo de Búsqueda* a *Modo de Posicionamiento* y de *Modo de Posicionamiento* a *Modo de Seguimiento* con condición inicial de posición.

**Modos de Cambio Compensado con  $J_{min}$ :** Esta opción nos permite observar el cambio del *Modo de Búsqueda* a *Modo de Posicionamiento* y de *Modo de Posicionamiento* a *Modo de Seguimiento* con compensación de condición inicial utilizando el método de *Función de Mínimo Costo*.

**Modos de Cambio Compensados con Cancelación de P-Z:** Permiten observar el cambio de *Modo de Búsqueda* a *Modo de Posicionamiento* y de *Modo de Posicionamiento* a *Modo de Seguimiento* con compensación de valor inicial utilizando el método de diseño de *Cancelación de Polos y Ceros* (P-Z).

**Comparación de los Métodos Analizados:** Con este botón se puede observar la comparación del método de compensación de valor inicial con *Función de Mínimo Costo* y *Cancelación de Polos y Ceros*.

**Información:** Nos permiten obtener información del paquete **MATLAB 5.0** y del programa implementado.

**Salir:** Esta opción nos permite salir del programa implementado.

### 5.2.1 DIAGRAMAS DE BLOQUES DE LAS SUBPANTALLAS

El diagrama de bloques para la Variación de Período del Sistema se presenta en la Fig 5.4

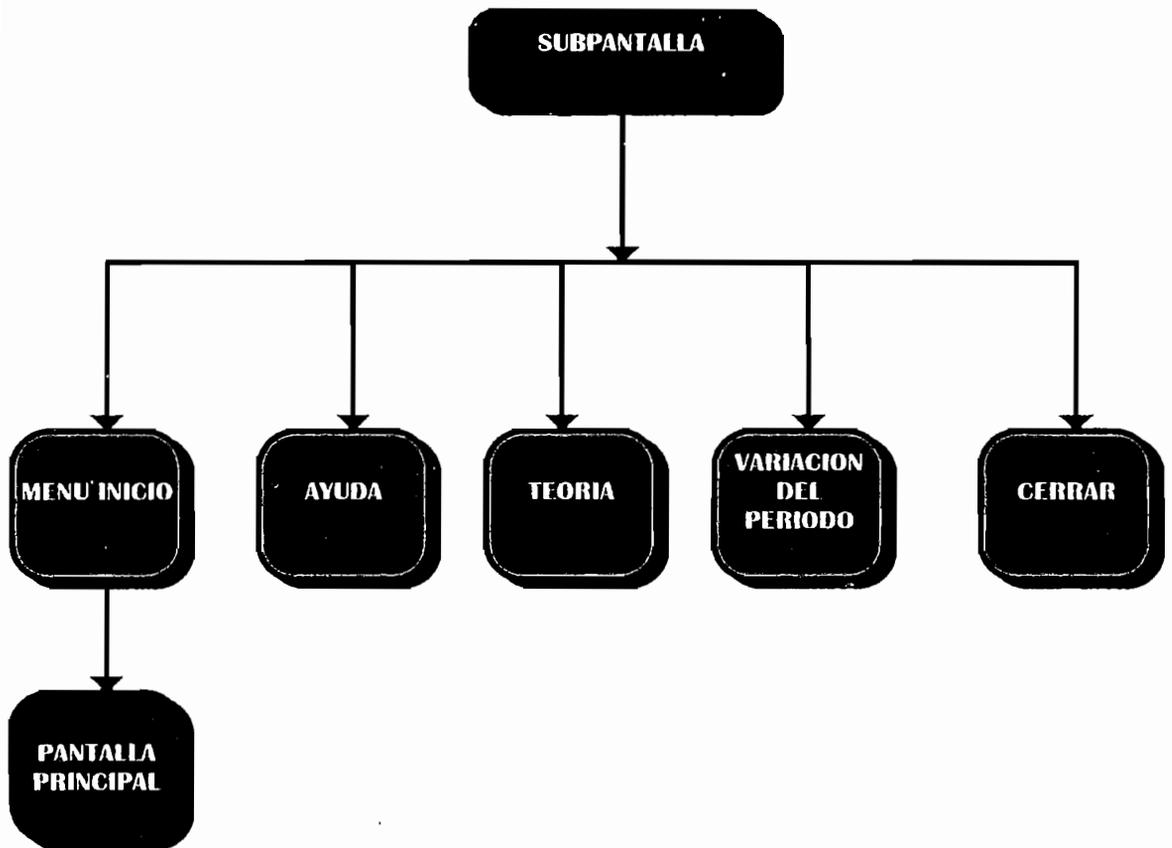


Fig 5.4 Diagrama de bloques de la estructura general de la subpantalla Variación de Período del Sistema

el diagrama de bloques para la Compensación del *Modo de Búsqueda* se presenta en la Fig 5.5

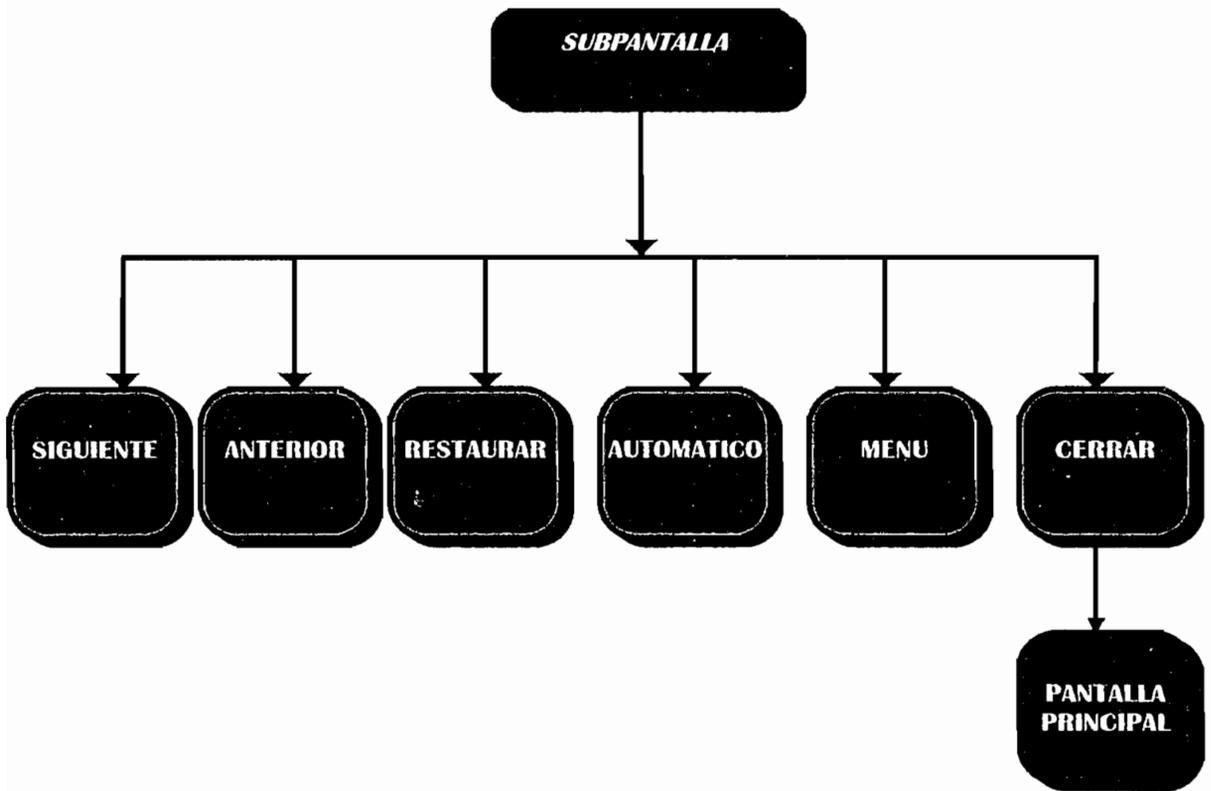


Fig 5.5 Diagrama de bloques de la estructura de la subpantalla *Modo de Búsqueda*

El menú de esta subpantalla presenta cinco opciones:

- **Siguiente:** Al seleccionar esta opción se avanza paso a paso el contenido de esta subpantalla.
- **Anterior:** Esta opción permite volver ha observar la respuesta obtenida anteriormente.
- **Restaurar:** Seleccionando esta opción se regresa inmediatamente al paso inicial de la subpantalla.
- **Menú Inicio:** Este nos permite salir de esta subpantalla y retornar a la pantalla principal.
- **Cerrar:** Esta opción nos permite salir del programa implementado.

El diagrama de bloques de las demás subpantallas que se presentan es similar a la mencionada anteriormente.

### 5.2.2 INTERFACE DESCRIPCION DE LAS SUBPANTALLAS

La subpantalla que accede a la **Variación de Período del Sistema**, se presenta en la Fig 5.6. Esta subpantalla muestra opciones que permiten la variación del periodo de muestreo del sistema, pudiendo observarse gráficamente el cambio de posición de los polos y ceros del sistema, tanto en tiempo continuo como en tiempo discreto.

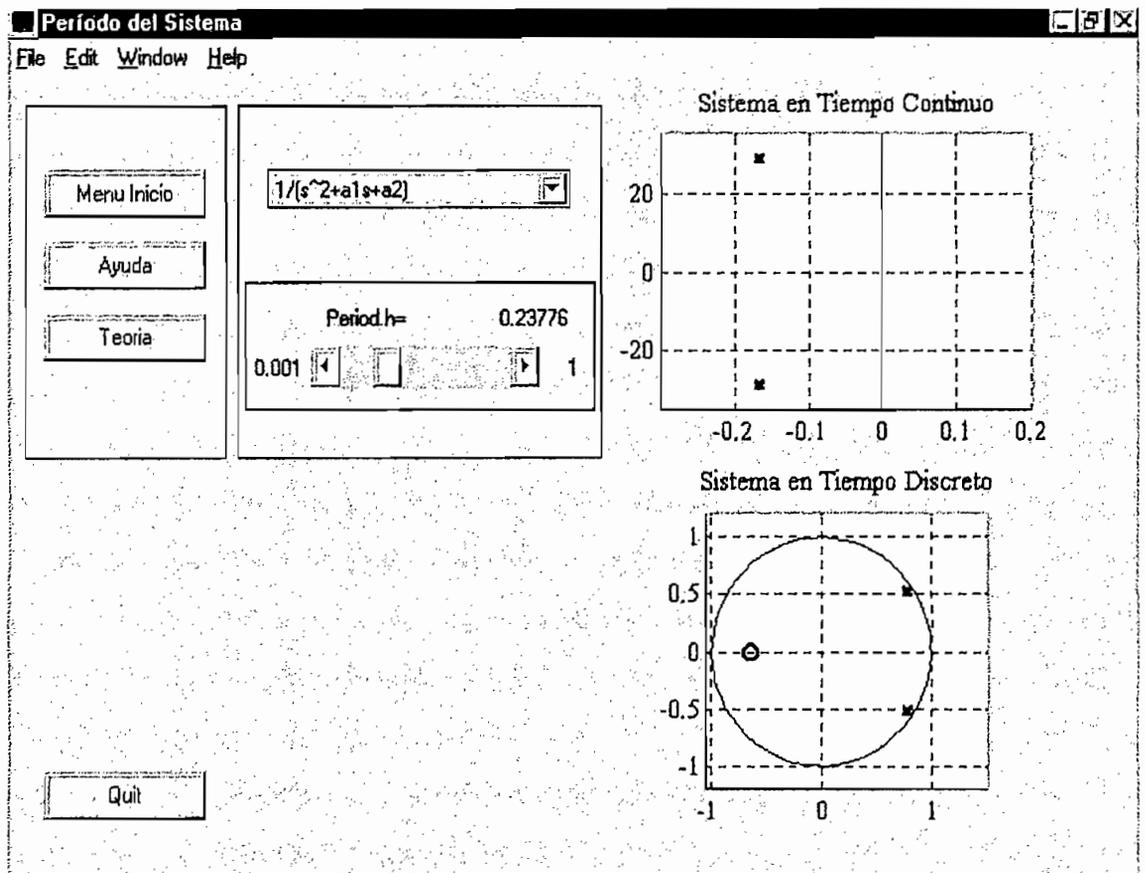
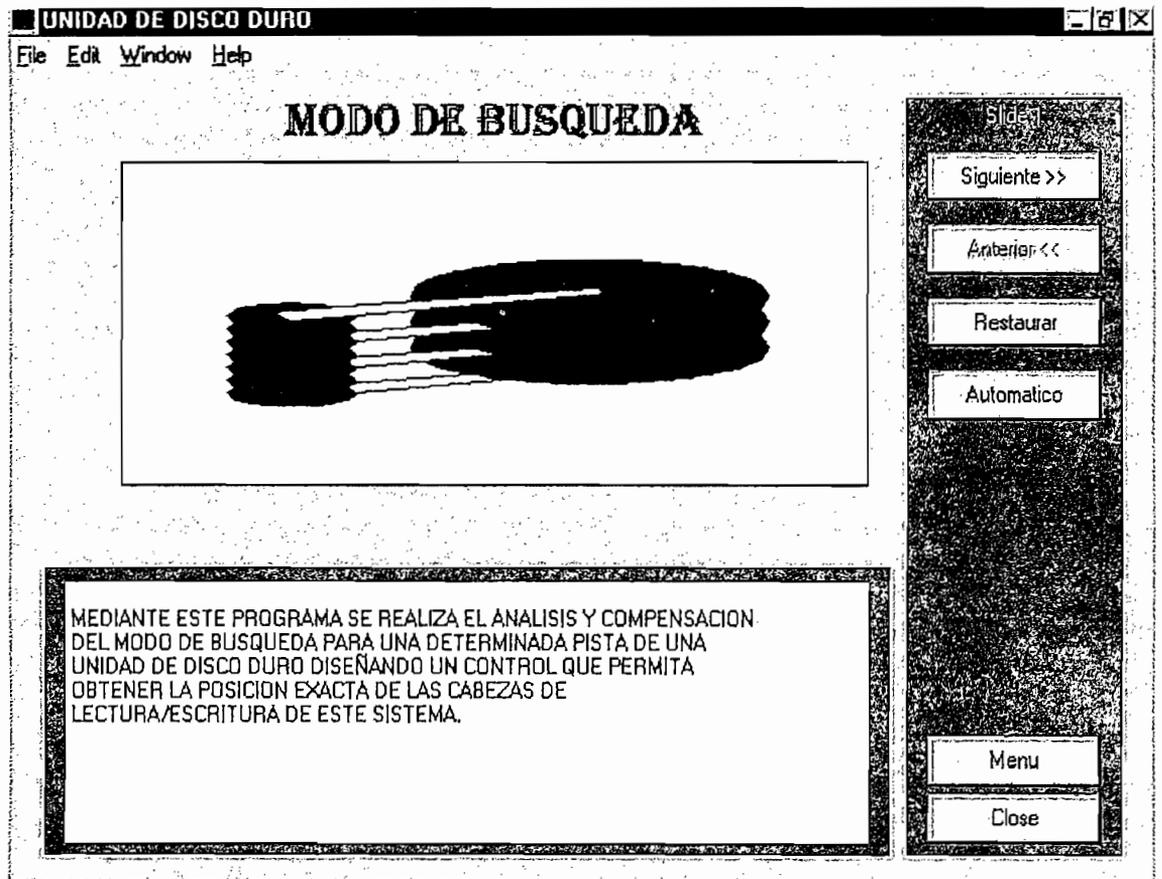


Fig 5.6 Subpantalla para acceder a la Variación de Período del Sistema

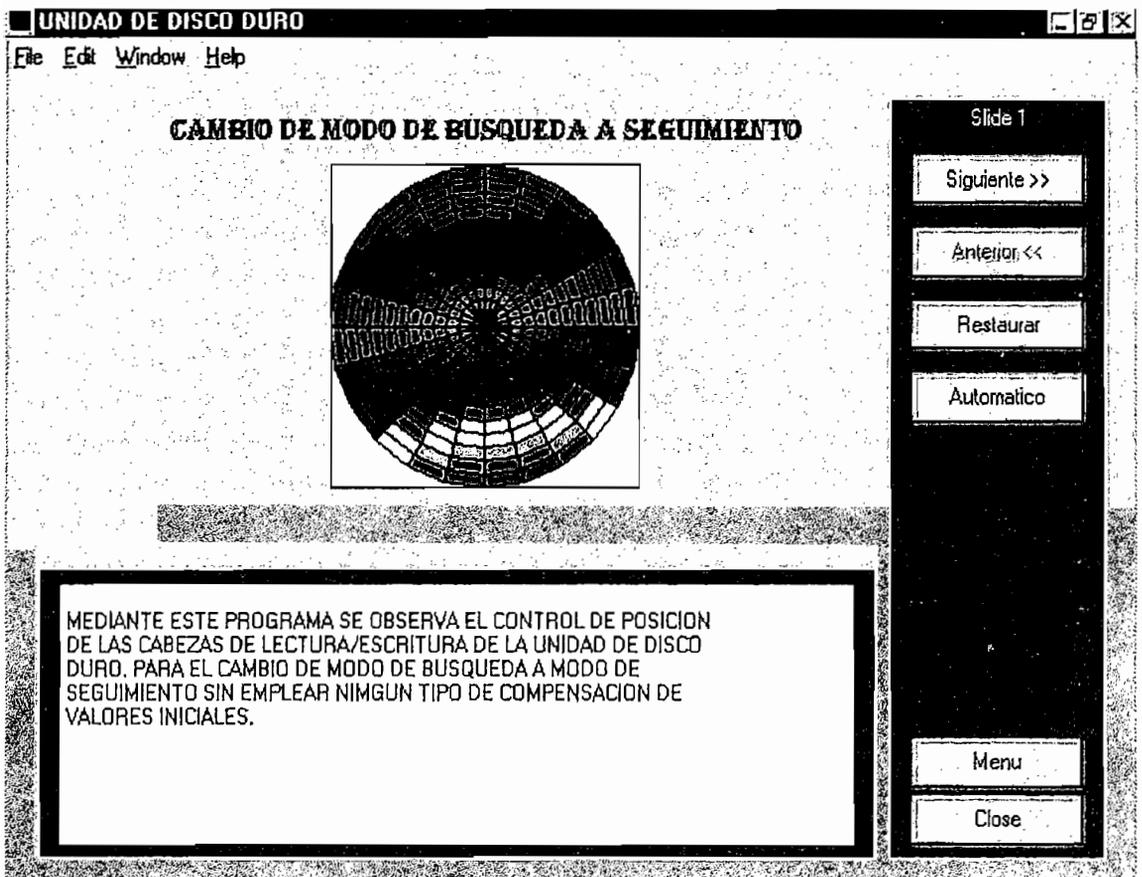
Subpantalla para la **Compensación del Modo de Búsqueda**. Inicialmente se presenta los datos de la planta analizada, luego se observa la respuesta del sistema a una señal de entrada paso, a continuación se observa la respuesta del sistema compensado. Las subpantallas que acceden a la Compensación del *Modo de Posicionamiento* y *Modo de Seguimiento* presentan los mismos pasos que la subpantalla *Modo de Búsqueda* presentada en la Fig 5.7.



**Fig 5.7** Subpantalla para acceder a la Compensación del *Modo de Búsqueda*

Subpantalla **Cambio de Búsqueda a Seguimiento con Condición Inicial**. Esta pantalla indicada en la Fig 5.8 contiene los siguientes pasos:

- Presenta los datos de la planta analizada
- Luego la respuesta a una señal de entrada paso del *Modo de Búsqueda* con condición inicial de posición
- A continuación se observa la respuesta del *Modo de Seguimiento* a una señal de entrada paso con condición inicial de posición
- Finalmente se observa el instante de cambio del *Modo de Búsqueda* al *Modo de Seguimiento* con condición inicial de posición.



**Fig 5.8** Subpantalla para acceder al momento de cambio del *Modo de Búsqueda* al *Modo de Seguimiento*

La subpantalla *Cambio de Búsqueda a Seguimiento Compensado con Jmin*. Tiene los mismos pasos que la subpantalla anterior con la diferencia

que se utiliza el método de compensación de valor inicial de *Función de Mínimo Costo* para el instante de cambio del *Modo de Búsqueda* a *Modo de Seguimiento*.

Subpantalla **Modos de Cambio con Condición Inicial**. Esta subpantalla presenta datos de la planta, luego la respuesta a una señal de entrada paso para el *Modo de Búsqueda*, *Modo de Posicionamiento* y para el *Modo de Seguimiento* con condición inicial de posición y por último se observa el instante de cambio del *Modo de Búsqueda* al *Modo de Posicionamiento* y del *Modo de Posicionamiento* al *Modo de Seguimiento*.

Subpantalla **Modos de Cambio compensado con  $J_{min}$** . En la Fig 5.9 se observa esta pantalla y dispone del siguiente contenido:

- Se presenta los datos de la planta analizada
- Luego la respuesta a una señal de entrada paso del *Modo de Búsqueda* con compensación de valor inicial utilizando el método de *Función de Mínimo Costo*
- A continuación se observa la respuesta del *Modo de Posicionamiento* a una señal de entrada paso con compensación de valor inicial utilizando el método de *Función de Mínimo Costo*
- Luego la respuesta del *Modo de Seguimiento* a una señal de entrada paso con compensación de valor inicial utilizando el método de *Función de Mínimo Costo*
- Finalmente se observa el momento de cambio del *Modo de Búsqueda* al *Modo de Posicionamiento* y del *Modo de Posicionamiento* al *Modo de Seguimiento*

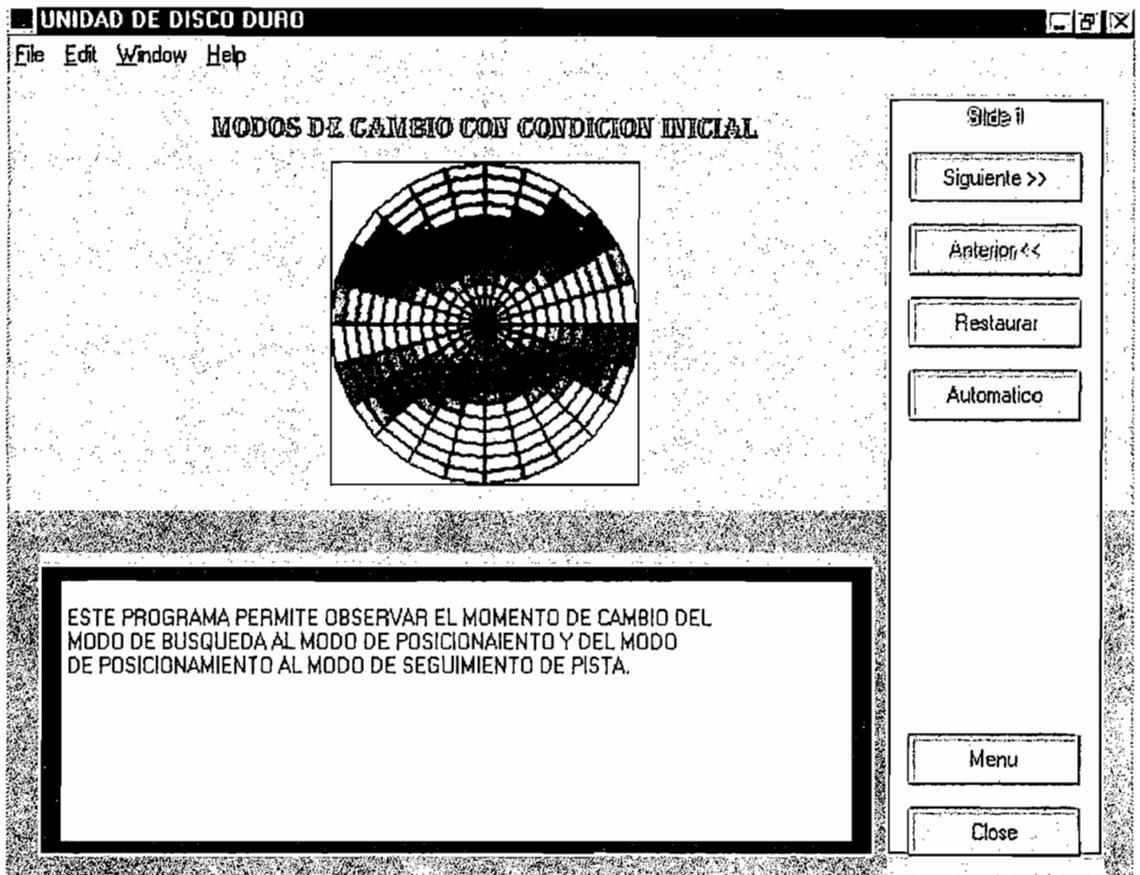
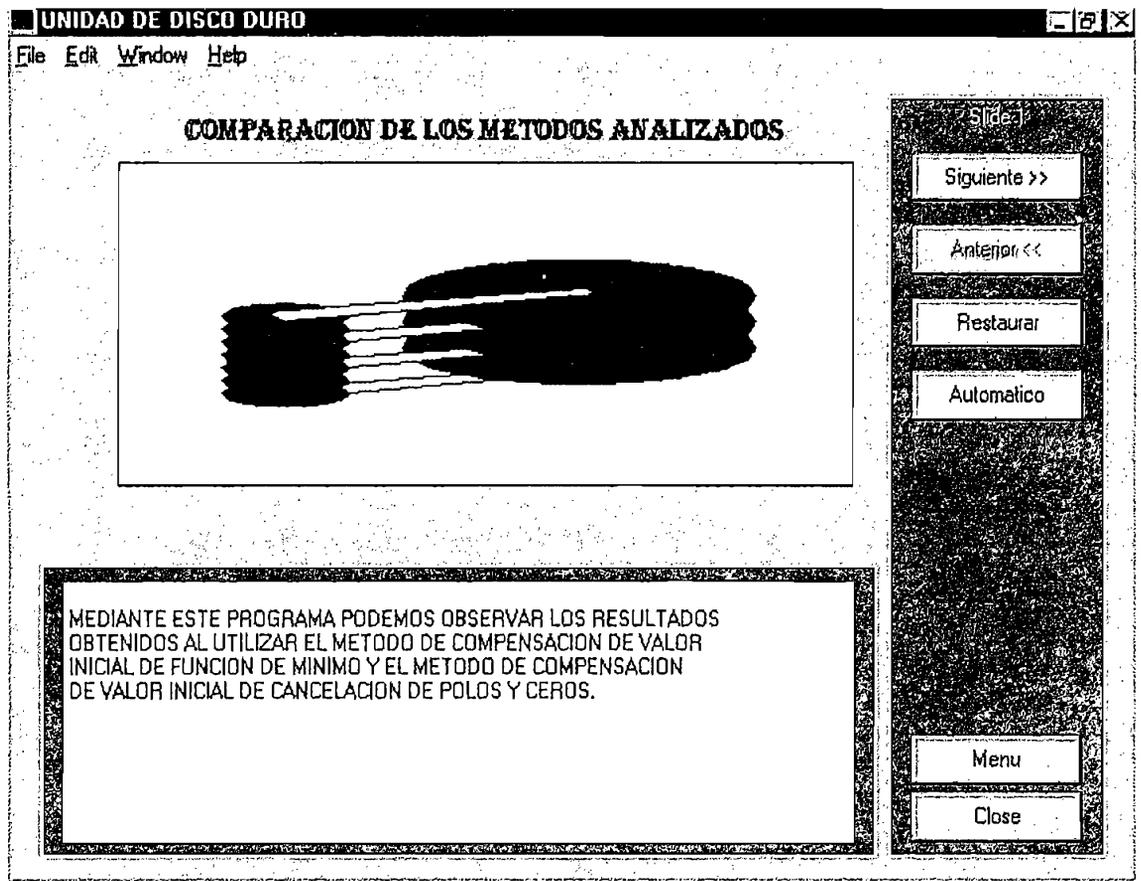


Fig 5.9 Subpantalla para acceder al cambio del *Modo de Búsqueda* al *Modo de Posicionamiento* y del *Modo de Posicionamiento* al *Modo de Seguimiento*

La subpantalla ***Modos de Cambio Compensados con Cancelación de P-Z***. Tiene el mismo contenido que la subpantalla anterior con la diferencia que el tipo de compensación para valor inicial que se realiza es el método de *Cancelación de Polos y Ceros*

Subpantalla que permite la ***Comparación de los Métodos Analizados***. En la Fig 5.10 se observa esta pantalla que presenta el momento de cambio del *Modo de Posicionamiento* a *Modo de Seguimiento* con compensación de valor inicial para el método de compensación de *Función de Mínimo Costo* y el método de *Cancelación de Polos y Ceros*.



**Fig 5.10** Subpantalla para acceder a la comparación de los métodos de compensación de valor inicial

Las principales rutinas implementadas para el desarrollo de este programa se presentan en el folleto de anexos de la tesis.

En el siguiente capítulo se presentan los resultados obtenidos del sistema al emplear los diferentes métodos de compensación de valor inicial y la comparación de resultados con y sin el empleo de métodos de compensación.

## **Capítulo 6: ANALISIS DE RESULTADOS**

### **6.1 Comparación de los Métodos de Compensación**

6.1.1 Simulación del Sistema sin emplear métodos de Compensación de Valor Inicial

6.1.2 Simulación del Sistema con Compensación de Valor Inicial

6.1.2.a Método de Compensación de Valor Inicial  
Función de Mínimo Costo

6.1.2.b Método de Cancelación de Polos y Ceros

## 6. ANALISIS DE RESULTADOS

### 6.1 COMPARACION DE LOS METODOS DE COMPENSACION

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos de la simulación del sistema unidad de disco duro, con condiciones iniciales no nulas, luego se observa los resultados obtenidos al simular el sistema realizando una compensación de valor inicial empleando el método de *Función de Mínimo Costo* y el método de *Cancelación de Polos y Ceros*.

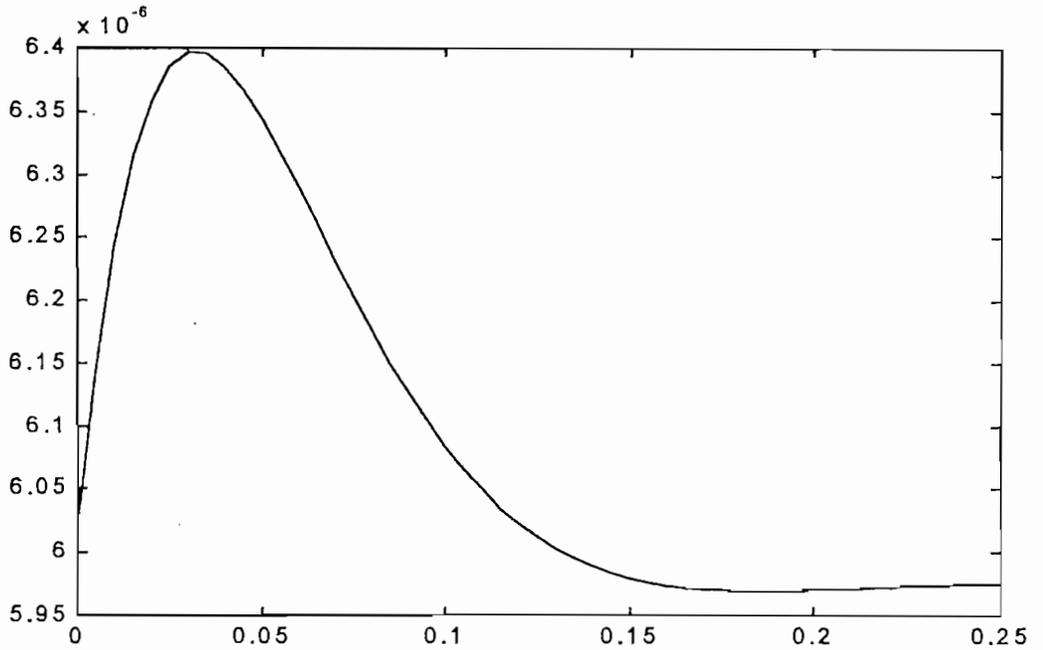
#### 6.1.1 SIMULACION DEL SISTEMA SIN EMPLEAR METODOS DE COMPENSACION DE VALOR INICIAL

Se realiza el análisis del sistema con condición inicial no nula, las condiciones iniciales de la planta son presentadas por un vector de tres estados:

$$X_p(0) = \begin{bmatrix} X_{p1}(0) \\ X_{p2}(0) \\ X_{p3}(0) \end{bmatrix} \quad (6.1)$$

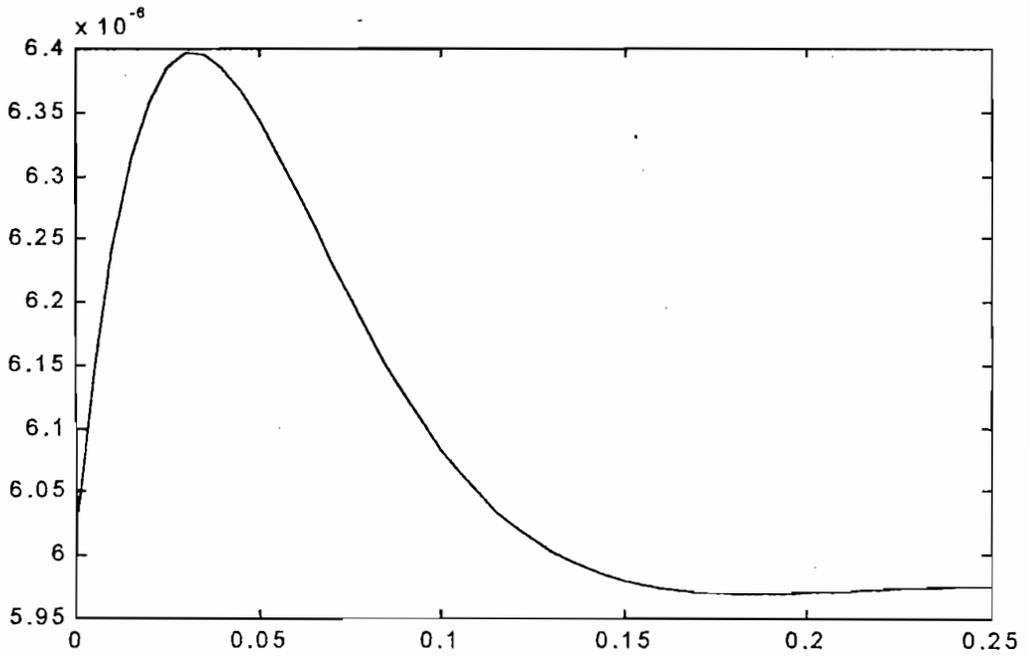
donde cada elemento del vector tiene relación con una variable del sistema, así  $X_{p1}(0)$  es la posición,  $X_{p2}(0)$  es la velocidad y  $X_{p3}(0)$  es la aceleración. El valor de las condiciones iniciales de la planta es el valor de la condición de cambio definida en el capítulo IV sección 4.5

En la Fig 6.1 se presenta la respuesta del sistema para el cambio del *Modo de Búsqueda* al *Modo de Seguimiento*, la condición de cambio es 6 um antes del centro de la pista destino.

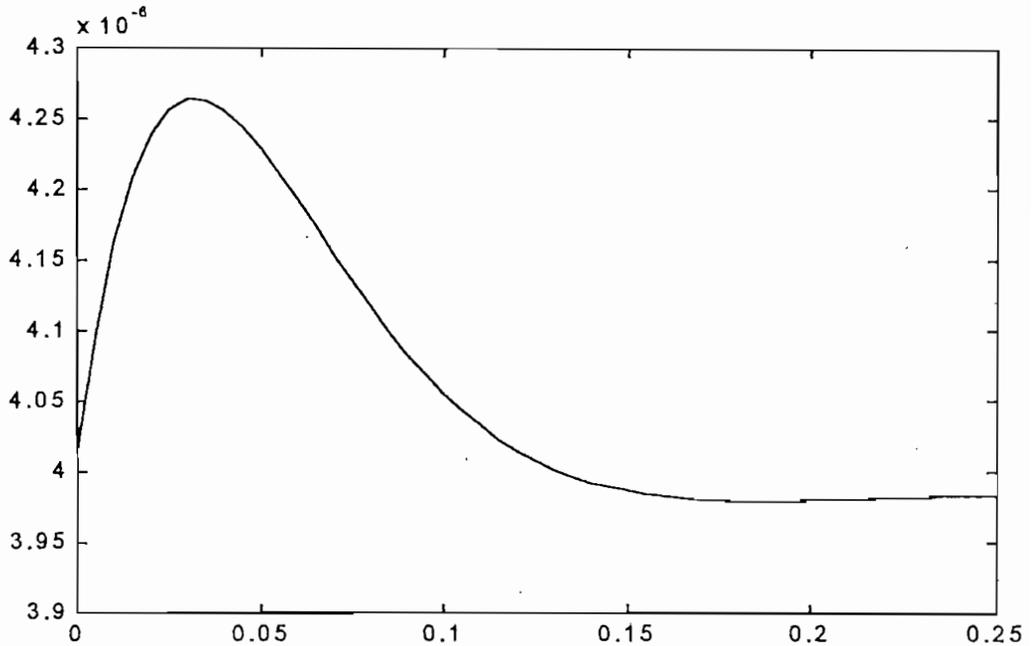


**Fig 6.1** Respuesta del sistema para el instante de cambio del Modo de Búsqueda a Modo de Seguimiento sin emplear métodos de compensación de valor inicial

La Fig 6.2 presenta el instante de cambio del *Modo de Búsqueda* al *Modo de Posicionamiento*, su condición de cambio 6  $\mu\text{m}$  antes del centro de la pista destino y en la Fig 6.3 se observa el instante de cambio del *Modo de Posicionamiento* al *Modo de Seguimiento* con condición de cambio de 4  $\mu\text{m}$ .



**Fig 6.2** Respuesta del sistema para el instante de cambio del Modo de Búsqueda a Modo de Posicionamiento sin emplear métodos de compensación de valor inicial



**Fig 6.3** Respuesta del sistema para el instante de cambio del Modo de Posicionamiento a Modo de Seguimiento sin emplear métodos de compensación de valor inicial

Como se puede observar al colocar el *Modo de Posicionamiento* entre el *Modo de Búsqueda* y *Modo de Seguimiento* disminuye el transitorio.

### **6.1.2 SIMULACION DEL SISTEMA CON COMPENSACION DE VALOR INICIAL**

Como se puede observar en las Fig 6.2, 6.3 y 6.4, se presentan transitorios debido al cambio de un modo de control a otro. Para mejorar la respuesta se emplean los métodos de compensación de valor inicial.

### 6.1.2.a MÉTODO DE COMPENSACION DE VALOR INICIAL

#### FUNCION DE MINIMO COSTO

Por medio del método de compensación de *Función de Mínimo Costo* se determinan las condiciones iniciales del control a partir de las condiciones iniciales de la planta.

$$X_c(0) = -p_{22}^{-1} \cdot p_{12} \cdot X_p(0) \quad (6.2)$$

$p_{22}$  y  $p_{12}$  son datos obtenidos de la matriz  $P$ ,  $P = \begin{bmatrix} p_{11} & p_{12} \\ p_{22} & p_{22} \end{bmatrix}$  que se obtiene de la ecuación de Lyapunov  $A^T \cdot P \cdot A - P = -Q$ , donde  $Q$  es una matriz diagonal positiva definida. Con los datos de condiciones iniciales del control y la planta se calcula  $J$

$$J = X(0)^T \cdot P \cdot X(0) \quad (6.3)$$

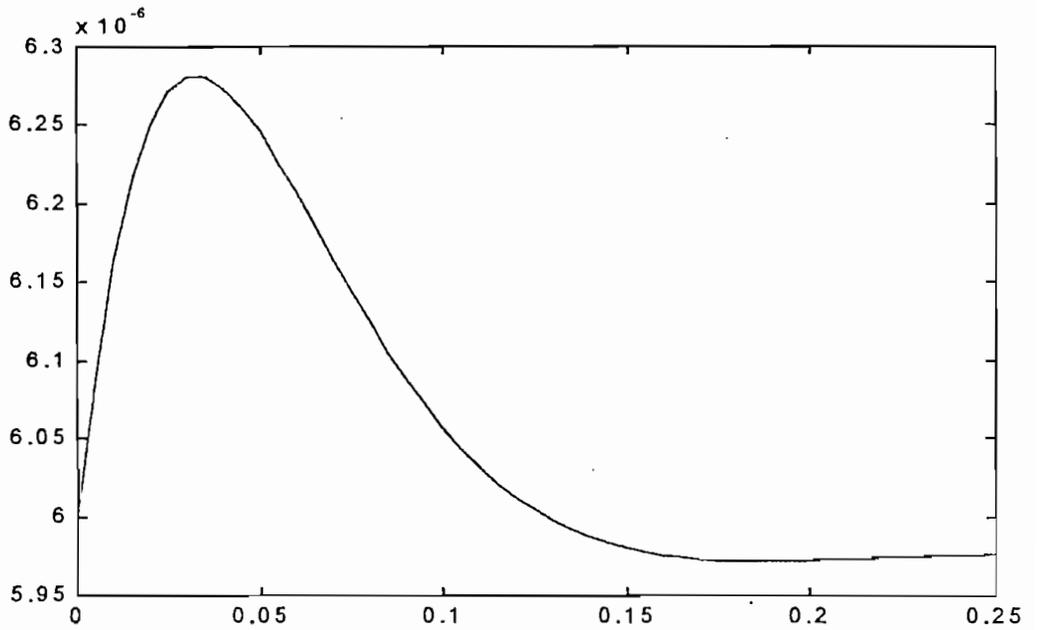
Si  $J$  puede ser minimizado se logra optimizar la característica transitoria después del cambio.

Para el instante de cambio del *Modo de Búsqueda a Modo de Seguimiento*

$$X_p(0) = [6 \cdot 10^{-6} \quad 0 \quad 0]^T, \text{ entonces}$$

$$X_c(0) = [0.015 \cdot 10^{-4} \quad 0.0337 \cdot 10^{-4} \quad 0 \quad 0]^T.$$

El resultado de la simulación se puede observar en la Fig 6.4.

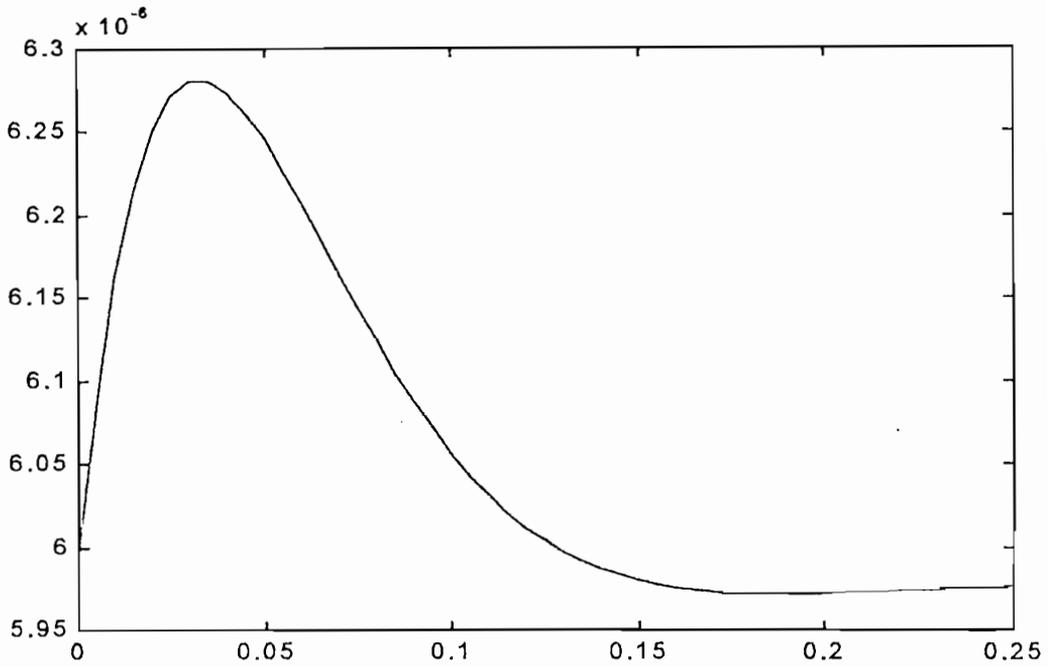


**Fig 6.4** Respuesta del sistema para el instante de cambio del Modo de Búsqueda a Modo de Seguimiento con método de compensación función de mínimo costo

Para el instante de cambio de *Modo de Búsqueda* a *Modo de Posicionamiento* se tienen

$$X_p(0) = [6 * 10^{-6} \quad 0 \quad 0]^T, \quad X_c(0) = [0.015 * 10^{-4} \quad 0.0337 * 10^{-4} \quad 0 \quad 0]^T.$$

La Fig 6.5 presenta el resultado de este sistema.

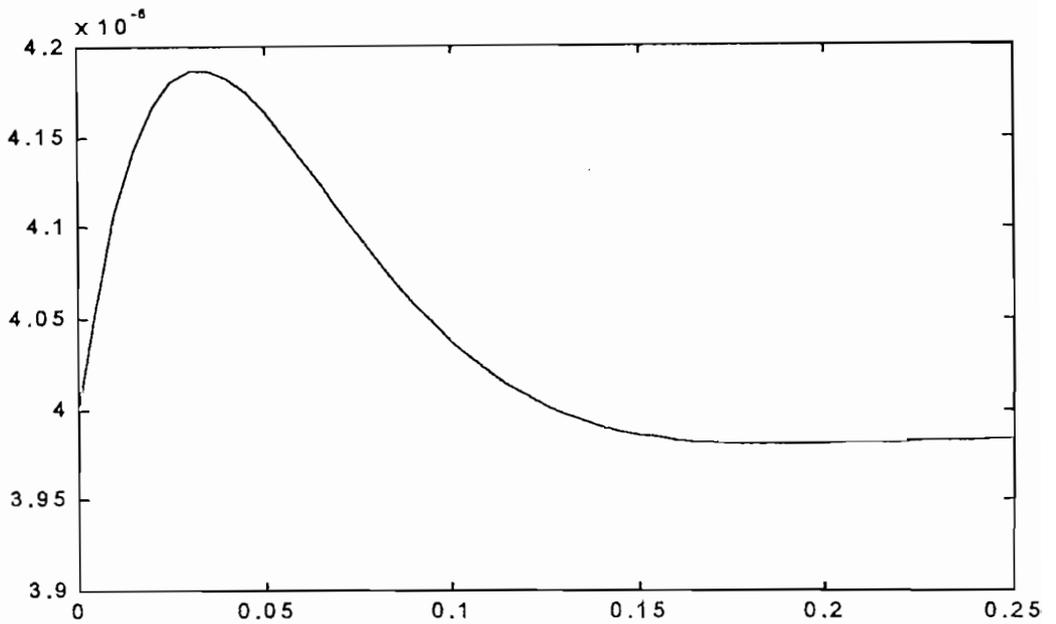


**Fig 6.5** Respuesta del sistema para el instante de cambio del Modo de Búsqueda a Modo de Posicionamiento con método de compensación función de mínimo costo

Para el instante de cambio del *Modo de Posicionamiento a Modo de Seguimiento* se tiene

$$X_p(0) = [4 \cdot 10^{-6} \quad 0 \quad 0]^T, \quad X_c(0) = [0.01 \cdot 10^{-4} \quad 0.0225 \cdot 10^{-4} \quad 0 \quad 0]^T.$$

Esta simulación se observar en la Fig 6.6.



**Fig 6.6** Respuesta del sistema para el instante de cambio del Modo de Posicionamiento a Modo de Seguimiento con método de compensación función de mínimo costo

Como se puede observar se produjo una disminución del transitorio al emplear este método de compensación de valor inicial, además utilizando el *Modo de Posicionamiento* en medio del *Modo de Búsqueda* y el *Modo de Seguimiento* mejora a un más la respuesta del sistema.

### **6.1.2.b MÉTODO DE CANCELACION DE POLOS Y CEROS**

Para este método se determinan los polos de lazo cerrado del sistema compensado, así para el instante de cambio de *Modo de Búsqueda* a *Modo de Seguimiento* de pista, los polos de lazo cerrado son:

$$\begin{aligned}
 z &= 0.9888 \pm 0.1437 * i \\
 &0.9603 \\
 &0.8766 \pm 0.0896 * i \\
 &0.5 \\
 &-0.0006
 \end{aligned}$$

Se toma el valor de los polos próximo a la unidad ya que causan una respuesta transitoria lenta, para este caso  $z_1 = 0.9603$ , el método de *Cancelación de Polos y Ceros* asigna ceros para cancelar estos polos, para lo cual se realiza una selección apropiada de los valores de la matriz  $K$  analizada en el capítulo IV sección 4.6.2.

Para este caso se tiene  $X_p(0) = [6 * 10^{-6} \quad 0 \quad 0]^T$ , la función de transferencia entre

$X_p(0)$  y  $y(z)$  es:

$$\begin{aligned}
 y(z) &= D(z)^{-1} \cdot z \\
 &* [(k_{11} \cdot N_1 + k_{12} \cdot N_2 + \dots + k_{n1} \cdot N_n + N_{n+1}) \cdot x_{p1}(0) \\
 &+ (k_{12} \cdot N_1 + k_{22} \cdot N_2 + \dots + k_{n2} \cdot N_n + N_{n+2}) \cdot x_{p2}(0) \\
 &+ (k_{1m} \cdot N_1 + k_{2m} \cdot N_2 + \dots + k_{nm} \cdot N_n + N_{n+3}) \cdot x_{p3}(0)]
 \end{aligned} \tag{6.4}$$

Para encontrar los elementos  $k_{i,j}$ , reemplazamos  $z$  por  $\lambda_k$  ( $\lambda_k$  son los polos de lazo cerrado que se desea eliminar) en (6.4), tres polos están próximo a la unidad los  $k_{i,j}$  para  $X_{p1}(0)$  se pueden obtener a partir de:

$$\begin{bmatrix} N_1(\lambda_1) & N_2(\lambda_1) & N_3(\lambda_1) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} k_{11} \\ k_{21} \\ k_{31} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -N_{p1}(\lambda_1) \\ -N_{p1}(\lambda_2) \\ -N_{p1}(\lambda_3) \end{bmatrix} \tag{6.5}$$

donde:

$$N_{c_1} = 0.0212 z^6 - 0.0847 z^5 - 0.003 z^4 + 0.0051 z^3 - 0.0129 z^2 + 0.0105 z - 0.0026 \quad (6.6)$$

$$N_{c_2} = -0.0128 z^6 + 0.0375 z^5 + 0.0019 z^4 - 0.0058 z^3 + 0.0148 z^2 - 0.0119 z + 0.0030 \quad (6.7)$$

$$N_{c_3} = 0.0023 z^6 - 0.0059 z^5 - 0.0006 z^4 + 0.0015 z^3 - 0.0039 z^2 + 0.0031 z - 0.0008 \quad (6.8)$$

$$N_{p_1} = -0.0037 z^6 + 0.0077 z^5 + 0.0002 z^4 \quad (6.7)$$

evaluando  $N_{c_1}$  en  $\lambda_1$  se tiene :

$$N_{c_1}(\lambda_1) = -0.055$$

$$N_{c_2}(\lambda_1) = 0.0222$$

$$N_{c_3}(\lambda_1) = -0.0035$$

y  $N_{p_1}$  en  $\lambda_1$

$$N_{p_1}(\lambda_1) = 0.0094$$

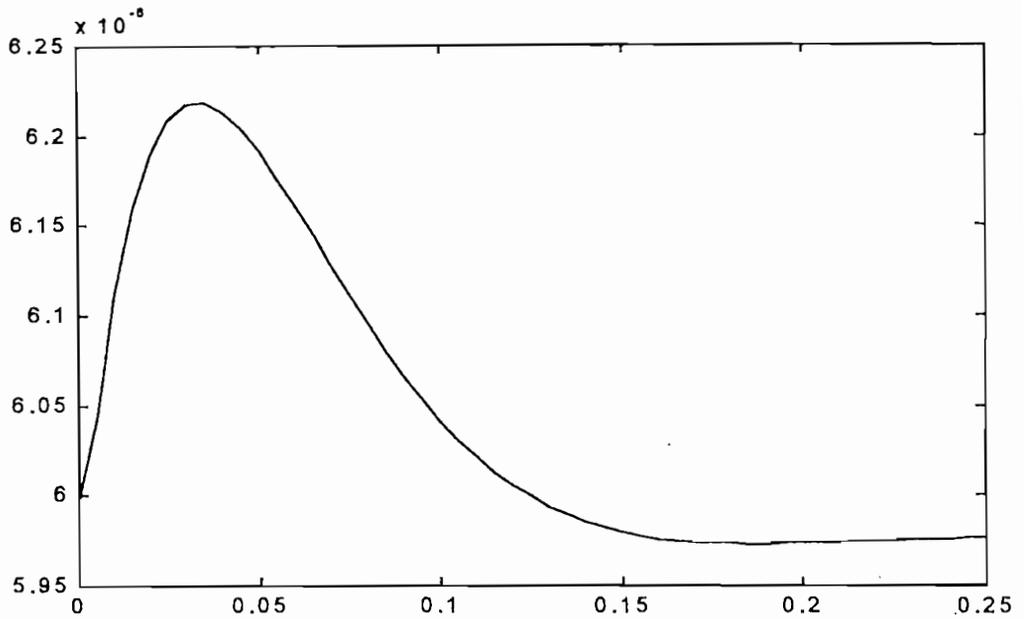
$$N_{p_1}(\lambda_2) = 0.0083 + 0.0080 * i$$

$$N_{p_1}(\lambda_3) = 0.0094 - 0.0080 * i$$

entonces  $k_{11} = 0.2126$ ,  $k_{21} = -1.5858$  y  $k_{31} = -10.6803$ . Los ceros de la función de transferencia entre  $X_{p_1}(0)$  y  $y(z)$  son:

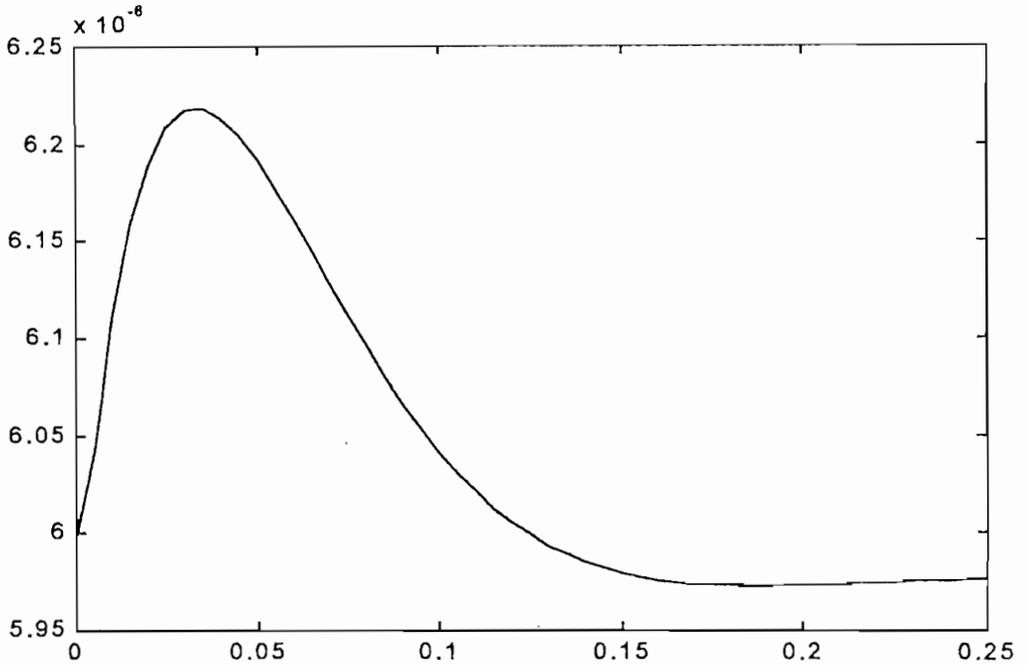
$$z = \begin{array}{l} 0.9603 \\ 0.5439 \\ -0.7588 \pm 1 * i \\ 0.9888 \pm 0.1437 * i \end{array}$$

Como se puede observar los ceros incluyen el polo que se desea eliminar. La simulación del sistema se presenta en la Fig 6.7.



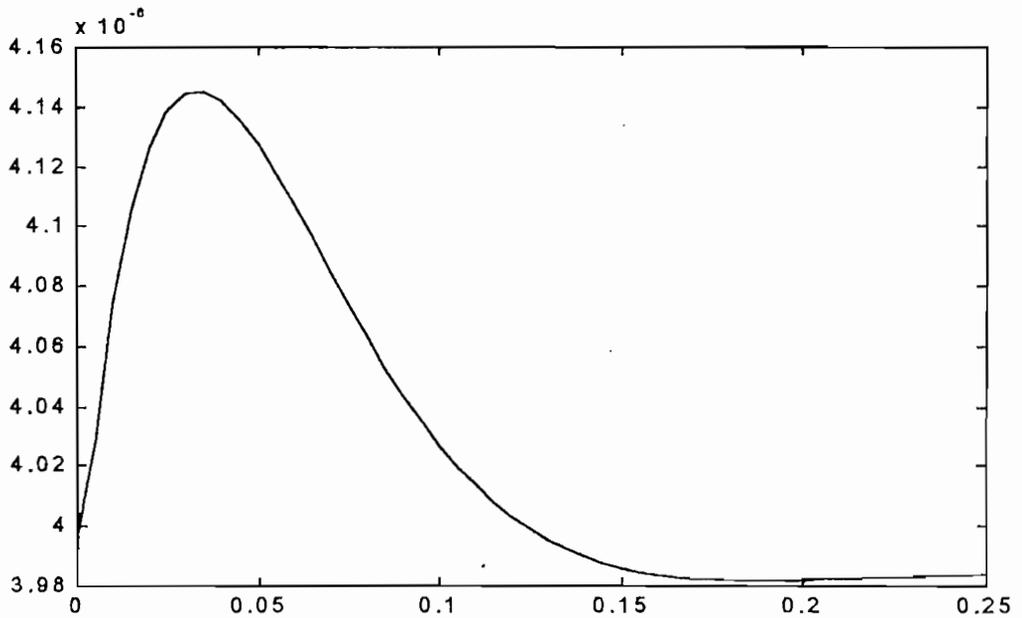
**Fig 6.7** Respuesta del sistema para el instante de cambio del Modo de Búsqueda a Modo de Seguimiento con método de compensación cancelación de polos y ceros

Para el instante de cambio de *Modo de Búsqueda* a *Modo de Posicionamiento*  $X_p(0) = [6 \cdot 10^{-6} \ 0 \ 0]^T$ , el proceso es similar al anterior y la simulación del sistema se presenta en la Fig 6.8.



**Fig 6.8** Respuesta del sistema para el instante de cambio del *Modo de Búsqueda* a *Modo de Posicionamiento* con método de compensación cancelación de polos y ceros

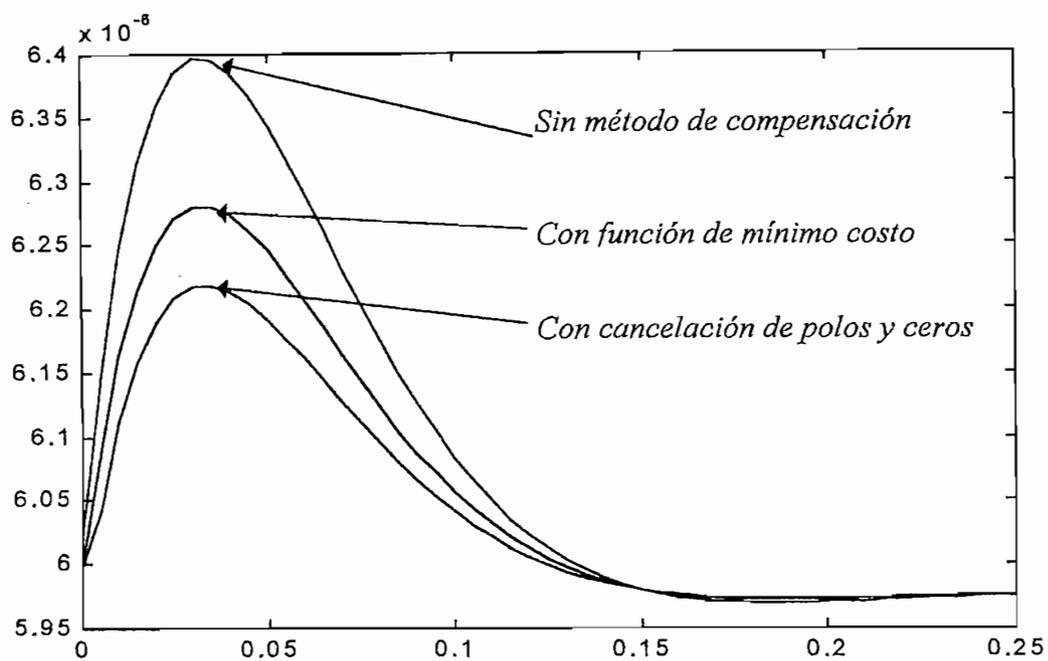
La simulación del instante de cambio del *Modo de Posicionamiento* a *Modo de Seguimiento* con  $X_p(0) = [4 \cdot 10^{-6} \ 0 \ 0]^T$ , se muestran en la Fig 6.9.



**Fig 6.9** Respuesta del sistema para el instante de cambio del Modo de Posicionamiento a Modo de Seguimiento con método de compensación cancelación de polos y ceros

Como se pudo observar al emplear el método de *Cancelación de Polos y Ceros* mejora aun más la respuesta del sistema y con el empleo del *Modo de Posicionamiento* entre el *Modo de Búsqueda* a *Modo de Seguimiento* el transitorio disminuye aun más.

La Fig 6.10 nos permite observar claramente el instante de cambio *del Modo de Búsqueda* al *Modo de Seguimiento* sin emplear ningún método de compensación y empleando los métodos de compensación de valor inicial, mientras que la Fig 6.11 presenta el instante de cambio *del Modo de Posicionamiento* al *Modo de Seguimiento* sin emplear ningún método de compensación y empleando los métodos de compensación de valor inicial.



**Fig 6.10** Respuesta del sistema para el instante de cambio del Modo de Búsqueda a Modo de Seguimiento sin método de compensación y con método de compensación

**Tabla 6.1:** Comparación de respuestas del sistema para los métodos de compensación analizados

<b>Cambio de Modo de Búsqueda a Modo de Seguimiento</b>	Mp (um)	ts (seg)
Sin método de compensación	6.4	0.25
Con método de función de mínimo costo	6.28	0.24
Con método de cancelación de polos y ceros	6.22	0.23
<b>Cambio de Modo de Posicionamiento a Modo de Seguimiento</b>	Mp (um)	ts (seg)
Sin método de compensación	4.27	0.25
Con método de función de mínimo costo	4.18	0.24
Con método de cancelación de polos y ceros	4.14	0.23

Como se puede observar de la tabla, al emplear los métodos de compensación de valor inicial se logra mejorar la respuesta disminuyendo el transitorio respecto al sistema sin emplear ningún método de compensación. Al colocar el *Modo de Posicionamiento* entre el *Modo de Búsqueda* y el *Modo de Seguimiento* disminuye más el sobreimpulso.

## **Capitulo 7: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

7.1 Conclusiones y Recomendaciones

7.2 Trabajo Futuro

## 7.1 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Hoy en día se requiere una mayor precisión y rapidez para el proceso de lectura y escritura en un drive de disco duro. Para mejorar esto se presenta el análisis de los métodos de compensación de valor inicial para sistemas digitales de control de estructura variable. Esto nos permiten mejorar la respuesta en el instante de cambio de un modo de control a otro reduciendo el sobreimpulso y los transitorios.

El Modo de Control de Cambio para la posición de las cabezas del servo de la unidad de disco duro, nos permite realizar un seguimiento preciso del centro de pista y una rápida búsqueda de pista. Este método de diseño consta de varios modos de control de servo, así para una búsqueda rápida de la pista destino se emplea un control no lineal y para el seguimiento preciso del centro de la pista destino se presenta un control lineal.

Los métodos de compensación de valor inicial nos permiten mejorar el sobreimpulso y las características transitorias para el instante de cambio de un modo de control a otro. En estos métodos de control de valor inicial, se reemplaza los datos del control en el instante de cambio de un modo a otro para minimizar la función de mínimo costo o cancelar los polos indeseables de la función de transferencia entre las variables de estado y la posición de la cabeza de L/E.

El empleo de uno u otro método de compensación de valor inicial depende de las características del servo de la unidad de disco duro que se utilice.

Se recomienda para trabajos futuros emplear la versión profesional de MATLAB 5, debido a que la versión estudiantil presenta varias limitaciones de capacidad, impidiendo una mejor obtención de resultados.

## **7.2 TRABAJO FUTURO**

La importancia de un rápido acceso para la lectura/escritura de información en una unidad de disco duro es un tema de importancia actual, por este motivo en países como Japón, se realizan estudios de laboratorio para mejorar el acceso a una pista destino, se recomienda entonces seguir investigando sobre este fascinante mundo para que en un futuro no muy lejano se logre proporcionar un mejor control del sistema del servo de las cabezas de lectura/escritura ayudando de esta forma a un mejor desarrollo tecnológico en la implantación de drivers para discos duros.

Se puede realizar el mismo desarrollo para otros modelos de unidades de disco duro para lo cual se debería rediseñar la planta y el control digital empleado, utilizando los mismos métodos de compensación de valor inicial para comprobar la eficacia de estos.

Sería interesante desarrollar un prototipo de una unidad de disco duro para implementar estas técnicas de control, para lo cual se debe diseñar la tarjeta de control de este sistema.

Se puede insertar en las pantallas del programa implementado gráficas existentes en varios tipos de documentos, para lo cual se debe diseñar archivos extensión mat, que requiere de otro trabajo de investigación y diseño.

## BIBLIOGRAFIA

- [1] Hard disk read/write head operation  
<http://www.pcguide.com/ref/hdd/op/heads/op-c.html>.
- [2] G. F. Franklin, J. D. Powell, and M. L. Workman, "*Digital Control of Dynamic Systems*," 2<sup>da</sup> Ed. Reading, MA: Addison Wesley, 1990.
- [3] T. Yamaguchi, K. Shishida, Y. Soyama, H. Hosokawa, H. Ohsawa, H. Numasato, T. Arai, K. Tsuneta, and H. Hirai, "A Mode switching controller with initial value compensation for hard disk drive servo control," *IEEE Cont Eng Practice.*, vol.5, no.11, pp 1523-1532, Aug 1997.
- [4] E. Slotine, "*Applied non linear control*," México: Prentice Hall 1991
- [5] B. C. Kuo, "*Sistemas de control automático*," México: Prentice Hall 1996
- [6] T. Yamaguchi, K. Shishida, S. Tohyama, and Hirai, "Mode switching control design with initial value compensation and its application to head positioning control on magnetic disk drives," *IEEE Trans. Ind Electron*, vol. 43, no. 1, pp 65-73, Feb 1996.
- [7] T. Yamaguchi, Y. Soyama, H. Hosokawa, K. Tsuneta, and H. Hirai, (1996a), "Improvement of settling response of disk drive head positioning servo using mode switching control with initial value compensation," *IEEE Trans. Magn*, vol. 32, no. 2, pp 1767-1772, no. 3, May 1996.
- [8] T. Yamaguchi, K. Shishida, H. Hirai, K. Tsuneta and M. Sato, "Improvement of servo robustness for digital sector servo system," *IEEE Trans. Magn*, vol. M28-5, pp. 2910-2912, Sept 1992.
- [10] Hard disk head actuator and head arms,  
<http://www.pcguide.com/ref/hdd/op/act-c.html>.
- [11] Hard disk operational overview <http://www.pcguide.com/ref/hdd/op/over-c.html>.

[12] Hard disk drives <http://www.pcguides.com/ref/hdd/index-c.html>.

[13] Hard disk read/write head operation  
<http://www.pcguides.com/ref/hdd/op/heads/op-c.html>.

[14] The harddisk <http://sysdoc.pair.com/hdd.html>