

Te  
UVR  
Que  
B. 112  
1990

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA  
Facultad de Ciencias y Humanidades

BIBLIOTECA  
DE LA  
UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA

ESTUDIO DE ESTABILIDAD Y  
RESPUESTA EN TIEMPO Y FRECUENCIA  
DE SISTEMAS DE CONTROL LINEALES

GUILLERMO CAAL RIVEIRO

Trabajo de investigación presentado para optar  
al grado académico de  
Ingeniero en Electrónica  
en el grado de Licenciado

Guatemala

1990

ESTUDIO DE ESTABILIDAD Y  
RESPUESTA EN TIEMPO Y FRECUENCIA  
DE SISTEMAS DE CONTROL LINEALES

Vo. Bo. :

(f) *Ricardo Cordón*  
Ing. Ricardo Cordón Herrarte  
Asesor

Tribunal:

(f) *Ricardo Cordón*  
Ing. Ricardo Cordón Herrarte

(f) *Roberto Lejada*  
Lic. Roberto Lejada

(f) *Kari Campos*  
Ing. Kari Campos de Fremme

Fecha de aprobación: 22 de noviembre de 1990.

A mis padres

## CONTENIDO

	Páginas
PREFACIO	IX
I. INTRODUCCION	1
II. SISTEMAS DE CONTROL	2
A. Revisión histórica	2
B. Principios de proyecto	4
1. Requerimientos generales	4
2. Análisis	4
3. Proyecto	5
4. Síntesis	5
5. Enfoque básico del proyecto	5
C. Compensación del sistema	7
III. DISEÑO	9
A. Parámetros generales	9
B. Criterio de Routh-Hurwitz	10
1. Con coeficientes definidos	10
2. Con variable K	10
C. Lugar de las raíces	11
1. Raíces	11
2. Gráfico	12
D. Respuesta en el tiempo	12
1. Señales de prueba	12
2. Transformada inversa de Laplace	13
3. Características a entrada escalón	15
E. Respuesta en frecuencia	15
1. Factores básicos	16

	2. Gráficas	17
	3. Márgenes de ganancia y fase	18
F.	Grafo de fluencia y ganancia	18
	1. Grafo del sistema	18
	2. Mason	19
IV.	MANUAL DE USUARIO	21
A.	Especificaciones	21
	1. Tipos de sistemas	21
	2. Orden máximo	21
	3. Grafo	22
	4. Rango de polos y ceros	22
	5. Sistema de computación necesario	22
B.	Correr el programa	22
C.	Menú principal del programa	23
D.	Ingreso de la función de transferencia	24
	1. F3-Función	24
	a. Especificaciones de ViewF	25
	b. Especificaciones de InputF	25
	2. F4-Grafo	27
	a. Especificaciones de VerGrafo	28
	b. Especificaciones de InputGrafo y UnaRama	29
	c. Especificaciones de Mason	30
E.	Estudio de estabilidad y respuesta	32
	1. Método de Routh-Hurwitz	32
	2. Lugar de las raíces	33
	a. Especificaciones de método normal	34

b.	Especificaciones de método especial	36
3.	Respuesta en el tiempo	38
a.	Especificaciones de escalón, rampa e impulso	40
4.	Respuesta en frecuencia	41
a.	Especificaciones de las escalas	42
b.	Especificaciones de gráfico	43
c.	Especificaciones de márgenes	43
V.	CONCLUSIONES	45
VI.	BIBLIOGRAFIA	46
	APENDICES	
A.	Figuras de referencia	47
B.	Ejemplo de utilización	55

## PREFACIO

El control automático ha jugado un papel vital en el avance de la ingeniería y de la ciencia. Además de su extrema importancia en vehículos espaciales, en guiado de proyectiles y sistemas de pilotaje de aviones, etc., el control automático se ha convertido en parte importante e integral de los procesos de manufactura e industriales modernos. Por ejemplo, el control automático resulta esencial en operaciones industriales como el control de presión, temperatura, humedad, viscosidad y flujo en las industrias de procesos, maquinado, manejo y armado de piezas mecánicas en las industrias de fabricación, entre muchos otros.

Como los avances en la teoría y práctica del control automático brindan medios de lograr el funcionamiento óptimo de sistemas dinámicos, mejorar la calidad y abaratar los costos de producción, expandir el ritmo de producción, liberar de la complejidad de muchas rutinas, de las tareas manuales repetitivas, etc., se ha realizado este proyecto con el propósito de proporcionar una herramienta útil que simplifique el trabajo de los ingenieros y proyectistas de sistemas de control.

## I. INTRODUCCION

El campo de los Sistemas de Control es poco desarrollado en nuestro país, sin embargo cada día es mayor la importancia de los procesos y de las plantas industriales. Por lo tanto, se va haciendo necesario que diferentes profesionales tengan la opción de entrar en el ramo de los Sistemas de Control. Este es el caso de los Ingenieros electrónicos que, gracias a sus conocimientos, pueden modificar la dinámica de sistemas ya establecidos mediante el uso componentes electrónicos.

El proyecto que se decidió desarrollar es un programa que sirve de herramienta en su trabajo al ingeniero o al proyectista de control. El programa permite la simulación de distintos sistemas y, por lo tanto, la comprobación rápida de hipótesis que realizadas a mano tomarían mucho tiempo y esfuerzo.

La organización del informe se presenta de una manera similar al proceso de diseño y desarrollo de este programa. Se utilizan ciertos conceptos que, por cuestiones de tiempo y espacio, no son incluidos en este condensado. Sin embargo se incluye una bibliografía adecuada para que sean satisfechas las dudas que surjan alrededor de algún concepto utilizado.

## II. SISTEMAS DE CONTROL

### A. Revisión Histórica

El primer trabajo significativo en control automático fue el regulador centrífugo de James Watt para el control de la velocidad de una máquina de vapor en el siglo XVIII. Otros pasos relevantes en las primeras etapas del desarrollo de la teoría de control son debidos a Minorsky, Hazen y Nyquist, entre muchos otros. En 1922, Minorsky trabajó en controles automáticos de dirección en barcos y mostró cómo se podría determinar la estabilidad a partir de las ecuaciones diferenciales que describen el sistema. En 1932, Nyquist desarrolló un procedimiento relativamente simple para determinar la estabilidad de los sistemas de lazo cerrado sobre la base de la respuesta a lazo abierto. En 1934, Hazen, que introdujo el término "servomecanismos" para los sistemas de control de posición, estudió el diseño de servomecanismos repetidores capaces de seguir estrechamente una entrada cambiante.

Durante la década que comenzó en 1940, los métodos de respuesta de frecuencia posibilitaron a los ingenieros el diseño de sistemas de control realimentado lineal que satisfacían las necesidades de comportamiento. Desde el fin de esa década hasta los primeros años de la siguiente, se desarrolló completamente el método del lugar de las raíces.

Los métodos de respuesta de frecuencia y del lugar de las raíces, que son el corazón de la teoría de control clásica, llevan a sistemas que son estables y que satisfacen un conjunto de requerimientos de funcionamiento más o menos arbitrarios. Estos sistemas, en general, no son óptimos en ningún sentido significativo. Desde fines de la década del 50, se desplazó el énfasis en el proyecto de los problemas del diseño de uno de los muchos sistemas que funcionan al proyecto de un sistema óptimo en algún sentido determinado.

Como las plantas modernas con muchas entradas y salidas se van haciendo más y más complejas, la descripción de un sistema moderno de control requiere una gran cantidad de ecuaciones. Desde aproximadamente 1960, se ha desarrollado la teoría de control moderna para afrontar la complejidad creciente de las plantas modernas y las necesidades rigurosas en exactitud, peso y costo en aplicaciones militares, espaciales e industriales.

Dada la fácil disponibilidad de computadoras electrónicas analógicas, digitales e híbridas para uso en cálculos complejos, el uso de las mismas en el proyecto de sistemas de control y en el control de operación de los mismos se está convirtiendo en práctica habitual.

Los desarrollos más recientes en la teoría de control moderna se puede decir que están en la dirección del control óptimo de sistemas, así como en sistemas de control

complejos con adaptación y aprendizaje. Hay en evolución aplicaciones de la teoría de control a campos no ingenieriles como la biología, economía, medicina y sociología y se pueden esperar resultados significativos en el futuro próximo.

## B. Principios de proyecto

### 1. Requerimientos generales

Cualquier sistema de control debe ser estable. Este es un requerimiento primario. Además de la estabilidad absoluta, un sistema de control debe tener una estabilidad relativa razonable; es decir, la velocidad de respuesta debe ser razonablemente rápida y la respuesta debe presentar razonable amortiguamiento. Los errores en un sistema de control deben también reducirse a cero o a un valor tolerablemente pequeño. Cualquier sistema de control útil debe satisfacer estos requerimientos.

El requisito de una estabilidad relativa razonable y el de una exactitud en régimen permanente tienden a ser incompatibles. Al proyectar un sistema de control es, por tanto, necesario llegar a un compromiso eficaz entre ambos requisitos.

### 2. Análisis

Se entiende por análisis de un sistema de control, la investigación, bajo condiciones especificadas, del

funcionamiento del sistema cuyo modelo matemático se conoce.

Como cualquier sistema consta de componentes, el análisis debe comenzar por una descripción matemática de cada componente. Una vez deducido el modelo matemático del sistema completo, el modo en que se realiza el análisis es independiente de si el sistema físicamente es neumático, eléctrico, mecánico, etc.

### 3. Proyecto

Proyectar un sistema significa hallar uno que cumpla la tarea pedida. En general, el procedimiento de diseño o proyecto no es directo, sino que requiere algunos tanteos.

### 4. Síntesis

Por síntesis se entiende encontrar por un procedimiento directo, un sistema que funcione de un modo especificado. Generalmente ese procedimiento es totalmente matemático desde el principio hasta el final del proceso de diseño. Actualmente se dispone de procedimientos de síntesis para redes lineales y sistemas óptimos lineales.

### 5. Enfoque básico del proyecto

El enfoque básico del proyecto de cualquier sistema de control práctico, necesariamente involucra procedimientos de tanteo. Teóricamente es posible la síntesis de sistemas

lineales de control, y el ingeniero de control puede determinar sistemáticamente los componentes necesarios para lograr el objetivo propuesto. En la práctica, sin embargo, el sistema puede quedar sujeto a muchas restricciones o no ser lineal, y para estos casos, hasta ahora, no hay métodos de síntesis. Además, pueden no conocerse con precisión las características de los componentes. Así, siempre se hacen necesarios los procedimientos de tanteo.

En muchos casos, el proyecto de un sistema de control se cumple del siguiente modo: el ingeniero comienza el proceso de proyecto conociendo las especificaciones o el índice de funcionamiento, la dinámica de la planta dada y la dinámica de los componentes; esto último abarca los parámetros de diseño. El ingeniero de control aplica técnicas de control, si las hay, junto con otras técnicas, para establecer un modelo matemático del sistema.

Una vez formulado el problema de diseño en términos de este modelo, realiza un proyecto matemático que brinda la solución a la versión matemática del problema de diseño. En esta etapa es importante la simulación del modelo matemático en una computadora. El programa SIST realizado para el presente trabajo de graduación, ayuda al ingeniero en esta tarea.

Tras completar el diseño matemático, el ingeniero de control simula el modelo en una computadora para verificar el índice de comportamiento del sistema resultante en

respuesta a diversas señales y perturbaciones. Habitualmente, la configuración inicial del sistema no es satisfactoria. Entonces hay que rediseñar el sistema y completar el correspondiente análisis. Este proceso de diseño y análisis es repetido hasta obtener un sistema satisfactorio. Entonces se puede construir un prototipo del sistema físico.

### C. Compensación del sistema

Al construir un sistema de control, se sabe que un modo simple de cumplir las especificaciones de funcionamiento es modificar adecuadamente la dinámica de la planta. Sin embargo, esto puede no ser posible en muchos casos reales, porque la planta puede ser fija y no modificable.

El primer paso para ajustar el sistema a los fines de lograr el funcionamiento satisfactorio, es el ajuste de la ganancia. Sin embargo, en muchos casos reales, el ajuste de la ganancia sola puede no brindar suficiente variación del comportamiento del sistema como para alcanzar las especificaciones dadas. Frecuentemente resulta que aumentar el valor de la ganancia mejora el comportamiento estacionario, pero produce una pobre estabilidad o incluso inestabilidad. En ese caso se hace necesario un nuevo proyecto del sistema (modificando la estructura o incorporando dispositivos o componentes adicionales) para alterar el comportamiento global de modo que el sistema

funcione en la forma deseada.

Un dispositivo adicional insertado en el sistema con ese objeto se denomina compensador. Este dispositivo compensa el funcionamiento deficiente del sistema original.

Muchos compensadores pueden ser de tipo electrónico, por lo que resulta importante para el ingeniero electrónico poseer un conocimiento amplio sobre Sistemas de Control. Este trabajo de graduación permite tanto al ingeniero de control como al ingeniero electrónico comprobar el buen funcionamiento de los distintos compensadores dentro de un sistema ya establecido.

### III. DISEÑO

El proyecto realizado está constituido por varios módulos distintos que se desarrollaron separadamente una vez establecidos los parámetros generales. En esta parte se explican someramente los métodos utilizados en el diseño de cada módulo. Un complemento a esta parte lo constituye la documentación técnica que se incluye en el listado del programa fuente, y mayor información puede ser obtenida consultando la bibliografía al final de este trabajo.

#### A. Parámetros generales

Al inicio del proyecto debió considerarse qué información sería necesaria, para su análisis, en todos los módulos. Se llegó a la conclusión que la información que debería transmitirse era la función de transferencia del sistema. Se consideró, entonces, que la manera más apropiada para almacenar una función de transferencia era en forma de cociente de dos polinomios por tratarse de sistemas de control lineales. Estos polinomios, sin embargo, no necesariamente están constituidos únicamente por coeficientes reales definidos sino que éstos pueden ser de la forma  $a*(K + b)$  donde  $a$  y  $b$  son reales definidos y  $K$  es una variable indefinida. En la práctica,  $K$  puede ser una ganancia variable o un tiempo  $\tau$  variable.

## B. Criterio de Routh-Hurwitz

### 1. Con coeficientes definidos

En el caso que la función de transferencia del sistema no contenga una variable indefinida  $K$ , se decidió empezar por comparar el signo de los coeficiente de la ecuación característica, ó sea del polinomio denominador de la función de transferencia. En el caso que haya cambios en los signos es inmediato el conocimiento de la inestabilidad. En caso contrario se genera la matriz de Routh y se comparan los signos de la primera columna, conociéndose así la condición de estabilidad. Es posible que alguno de los coeficientes de la ecuación característica sea cero, en tal caso se coloca un valor arbitrariamente pequeño para poder efectuar el cálculo de la matriz de Routh.

### 2. Con variable $K$

En este caso los coeficientes no están definidos y, por lo tanto, el método de Routh-Hurwitz sirve para determinar para qué valores de  $K$  el sistema es estable. Se hace entonces aumentar  $K$  desde cero hasta cien, en intervalos de 0.5, y se van obteniendo así muchos casos con coeficientes definidos, utilizándose entonces el mismo método. Esto permite determinar los valores y por ende los intervalos de  $K$  para los cuales el sistema es estable con una precisión de  $\pm 0.5$ .

## C. Lugar de las raíces

### 1. Raíces

Para poder graficar el lugar de las raíces de la función de transferencia del sistema es necesario poder encontrar las raíces de la ecuación característica cuando sus coeficientes están definidos. Para ello se diseñó un módulo que encuentra las raíces reales y complejas de un polinomio. Este módulo busca, primeramente, todas las raíces reales mediante el método de bisección. Al encontrar una raíz en forma aproximada se utiliza el método de Newton-Raphson para alcanzar la tolerancia deseada en forma rápida. Cuando ya se determinó la raíz hasta la tolerancia deseada, se utiliza el algoritmo de Horner para dividir el polinomio por la solución obtenida. Luego se reinicia la búsqueda con el polinomio que resulta de la división, hasta obtenerse todas las raíces reales.

Después de encontrarse las raíces reales se procede a buscar las raíces complejas. Esto se realiza mediante el método de Muller. Este método encuentra dos raíces complejas conjugadas. Luego se utiliza nuevamente el algoritmo de Horner aplicado a complejos y se reinicia la búsqueda de raíces complejas en el polinomio que resulta de la división.

En todos los casos si el polinomio que resulta de la división o si la ecuación característica es de grado 2, se utiliza la fórmula directa para resolverlo.

Todas las raíces del polinomio quedan entonces almacenadas en un vector de números complejos.

## 2. Gráfico

El gráfico del lugar de las raíces se encuentra mediante la obtención de muchas raíces al ir variando la variable indefinida  $K$ . Se colocan valores definidos para  $K$  desde cero hasta un valor deseado y se obtienen las raíces de la ecuación característica que resulta de esos valores de  $K$ . Todas esas raíces colocadas en un plano complejo constituyen el lugar de las raíces de la función de transferencia del sistema.

## D. Respuesta en el tiempo

La respuesta en el tiempo se obtiene mediante la modificación de la función de transferencia, dependiendo de la señal de entrada de prueba. Luego se realizan fracciones parciales y, finalmente, por medio de obtener la transformada inversa de Laplace para condiciones iniciales nulas, se obtiene la función de respuesta en el tiempo.

### 1. Señales de prueba

Se decidió que debería probarse la respuesta en el tiempo del sistema utilizando señales de prueba útiles que simulen muchas situaciones reales. Se implementó, por lo tanto, el proyecto con las señales de entrada de prueba

siguientes: escalón unitario, rampa e impulso.

En el caso de la respuesta a una señal escalón, la función de transferencia debe modificarse multiplicando por  $s$  el polinomio denominador, lo cual se logra mediante pasar al grado inmediato superior todos los coeficientes.

En el caso de la respuesta a una señal rampa, la función de transferencia debe modificarse multiplicando por  $s^2$  el polinomio denominador.

En el caso de la respuesta a una señal impulso, la función de transferencia no se modifica.

## 2. Transformada inversa de Laplace

Una vez modificada la función de transferencia del sistema, dependiendo de la señal ingresada, es necesario obtener todos los polos de la función. Esto se realiza utilizando el módulo que encuentra las raíces de un polinomio descrito anteriormente. Después de encontrados los polos se separan los polos complejos, los reales y los polos repetidos. Esto se realiza para proceder a desarrollar en fracciones parciales la función de transferencia.

En el caso de polos reales no repetidos, las constantes desconocidas  $a_k$  se determinan mediante multiplicar la función de transferencia por  $(s + p_k)$  y evaluándola luego en  $s = -p_k$  ( $-p_k$  es un polo no repetido). Esto requiere nuevamente la utilización del algoritmo de Horner y también

de procedimientos que permitan la evaluación en el valor deseado. Se realiza lo mismo para todos los polos reales no repetidos, obteniéndose así términos de la forma  $a_1 / (s + p_1)$ . Las constantes  $a_1$  y los valores de  $p_1$  permiten inmediatamente encontrar la transformada inversa de Laplace para todos los términos cuyos polos son reales no repetidos. Estos términos son de la forma  $a_i \exp(-p_k * t)$ .

En el caso de polos complejos conjugados se procede en forma similar a la descrita para polos reales no repetidos, pero utilizándose el algoritmo de Horner para complejos y procedimientos para evaluación de polinomios con un complejo. Así se determinan las constantes necesarias para poder realizar la transformada inversa de Laplace. Estas constantes especifican un decrecimiento exponencial y un período de tiempo oscilatorio en la respuesta en el tiempo.

Finalmente también se considera el caso de polos repetidos. En este caso la evaluación de las constantes es mucho más complicada por necesitarse otros procedimientos, además de los módulos ya descritos en los casos anteriores. En este caso, también se requiere de procedimientos que puedan realizar la derivación de la función de transferencia un número de veces igual al número de repeticiones del polo.

Al concluirse la determinación de todas las constantes, solamente se hace necesario variar  $t$  (tiempo) en un rango de valores apropiados para obtener la respuesta en el tiempo para condiciones iniciales nulas. Se obtiene la respuesta

en el tiempo de cada uno de los términos encontrados (términos para cada uno de los polos no repetidos, términos para cada pareja de polos complejos conjugados, términos para los polos repetidos) y, finalmente, se realiza la suma para obtener la respuesta completa.

### 3. Características a entrada escalón

Se decidió proporcionar al usuario tres características importantes cuando se trabaja en sistemas de segundo orden subamortiguado. Estas características son el tiempo para máximo sobreimpulso, el máximo sobreimpulso y el tiempo de estabilización (variaciones menores a 5% de la respuesta final).

El tiempo de estabilización se determina utilizando las constantes obtenidas para las fracciones parciales y la transformada inversa de Laplace.

El máximo sobreimpulso se determina en forma aproximada cuando se calculan los valores de la respuesta para distintos valores de  $t$  (tiempo). Al variarse  $t$  se obtienen distintos valores de salida: el valor máximo obtenido es el valor del máximo sobreimpulso. Al encontrarse el valor máximo de salida se observa el tiempo  $t$  que le corresponde: este tiempo es el tiempo para máximo sobreimpulso.

### E. Respuesta en frecuencia

Para estudiar la respuesta en frecuencia de un sistema se

decidió utilizar el diagrama logarítmico o diagrama de Bode. Este tipo de representación es útil porque presenta las características de alta y baja frecuencia de la función de transferencia. Además puede resultar muy útil para determinar la función de transferencia de un sistema si ésta es desconocida.

### 1. Factores básicos

A este módulo ingresa la función de transferencia del sistema que puede estar afectada por una variable indefinida  $K$ . Para realizar los gráficos de Bode, esta indefinición debe desaparecer por lo que se debe colocar un valor real definido para  $K$ . Luego se obtienen las raíces de los polinomios nominador y denominador de la función de transferencia, utilizando los módulos descritos anteriormente.

Alcanzado este nivel, deben separarse los factores básicos: ganancia  $K$ , factores integrales y derivativos  $(j\omega)^{\pm 1}$ , factores de primer orden  $(1 + j\omega T)^{\pm 1}$  y factores cuadráticos  $[1 + 2\sigma(j\omega/w_n) + (j\omega/w_n)^2]^{\pm 1}$ . Estos factores y sus respectivas constantes se obtienen de las raíces de los polinomios. Cada uno de estos factores depende de  $w$  y se comporta en una forma definida en lo que se refiere al cálculo de la ganancia en dB y del ángulo de fase.

## 2. Gráficos

Una vez definidos todos los factores básicos, puede entonces calcularse la ganancia en dB y el ángulo de fase para cada uno de ellos.

La ganancia para un valor de  $w$  dado se obtiene mediante la toma del logaritmo decimal del módulo de cada uno de los factores y multiplicarlo por 20. Existe una forma definida para calcular esta ganancia para cada uno de los distintos factores.

El ángulo de fase para un valor de  $w$  dado se calcula en forma particular para cada distinto tipo de factor. El ángulo de fase depende del valor de  $w$  en los casos de factores de primer orden y factores cuadráticos. En los otros dos casos el valor del ángulo de fase es constante.

La ganancia y el ángulo de fase totales para un valor de  $w$  dado se obtienen finalmente, mediante la suma algebraica de los valores de ganancia y ángulo de fase obtenidos en cada uno de los factores separados.

Los gráficos de ganancia vrs. frecuencia angular y de ángulo de fase vrs. frecuencia angular se obtienen mediante la toma de los distintos valores de  $w$ . La frecuencia angular  $w$  se hace variar desde un valor determinado (por ejemplo 0.1 rad/s), haciéndose crecer en forma logarítmica y discreta, y calculándose entonces la ganancia y el ángulo de fase para cada uno de los valores de  $w$ .

### 3. Márgenes de ganancia y fase

Los márgenes de ganancia y fase pueden ser determinados en forma aproximada al mismo tiempo que se van calculando los valores de ganancia y de ángulo de fase al ir variando  $w$ . Cuando el valor de la ganancia alcanza 0 dB se retiene como valor de margen de fase el ángulo de fase para ese valor de  $w$ . Cuando el valor del ángulo de fase alcanza  $-180$  grados se retiene como valor de margen de ganancia la ganancia para ese valor de  $w$ .

### F. Grafo de fluencia y ganancia

#### 1. Grafo del sistema

Los sistemas de control lineales de una entrada y una salida pueden ser representados mediante un grafo de fluencia. En este grafo cada una de las ramas cuenta con una función de transferencia definida, la cual posee un polinomio numerador y un polinomio denominador con coeficientes definidos. Además, una o varias de las ramas pueden estar afectadas por ganancias indefinidas  $K_i$ .

En este proyecto se decidió que era necesario poder ingresar el sistema de control a estudiarse mediante el grafo del sistema y no solamente mediante el ingreso de la función de transferencia en forma directa. Esto facilita el análisis de sistemas que constan de varios bloques y cuya función de transferencia es determinada a mano por medio de cálculos y procedimientos complicados y, sobretodo, lentos.

Así, el programa diseñado permite ingresar el grafo del sistema y la función de transferencia de cada una de las ramas. Se consideró que era necesario, para fines de cálculo en la computadora, que solamente una rama estuviera afectada por una ganancia indefinida  $K$ . Una vez ingresado completamente el grafo del sistema, la función de transferencia del sistema completo se determina mediante la fórmula de la ganancia de Mason.

## 2. Mason

Una vez ingresado el grafo, se determinan mediante técnicas de análisis de grafos todos los caminos directos entre el nodo de entrada y el nodo de salida y todos los circuitos.

Luego, mediante la utilización de varios procedimientos, se determina la Delta general del sistema. Entre estos procedimientos hay procedimientos que determinan los circuitos que no se tocan, procedimientos que multiplican y suman las funciones de transferencia de las ramas tomando en cuenta la ganancia indefinida  $K$ .

Después se calcula la ganancia de las rutas directas mediante la utilización de algunos de los procedimientos mencionados anteriormente. Se calcula también la parte de la Delta que no toca a la trayectoria directa. Es necesario, en este caso, implementar procedimientos que, mediante técnicas de análisis de grafos, determinen qué

circuitos no tocan una trayectoria dada.

Finalmente, mediante la utilización de procedimientos de suma y multiplicación de funciones de transferencia de ramas afectadas por una variable indefinida  $K$ , se calcula la ganancia general del sistema. Esta ganancia corresponde a la función de transferencia del sistema que puede entonces ser estudiado mediante las técnicas descritas en los apartados anteriores.

## IV. MANUAL DE USUARIO

El programa SIST ofrece al ingeniero diseñador de Sistemas de Control una ayuda muy necesaria, tanto para el diseño inicial de un sistema, como para la verificación de condiciones de estabilidad y respuesta en sistemas ya existentes. Permite también al Ingeniero Diseñador realizar compensaciones en sistemas ya existentes y verificar sus hipótesis antes de conducirlos a la práctica.

Este programa permite ahorrar mucho tiempo al Projectista permitiendo simulaciones y verificaciones rápidas.

### A. Especificaciones

#### 1. Tipos de sistemas

El programa SIST ha sido realizado como una ayuda técnica para la elaboración y verificación de Sistemas de Control Lineales e Invariables en el Tiempo, de una sola entrada y una sola salida.

#### 2. Orden máximo

El programa SIST ha sido diseñado para una amplia gama de funciones de transferencia. El programa SIST trabaja Funciones de Transferencia con un orden máximo de 10.

### 3. Grafo

El programa SIST permite el ingreso del sistema mediante un grafo de fluencia. Este grafo puede contener un límite máximo de 10 nodos, lo cual es ampliamente suficiente para numerosas aplicaciones. Cada rama del grafo posee una función de transferencia definida; únicamente una rama puede estar afectada por una constante de ganancia indefinida K.

### 4. Rango de polos y ceros

El programa SIST trabaja con un rango de valores de polos y ceros amplio. El programa permite abarcar polos y ceros dentro del rango de -200 a 200. Si este rango no es suficiente en algún sistema, deberán utilizarse técnicas de cambios de escala antes de poder ingresar los datos al programa.

### 5. Sistema de computación necesario

El programa SIST debe ser ejecutado en un sistema IBM-PC o compatible. Es necesario un mínimo de 640Kb de memoria y un monitor monocromo con tarjeta Hércules para los gráficos.

### B. Correr el programa

Para realizar una corrida del programa es necesario que el disco o diskette cuente con el programa SIST.EXE, y con

las Units Compiladas UNIDAD1.TPU, UNIDAD2.TPU, UMASON.TPU, GRAPH.TPU, UTIL.TPU, UTILCRT.TPU.

Para iniciar escribir en la condición A>

A> SIST

el programa empieza a correr, aparece un cuadro introductorio.

Para ingresar al menú de Estudio de Estabilidad y Respuesta, presionar cualquier tecla.

#### C. Menú principal del programa

Se presentan al usuario diferentes opciones en la parte inferior de la pantalla (Ver figura A 4.1 en el apéndice A):

F1- En la parte central se encuentra el menú principal al cual se accede presionando F1 (F1-Menú).

F2- Al presionar F2 (F2-Tol) se permite el cambio de la tolerancia que se trabaja. El valor de la tolerancia colocada automáticamente al inicio del programa es 0.01.

F3- Al presionar F3 (F3-Función) se permite el ingreso de la función de transferencia del sistema o se permite observar la función de transferencia ya ingresada.

F4- Al presionar F4 (F4-Grafo) se permite el ingreso o la verificación del grafo de fluencia del sistema. A partir de

este grafo puede determinarse la función de transferencia por medio del método de la ganancia de Mason.

ESC- Al presionar ESC (ESC-Salida) se abandona el programa SIST. Retorno a DOS.

#### D. Ingreso de la función de transferencia

La función de transferencia del sistema puede ser ingresada por medio de dos formas:

-Ingreso directo utilizando F3-Función en el menú principal.

-Ingreso por medio del grafo de fluencia y utilizando la fórmula de la ganancia de Mason. Esto es realizado por medio del uso de la opción F4-Grafo en el menú principal.

##### 1. F3-Función

Se presentan al usuario diferentes opciones en la parte inferior de la pantalla (Ver figura A 4.2):

F1- Al presionar F1 (F1-ViewF) se muestra al usuario la función de transferencia actual.

F2- Al presionar F2 (F2-InputF) se permite el ingreso de la función de transferencia.

ESC- Al presionar ESC (ESC-Salida) se regresa al menú

principal.

a. Especificaciones de ViewF

La función de transferencia se encuentra en la forma de un cociente de dos polinomios  $B(s)$  y  $A(s)$ . En ViewF se muestran los dos polinomios.

Cada uno de los polinomios posee un número definido de coeficientes dado por el grado del polinomio. Los coeficientes son números reales que pueden estar afectados por una ganancia indefinida  $K$ . Así cada coeficiente tiene la forma:

$$a ( K + b )$$

$a$  y  $b$  son números reales.  $K$  es una ganancia indefinida.

En ViewF se observa cada uno de los coeficientes de los polinomios de la función de transferencia, se especifica si está afectado por  $K$  y si tal es el caso se da el valor de  $b$ . Los coeficientes se muestran de arriba hacia abajo en orden decreciente de grado. Al lado izquierdo de la pantalla se muestra el grado que corresponde.

b. Especificaciones de InputF

Esta opción permite ingresar directamente la función de transferencia del sistema. Para poder ingresarse la función de transferencia debe encontrarse en la forma de un cociente de dos polinomios (Si no es el caso puede usarse el ingreso por medio del grafo o reducir a mano la

función).

La función de transferencia puede estar afectada por una ganancia  $K$  indefinida.

Al utilizarse esta opción se ingresa, primeramente, el polinomio numerador de la función de transferencia y luego se ingresa el polinomio denominador. El ingreso de los dos polinomios es idéntico.

El programa pide el grado del polinomio. Este grado puede variar entre 0 y 10 para funcionamiento normal. Después de ingresado el grado, debe ingresarse el valor (número real) de los coeficientes en orden descendente de grado.

Luego el programa pregunta si algún coeficiente 'a' está afectado por la ganancia indefinida  $K$ . Si tal es el caso responder con S ó s; en caso contrario responder con N ó n.

Si algún coeficiente 'a' del polinomio está afectado por la ganancia indefinida  $K$ , el programa pregunta cuántos coeficientes son los afectados. Luego deben ingresarse las posiciones o los números de los coeficientes afectados: el coeficiente 1 es el de más alto grado, el 2 el del grado que le sigue en forma decreciente y así sucesivamente. Luego para cada uno de los coeficientes afectados por  $K$  debe ingresarse el valor (número real) 'b' que corresponde de tal forma que el coeficiente completo tiene la forma

$$a ( K + b )$$

Este proceso debe efectuarse, tanto para el polinomio

nominador, como para el denominador. Al ingresar a InputF el ingreso del polinomio numerador es seguido del ingreso del polinomio denominador automáticamente.

Si se ha cometido algún error en el ingreso, deberá completarse de todas formas el proceso. Al salir al menú deberá recomenzarse la operación de ingreso. Al ingresar a InputF se invalida toda función anteriormente ingresada.

## 2. F4-Grafo

Se presentan al usuario diferentes opciones en la parte inferior de la pantalla (Ver figura A 4.3):

F1- Al presionar F1 (F1-VerGrafo) se ingresa a un submenú que permite observar, o bien la función de transferencia de una rama específica del grafo o las conexiones entre los distintos nodos del grafo.

F2- Al presionar F2 (F2-InputGrafo) se permite realizar el ingreso del grafo de fluencia del sistema mediante el ingreso de la función de transferencia de cada rama.

F3- Al presionar F3 (F3-UnaRama) se permite modificar la función de transferencia de una de las ramas del grafo o añadir otra rama. No es posible añadir más nodos al grafo mediante esta opción.

F4- Una vez ingresado el grafo de fluencia puede determinarse la función de transferencia por medio del uso de esta opción F4 (F4-Mason). La función de transferencia es determinada a través de la fórmula de la ganancia de Mason. Después de calculada, la función de transferencia es guardada en memoria y puede ser vista mediante el uso de F3-Función en el menú principal.

ESC- Esta opción ESC (ESC-Salida) devuelve el control al menú principal del programa.

#### a. Especificaciones de VerGrafo

Esta opción lleva a un submenú que permite ver la función de transferencia de una rama o las conexiones entre nodos.

En la sub-opción que permite observar en pantalla la función de transferencia de una rama, se le pregunta al usuario cuáles son los nodos inicial y final de la rama correspondiente.

Si hay conexión entre esos nodos se despliega la función de transferencia en forma similar a la descrita en el apartado anterior (F3-Función), con la diferencia de que los coeficientes no pueden ser afectados individualmente por la ganancia K. Si la rama está afectada por K (todo el nominador multiplicado por K) se muestra una señal en la pantalla: 'RAMA afectada por K'.

Si no hay conexión entre los nodos pedidos, se envía un mensaje de imposibilidad: 'No hay conexión entre esos nodos'.

La sub-opción que permite ver las conexiones entre los distintos nodos del grafo, muestra con cuales nodos del grafo están conectados cada uno en particular.

#### b. Especificaciones de InputGrafo y UnaRama

InputGrafo se usa esencialmente para ingresar el grafo al principio, y UnaRama se utiliza para modificar una rama del grafo, en caso necesario al estar trabajando o si se cometió un error en el ingreso inicial. Sin embargo, la diferencia que existe entre InputGrafo y UnaRama es que en la primera opción se pregunta al inicio cuántos son los nodos del grafo. El número de nodos del grafo puede variar de 2 a 10.

Luego InputGrafo y UnaRama se comportan exactamente igual. El grafo es ingresado rama por rama.

Se presentan entonces tres sub-opciones: InputUnaRama, GananciaK y Salida.

En InputUnaRama se pregunta inicialmente cuál es el nodo inicial y el nodo final de la rama a ingresarse.

En caso que la conexión escrita sea imposible de realizar se envía una señal de imposibilidad: no puede conectarse un nodo con él mismo o no puede conectarse un nodo con otro cuyo número sea mayor al número de nodos ingresado.

Si la conexión sí es posible se ingresa a continuación la función de transferencia de la rama. Esta función es el cociente de dos polinomios cuyos coeficientes están definidos. Los polinomios se ingresan en forma similar a la descrita en F3-Funcion, InputF, con la diferencia de que los coeficientes no pueden ser afectados por una ganancia K.

Si se realiza una conexión nueva sobre una rama ya existente, la función de transferencia anterior se cancela y se lee, entonces, la nueva función.

La opción GananciaK se utiliza para afectar una rama por una constante de ganancia indefinida K. Esta constante de ganancia afecta a todos los coeficientes del nominador de la función de transferencia de la rama. En el grafo de fluencia sólo una rama puede ser afectada por K. Al escogerse esta opción se pregunta el nodo inicial y el final de la rama que debe ser afectada.

Si antes se había aplicado esta opción a otra rama, esta última quedará sin efecto. La última rama a la que se aplique la opción GananciaK, quedará afectada y será la única rama afectada.

En la opción de salida se regresa al menú de Grafo Del Sistema.

### c. Especificaciones de Mason

Después de haber ingresado completamente el grafo de

fluencia, si se desea encontrar la función de transferencia del sistema, entonces debe escogerse la opción F4-Mason.

Esta opción calcula la función de transferencia entre el nodo de entrada y el nodo de salida. El nodo de entrada es siempre el nodo 1. Si el grafo tiene N nodos, el nodo de salida es el nodo N (N máximo = 10).

Al escogerse esta opción, el programa SIST muestra las trayectorias directas entre el nodo de entrada y el de salida, y muestra todos los circuitos contenidos en el grafo. Encontrar estas características del grafo es necesario para el cálculo de la ganancia mediante la fórmula de Mason.

Luego, el programa calcula la ganancia. Este proceso toma cierto tiempo que depende de la complejidad del grafo y de las funciones de transferencia de las ramas. Se da una señal al haberse concluido el proceso. Los polinomios numerador y denominador de la función de transferencia no deberán sobrepasar el grado 10 para un correcto análisis posterior.

Una vez terminado el proceso, la función de transferencia del sistema queda guardada en memoria y puede ser vista utilizando F3-Función, ViewF, o puede ser analizada por medio de los diferentes métodos de análisis que se discuten posteriormente en este capítulo.

### E. Estudio de estabilidad y respuesta (F1-Menú)

Después de realizado el ingreso de la función de transferencia por cualquiera de los dos métodos explicados anteriormente, puede iniciarse el estudio de estabilidad y de respuesta en frecuencia y en tiempo del sistema. Para ello debe ingresarse al menú mediante la opción F1-Menú en el menú principal (Ver figura A 4.1).

#### 1. Método de Routh-Hurwitz

El método de Routh-Hurwitz permite determinar la estabilidad absoluta del sistema en forma rápida.

Si la función de transferencia del sistema no está afectada por una constante de ganancia indefinida  $K$ , el programa indicará si el sistema es estable o inestable y presentará en pantalla la primera columna de la matriz de Routh.

Si la función de transferencia del sistema está afectada por una constante de ganancia indefinida  $K$ , el programa indicará los valores de  $K$  para los cuales el sistema es estable. Para valores de  $K$  mayores a 100, el programa no puede asegurar estabilidad. Los valores de  $K$  encontrados tienen una tolerancia de  $\pm 0.5$ .

Al concluirse la observación de los resultados se regresa al menú principal oprimiendo ENTER.

## 2. Lugar de las raíces

La estabilidad de un sistema de control puede ser estudiada más a fondo mediante el método de Lugar de las Raíces. Este método no sólo permite determinar la estabilidad absoluta sino que también permite el estudio de la estabilidad relativa y permite observar el efecto de la adición de polos y ceros a la función de transferencia de lazo abierto.

Si la función de transferencia del sistema no posee una constante de ganancia indefinida  $K$ , al escogerse esta opción se dan únicamente los valores de las raíces de la ecuación característica, deduciéndose entonces la estabilidad del sistema mediante la posición de las raíces en el plano  $s$ .

Si la función de transferencia del sistema posee una constante de ganancia indefinida  $K$ , al escogerse esta opción se entra a un sub-menú que presenta dos opciones esenciales: Método normal y Método especial del lugar de las raíces (Ver figura A 4.4).

El método normal muestra el gráfico del lugar de las raíces en forma completa y puede ser útil para hacerse una idea global del lugar de las raíces del sistema.

El método especial permite un estudio más detallado del lugar de las raíces en los rangos de valores de  $K$ , característicos del sistema y muestra, en mejor forma, los valores de  $K$  para los cuales el sistema es estable o

ampliamente estable.

a. Especificaciones del Método normal

Al ingresarse al método normal del lugar de las raíces, el programa pregunta cual es el rango de variación de  $K$  empezando desde 0. La ganancia  $K$  varía en cualquier sistema desde 0 hasta un valor máximo posible; es este valor máximo el que debe ingresarse para obtener el gráfico o los valores de las soluciones de la ecuación característica.

Después de ingresado el valor máximo de  $K$  se presenta en pantalla una ventana que indica los valores actuales de  $K$ , mientras se van calculando las raíces. Después de calcularse un total de 200 puntos (pixels) se presenta al usuario un sub-menú y el valor actual de las escalas del gráfico.

El sub-menú presenta 4 opciones (Ver figura A 4.5):

F1-Gráfico.

Esta opción permite realizar el gráfico del lugar de las raíces hasta el valor de  $K$  máximo. El gráfico en la pantalla contiene un máximo de 200 pixels, si la escala está bien escogida. Este número de pixels puede ser modificado, exclusivamente, mediante un cambio en el código del programa (Ver Unit Unidad2). Después de realizado el gráfico puede

volverse al sub-menú presionando Enter.

El gráfico contiene una línea vertical, el eje  $jw$ , que divide el plano  $s$ . El eje real no contiene una línea horizontal para obtener mayor claridad en la posición de las raíces. El eje real se encuentra, sin embargo, al centro y puede observarse por medio de las separaciones grandes que se encuentran en la orilla de la pantalla. Cada separación pequeña en la orilla de la pantalla corresponde al valor de la escala que se muestra en la esquina inferior izquierda.

#### F2-Valores.

Todos los valores de las soluciones para diferentes valores de  $K$  pueden ser vistos mediante el uso de esta opción. Esta opción es útil para hacerse una idea de la posición de las raíces y poder así escoger una escala adecuada para el gráfico. Todos los valores de las soluciones son vistos en 6 pantallas, pasando de una a otra presionando Enter. Después de ver las 6 pantallas se regresa al sub-menú.

Al observarse las soluciones se muestra una indicación del valor del paso de  $K$ . Este paso de  $K$  corresponde al valor del que se aumenta  $K$  mientras varía de 0 al valor de  $K$  máximo. Para determinar los puntos que forman el lugar de las raíces del gráfico se calculan los valores de las raíces de la ecuación característica para diferentes valores de  $K$ :  $K$  va aumentando desde 0 del valor de paso de

K hasta alcanzar el valor de K máximo. Para cada aumento se calculan las raíces de la ecuación.

#### F3-Escalas.

Esta opción permite cambiar las escalas que se utilizan en la realización del gráfico del Lugar de las Raíces. Si al graficar el Lugar de las Raíces el número de pixels que aparece en pantalla es muy pequeño ó si los pixels están muy concentrados en un solo lugar, deberán corregirse las escalas para obtener un gráfico más claro. Después de realizado el cambio de escalas se retorna al sub-menú.

#### F4-Salida.

Esta opción permite salirse del sub-menú y regresa al menú principal del programa. Si se desea continuar con el Método Especial deberá salirse al menú principal.

#### b. Especificaciones del Método especial

El método especial del lugar de las raíces desarrollado en este programa, permite obtener el gráfico del lugar de las raíces para valores de K que el usuario escoge en forma especial: rango de valores esencial para determinación de estabilidad absoluta y relativa.

Al escogerse esta opción se pregunta el valor inicial de K, valor a partir del cual se aumentará paso a paso la ganancia y se irá produciendo el gráfico.

Luego se pregunta el valor del paso. Este valor corresponde al valor que se aumentará  $K$  cada vez que se pida que avance 1 Paso. Así se irán produciendo pixels que corresponden a los valores de  $K$  que se calculan sumando sucesivamente el valor del paso al valor inicial de  $K$  ingresado.

Se ingresa así a la realización del gráfico. Se tienen entonces cinco diferentes opciones:

F1-1Paso.

Esta opción permite sumarle al valor actual de  $K$  el valor del paso. Después de sumado el valor se calculan las raíces de la ecuación característica para el nuevo valor actual de  $K$ , produciendo un nuevo conjunto de pixels en la pantalla. El valor actual de  $K$  aparece en la parte inferior de la pantalla. Esta opción es útil al acercarse a los valores para los cuales el sistema puede tornarse inestable.

F2-5Pasos.

Esta opción permite avanzar en forma directa 5 Pasos. Esta opción ejecuta 5 veces la función de F1. Al escoger esta opción aparecen en el gráfico 5 nuevos conjuntos de pixels que corresponden a los valores de las soluciones de la ecuación característica para los valores de  $K$  siguientes:  $K_{\text{actual}}+1$  Paso,  $K_{\text{actual}}+2$  Pasos, ...,  $K_{\text{actual}}+5$

Pasos. El valor de  $K$  se actualiza en  $K_{\text{actual}} + 5$  Pasos y aparece en la parte inferior de la pantalla. Esta opción es útil para avanzar rápidamente en la construcción del gráfico del lugar de las raíces.

Estas dos opciones permiten observar cómo se genera el lugar de las raíces al aumentar  $K$ , controlando el valor actual de  $K$ .

#### F3-Iniciar.

Esta opción permite reiniciar el gráfico mediante colocar un nuevo valor inicial de  $K$  y un nuevo valor de paso.

#### F4-Escalas.

Esta opción permite cambiar las escalas actuales que aparecen en la parte inferior izquierda de la pantalla. Al cambiar las escalas se actualiza automáticamente el gráfico. En el gráfico, cada una de las subdivisiones que aparece corresponde al valor de la escala.

#### ESC-Salida.

Esta opción permite el retorno al menú principal del programa.

### 3. Respuesta en el tiempo

La respuesta en el tiempo de un sistema puede estudiarse

numéricamente sólo si la función de transferencia está definida. La función de transferencia ingresada al sistema por los medios descritos anteriormente puede contener una constante de ganancia indefinida  $K$ ; en este caso, al escogerse esta opción, el programa pregunta el valor real de  $K$ . Si el usuario desea conocer la respuesta en el tiempo para varios valores de  $K$ , deberá ingresar varias veces a esta opción y cambiar entonces los valores de  $K$ .

Una vez ingresado el valor de  $K$  aparece en pantalla el menú de respuesta en el tiempo y los valores actuales de las escalas. Se presentan entonces distintas opciones (Ver figura A 4.6):

F1- Al presionar F1 (F1-Escalón) se simula una entrada escalón unitario al sistema y se muestra gráficamente la salida en el tiempo. Si el sistema es de segundo orden subamortiguado, se especifican el tiempo de pico  $t_p$ , el valor de máximo sobreimpulso  $M_p$  y el tiempo de establecimiento  $t_s$ .

F2- Al presionar F2 (F2-Rampa) se simula una entrada rampa unitaria al sistema y se muestra gráficamente la salida en el tiempo.

F3- Al presionar F3 (F3-Rampa) se simula una entrada impulso unitario al sistema y se muestra gráficamente la

salida en el tiempo.

F4- Al presionar F4 (F4-Escalas) pueden modificarse los valores actuales de las escalas que aparecen en la parte central de la pantalla. En el gráfico, cada subdivisión corresponde al valor actual de la escala.

ESC- Al presionar ESC (ESC-Salida) se retorna al menú principal del programa.

a. Especificaciones de Escalón, Rampa e Impulso

Estas opciones permiten simular una entrada escalón, rampa e impulso al sistema, con condiciones iniciales nulas.

Al escogerse cualquiera de las opciones aparece en pantalla una ventana que muestra el número de puntos (pixels del gráfico) que se van calculando. El número de puntos establecido en el programa para el gráfico es 200. Al alcanzarse el número de 200 puntos se genera en pantalla el gráfico correspondiente. Una vez generado el gráfico, puede continuarse presionando Enter.

Si el sistema es de segundo orden subamortiguado, al salir del gráfico de la opción Escalón, se presentan en pantalla tres características importantes de la respuesta:

- Tiempo de pico  $t_p$ : Es el tiempo que tarda la señal en alcanzar su valor pico al afectar el sistema con una

entrada escalón unitario.

- Máximo sobreimpulso: Es el valor máximo que alcanza la amplitud de la respuesta al afectar el sistema con una entrada escalón unitario.

- Tiempo de establecimiento: Es el tiempo que tarda la señal en alcanzar un valor cuasiestable: la respuesta transitoria no difiere de la respuesta estacionaria en más del 5%.

Al salir del gráfico de cualquier opción o después de dadas las características mencionadas arriba, al presionar Enter se regresa al sub-menú de respuesta en el tiempo, pudiéndose entonces ingresar otra señal de prueba o cambiar las escalas actuales.

#### 4. Respuesta en frecuencia

La respuesta en frecuencia de un sistema puede estudiarse numéricamente sólo si la función de transferencia está perfectamente definida. La función de transferencia ingresada al sistema por los medios descritos antes puede contener una constante de ganancia indefinida  $K$ ; en este caso, al escogerse esta opción, el programa pregunta el valor real de  $K$ . Si el usuario desea conocer la respuesta en frecuencia para distintos valores de  $K$ , deberá ingresar varias veces a esta opción y cambiar entonces los valores de  $K$ .

Una vez ingresado el valor numérico real de  $K$ , se

presenta en pantalla el menú de respuesta en frecuencia y se muestran los valores actuales de las escalas. Las opciones de este sub-menú son las siguientes (Ver figura A 4.7):

F1- Al presionar F1 (F1-Graficar) se calculan los puntos del gráfico de ganancia vrs. frecuencia y de ángulo de fase vrs. frecuencia. Al concluirse el cálculo se muestran los dos gráficos en pantalla.

F2- Al presionar F2 (F2-Escalas) pueden modificarse los valores actuales de las escalas que se encuentran en la parte central de la pantalla. En el gráfico, cada subdivisión corresponde al valor actual de las escalas correspondientes.

ESC- Al presionar ESC (ESC-Salida) se regresa al menú principal del programa.

#### a. Especificaciones de las escalas

En la opción de respuesta en frecuencia pueden modificarse 3 escalas:

-Valor inicial de frecuencia (ESCALAX rad/s): Este dato indica el valor que toma la primera división del gráfico en el eje x (intersección con eje y). El eje x está graduado en escala logarítmica decimal por lo que cada una de las divisiones mostradas en este eje corresponde a un valor 10

veces mayor al que corresponde a la división anterior. Este eje está graduado en rad/s correspondiendo esto a la frecuencia angular  $w$ .

-Valor escala de ganancia (ESCALAY1 dB): Este dato indica el valor que corresponde a cada división del gráfico de ganancia. La ganancia está dada en dB.

-Valor escala de fase (ESCALAY2 grados): Este dato indica el valor que corresponde a cada división del gráfico de ángulo de fase. El ángulo de fase está dado en grados.

#### b. Especificaciones de gráfico

Al escogerse la opción Gráfico aparece en pantalla una ventana en la que se muestra el número de puntos (pixels del gráfico) que se van calculando. Se calculan un total de 185 puntos para cada uno de los gráficos: ganancia vs frecuencia y ángulo de fase vs. frecuencia. Una vez calculados todos los puntos se generan simultáneamente los dos gráficos en pantalla.

#### c. Especificaciones de márgenes

Después de observados los gráficos se muestran los márgenes de ganancia y fase correspondientes. Alguno de los márgenes puede tener el valor 9.99E09; esto significa que el margen tiene un valor infinito. Los márgenes de ganancia y fase no son calculados en forma muy precisa; su función es dar una idea de la estabilidad del sistema.

Se retorna al sub-menú de respuesta en frecuencia al presionar Enter.

## V. CONCLUSIONES

A.- El área de control es un área que tiende a desarrollarse en nuestro país, por lo que es necesario que existan profesionales capacitados en esa rama de ingeniería para mejorar los sistemas existentes o elaborar nuevos sistemas.

B.- Los ingenieros electrónicos pueden ayudar al desarrollo de esta rama de ingeniería mediante la utilización de dispositivos electrónicos que pueden servir, tanto en diseños nuevos como en compensaciones de sistemas ya existentes.

C.- Muchas aplicaciones actuales en este campo requieren gran cantidad de operatoria que necesita mucho tiempo y esfuerzo. El programa desarrollado proporciona al profesional una herramienta útil para reducir tiempo y esfuerzo en el diseño o mejoramiento de sistemas.

D.- El programa abarca un gran número de aplicaciones posibles en ingeniería de control. Sin embargo existen sistemas que no pueden ser estudiados por el programa. Por ello, el programa cuenta con la documentación técnica adecuada para que a medida que se necesite en el futuro, éste pueda ampliarse para trabajar más aplicaciones.

## VI. BIBLIOGRAFIA

- Ogata, K. Ingeniería de Control Moderna.  
1980 Prentice Hall. México.
- Kuo, B. Sistemas Automáticos de Control.  
1983 CECSA. México.
- Dorf, R. Sistemas Modernos de Control  
1989 Addison-Wesley Iberoamericana. México.
- Distefano, J. Retroalimentación y Sistemas de Control. Serie  
1981 Schaum. McGraw-Hill. México.
- Burden, R. y Fairies, D. Análisis Numérico.  
1985 Grupo Editorial Iberoamérica. México.
- Kolman, B. y Busby, R. Estructuras de Matemáticas Discretas  
1988 para la Computación. Prentice Hall. México.
- Borland International. TURBO PASCAL, Owner's Handbook.  
1987 Borland International.

## APENDICE A

### Figuras de referencia

---

ESTUDIO DE ESTABILIDAD Y RESPUESTA

---

MENU PRINCIPAL

- 1: Método de Routh-Hurwitz
- 2: Lugar de las raíces
- 3: Respuesta en el tiempo
- 4: Respuesta en frecuencia

---

F1-Menú    F2-Tol    F3-Función    F4-Grafo    ESC-Salida

---

FIGURA A 4.1

---

FUNCION DE TRANSFERENCIA

---

---

F1-ViewF

F2-InputF

ESC-Salida

---

FIGURA A 4.2

---

GRAFO DEL SISTEMA

---

---

F1-VerGrafo F2-InputGrafo F3-UnaRama F4-Mason ESC-Salida

---

FIGURA A 4.3

---

ESTUDIO DE ESTABILIDAD Y RESPUESTA

---

MENU PRINCIPAL

- 1: Método de Routh-Hurwitz
- 2: Lugar de las raíces
- 3: Respuesta en el tiempo
- 4: Respuesta en frecuencia

Su opción: 2

---

F1-Normal

F2-Especial

ESC-Salida

---

FIGURA A 4.4

---

LUGAR DE LAS RAICES

---

METODO NORMAL

Escala real, ESCALAX : 1.000  
Escala compleja, ESCALAY : 1.000

---

F1-Gráfico    F2-Valores    F3-Escalas    ESC-Salida

---

FIGURA A 4.5

---

RESPUESTA EN EL TIEMPO

---

Escala de tiempo, ESCALAX : 1.000

Escala de amplitud de respuesta, ESCALAY : 1.000

---

F1-Escalón F2-Rampa F3-Impulso F4-Escalas ESC-Salida

---

FIGURA A 4.6

---

RESPUESTA EN FRECUENCIA

---

Valor inicial de frecuencia (ESCALAX rad/s): 0.1000  
Valor escala de ganancia (ESCALAY1 dB) : 10.00  
Valor escala de fase (ESCALAY2 dB) : 90.00

---

F1-Gráfico

F2-Escalas

ESC-Salida

---

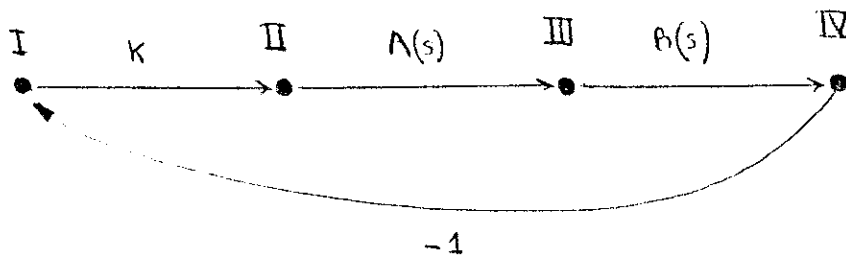
FIGURA A 4.7

## APENDICE B

### Ejemplo de utilización

Supongamos que contamos con un sistema de control como el que se muestra en la figura B.1. Nuestro deseo es estudiar el comportamiento del sistema para distintos valores de la ganancia  $K$  del amplificador.

Iniciamos el estudio ingresando a la computadora el grafo de fluencia y las funciones de transferencia de cada rama. Para ello nos colocamos en el menú principal (Ver figura A 4.1) y escogemos la opción :



$$A = 23.2 / s$$

$$B = 5375 / ( s^2 + 87.5 s + 5375 )$$

Figura B.1

F4-Grafo. Una vez ingresados allí, escogemos la opción F2-InputGrafo (Ver figura A 4.3). En esta opción se nos pregunta el número de nodos del grafo; en este caso particular colocamos 4. Luego ingresamos a la computadora las funciones de transferencia de cada rama mediante la opción F1-InputUnaRama. Como ejemplo, en el caso de la rama que va del nodo 3 al nodo 4 se ingresa inicialmente el polinomio numerador de grado 0 y cuyo único coeficiente es 5375. Luego ingresamos los coeficientes del polinomio denominador de grado 2 empezando por 1, luego 87.5 y, finalmente, 5375. Para el caso de la rama que va del nodo 1 al nodo 2 utilizamos la opción F2-BananciaK.

Una vez ingresado el grafo podemos verificar que haya sido ingresado correctamente mediante la opción F1-VerGrafo (Ver figura A 4.3). Podemos observar la función de transferencia de una rama específica mediante F1-VerUnaRama u observar las conexiones entre los nodos mediante F2-VerConexiones.

Luego podemos encontrar la función de transferencia del sistema mediante la opción F4-Mason (Ver figura A 4.3). Una vez calculada la función de transferencia podemos volver al menú principal (Ver figura A 4.1).

Si deseamos conocer la función de transferencia del sistema escogemos la opción F3-Función (Ver figura A 4.1), y luego la opción F1-ViewF (Ver figura A 4.2).

Ahora podemos empezar a realizar el estudio de

estabilidad y respuesta. Escogemos entonces la opción File-Menú (Ver figura A 4.1). Empezamos ahora por determinar los valores de  $K$  para estabilidad absoluta del sistema, escogiendo la opción 1: método de Routh-Hurwitz. Se nos muestra aquí el rango de valores de  $K$  para estabilidad del sistema.

Podemos ingresar ahora al estudio del lugar de las raíces mediante la opción 2 y colocamos valores de  $K$  factibles según encontramos por medio del método de Routh-Hurwitz. Observamos aquí el comportamiento de las raíces al ir variándose  $K$  y obtenemos valores de  $K$  característicos que podemos estudiar en las opciones de respuesta en tiempo y frecuencia.

Podemos ahora ingresar a la opción de respuesta en el tiempo (opción 3 Figura A 4.1), y colocamos uno de los valores de  $K$  característicos o de interés que encontramos anteriormente. Escogemos entonces una entrada típica que convenga a nuestra aplicación práctica (Ver figura A 4.6) para observar la respuesta en el tiempo.

Finalmente, podemos escoger la opción de respuesta en frecuencia (opción 4 Figura 4.1), y colocamos también uno de los valores de  $K$  de interés. Observamos entonces la respuesta en frecuencia mediante los diagramas de Bode.