INDICE

CERTIFICACION

DEDICATORIA

Página

CAPITULO I

INTRODUCCION

CAPITULO II

GENERALIDADES

2.1 Respuesta de Frecuencia 1

2.2 Objetivos del Análisis 2

Métodos de Análisis 2

DESCRIPCION DE LAS GRAFICAS DE BODE

2.3 Respuesta de Frecuencia de Lazo Abierto 2

2.4 La Forma de Bode y la Ganancia de Bode 4

2.5 Representaciones de Bode de Funciones Simples 4

2.6 Respuesta de Frecuencia de Lazo Cerrado 14

2.7 Estudio de la Realimentación de Estados 15

ANALISIS DE BODE

2.8 Trabajo en Régimen Transitorio 22

2.9 Frecuencia de Resonancia 22

2.10 Ancho de Banda 23

2.11 Trabajo en Régimen Permanente 24

2.12 Error en un Sistema con Realimentación de Estado 24

Error de Posición 25

Error de Velocidad 26

Error de Aceleración 28

Empleo de los Coeficientes de Error Permanente 31

2.13 Estabilidad relativa

Margen de Fase 35

Margen de Ganancia 36

Máximo de Resonancia 37

Sensibilidad 37

CAPITULO III

3.1 Planteamiento Generales 37

3.2 Descripción de Subrutinas Variables y Diagramas de Flujo

3.2.1 Ingreso de Datos 40

3.2.2 Cambio de Datos 41

3.2.3 Visualización de Datos 42

3.2.4 Subrutina para la Evaluación de la Funcio de Transferencia 42

Subrutina para evaluar la Funcio de Lazo Abierto 48

3.2.5 Subrutina para evaluar la Función de Transferencia con Realimentación de Estados 50

3.2.6 Análisis de Respuesta de Frecuencia 52

3.2.7 Estabilidad del Sistema 52

3.2.8 Margen de Ganancia y Fase 53

3.2.9 Máximo de Resonancia 60

3.2.10 Velocidad de Respuesta 62

3.2.11 Frecuencia de Resonancia 62

3.2.12 Ancho de Banda 62

3.2.13 Exactitud 66

3.2.14 Gráficos 70

3.2.15 Gráficos de Bode 70

3.2.16 Gráfico de Ganancia vs. Margen de Ganancia y Fase 74

3.2.17 Gráfico Comparativo 77

Subrutina de Sensibilidad 80

CAPITULO IV

EJEMPLOS Y RESULTADOS 83

CAPITULO V

CONCLUSIONES 97

Anexo A Listado de Programa 100

Anexo B Modo de Empleo del Programa 114

BIBLIOGRAFIA

CERTIFICACION

Yo, ING. MARCO BARRAGAN, habiendo sido escogido como Profesor Director de Tesis del Sr. NELSON AUGUSTO OQUENDO PEREZ ANDA, y luego que he cumplido con la misión de dirigir y asesorar la misma.

DECLARO QUE:

El documento en mención que presenta y que lleva el Título de "ANALISI POR DIAGRAMA DE BODE DE SISTEMAS REALLIMENTADOS POR VARIABLES DE ESTADO".

Reúne las condiciones y se ha sometido a las normas establecildas por la Escuela Politécnica Nacional, para ser APROBADA.

En consecuencia, considero que el mencionado estudiante, se encuentra APTO para presentarse y ser receptadas las demás pruebas, previas a la obtención del Título y Grado de INGENIERO EN ELECTRONICA Y CONTROL.

ING. MARCO BARRAGAN

! D E D I C O Y D O Y G R A C I A S !

A D I O S, POR haberme concedido el privilegio de existir y el Don de conocerle.

A M I M A D R E, PORQUE si el amor de Dios, se parece a algo en este Mundo, es sin duda el amor de mi Madre que desde el nacimiento y diariamente me despierta con ilusión a la vida, mediante la contemplación de sus virtudes y ejemplo , con su sacrificio sin ostentación, de todas las horas, tan noble y desinteresado, que no exige en su abnegación sublime, ni siquiera la correspondencia.

A M I P A D R E, LA causa de mi ser al engendrarme, la guía más fecunda de mis acciones, la mano generosa y franca siempre dispuesta a la ayuda, la presencia de una sabiduría, de la que sólo puedo captar un mero aliento, la amistad más preciada y honesta; en fin, simplemente, todo lo exelso que creo, en la elocuencia de mi silencio.

A M I S M A E S T R O S, QUE ejercitando mis facultades, me abrieron un nuevo horizonte, un nuevo camino, con meta y destino promisorios, provocando la alegría en la acción creadora y el conocimiento Que con honestidad y sapiencia moldearon mi ser y me concedieron el tesorero más codiciado de la educación, les digo con Horacio: "El vaso conservará por mucho tiempo el aroma de la primera substancia que contuvo" y que Uds. lo destilaron.

A M I S A M I G O S, Sandra Vega, Paulina Vela, Natalia Vela, Maggi Jara, Salomé Oquendo, Laura Oquendo, David Solt, Juan Pazmiño. QUIENES han hecho sentir, que siendo ellos, como en verdad, cada uno son, mis mejores amigos, tengo realmente mucho más de lo que merezco.

A T O D O S, QUIENES me ayudaron y me seguirán ayudando a "SER INGENIERO", mi mayor anhelo.

INTRODUCCION

Presentar una tesis de electrónica en un período de avance tecnológico sofisticado como el que vivimos, es grave responsabilidad generacional, que sólo puede acometerse con optimismo, con fe, pero también con profunda humildad y absoluta honestidad.

Así comprendido el reto, presento a consideración de mis MAESTROS de la Politécnica, artífices de mi formación, lo que titulándose "Analisis por Diagrama de Bode de Sistemas Realimentados por Variables de Estado", no deja de ser sino un ensayo, que entregado a los estudiantes que atrás nuestro vienen, sólo constituirá un mito en la búsqueda de la verdad científica y en la aplicación práctica.

Esta tesis, es un complemento de la tesis "Realimentación de Estados" presentada por el Sr. Ing. Juan Carlos Guerra en el año 1.983, en la cual se recomienda se haga el análisis de estos sistemas realimentados por variables de estado.

Se ha escogido el análisis en el dominio de la frecuencia, por medio de los Diagramas de Bode, ya que es un método práctico que permite representar gráficamente una función de transferencia, indicando al diseñador el efecto que tienen los polos y ceros individuales en un gran rango de frecuencias.

Se ha diseñado para el objeto, un programa digital, implementado en un sistema IBM P.C. que lo llamo Anrees, porque está aplicado al Análisis de Realimentación de Estado. Es decir que se ha creado este programa digital que realiza los cálculos de los parámetros que se desea sean analizados, integrando, como una subrutina el programa de los gráficos que tiene Symphony, para conseguir visualizar los datos con una alta resolución y versatilidad en el cambio de escalas.

El diseño del programa ANREES, está sustentado teóricamente en el capítulo IV, manifestandose aquí sobre los diagramas de Bode, que tienen magnitud y ángulo de fase expresados en escala logarítmica, graficándose lo diagramas de Bode para las cuatro clases en diferentes de factores que pueden encontrarse en una función de transferencia. Del análisis en el dominio de la frecuencia de los diagramas de Bode se definen los parámetros que determinan el trabajo en régimen transitorio.

Para analizar el trabajo en régimen permanente se determina el márgen de fase, márgen de ganancia, el máximo de resonancia, así como el error de posición, de velocidad y de aceleración, necesarios en la determinacón de la estabilidad relativa y absoluta.

Se demuestran las ventajas que imparte la presencia de la realimentación como es el aumento de la exactitud, la reducción de sensibilidad de la razón de la entrada; a la salida dejar al sistema completamente estable, etc. Usado como metodo la

realimentación de todos los estados de sistemas de una sola entrada y una sola salida, que se analizan en este trabajo, se logran situar los polos de la función de transferencia, según las especificaciones deseadas.

La tesis muestra la forma como se determina la función equivalente al utilizar la realimentación de cada uno de los estados a través de amplificadores, cuyos coeficientes sumados, hacen la reducción a una función de realimentación equivalente.

Con ejemplos de aplicación para sistemas realimentados por variables de estado, utilizando los programas computacionales implementados: ANÑEES como principal y Symphony como subprograma de gráficos, la tesis demuestra que se pueden diseñar sistemas de control con buenas características de estabilidad, velocidad, sensibilidad y exactitud que permiten un mejor control de los sistemas.

La tesis pretende demostrar las herramientas de las que podemos disponer para realizar trabajos de investigación. En cada punto tratado, la tesis permite obtener resultados individuales o parciales, los mismos que asociados o entrelazados, nos dan la síntesis de un proceso armónico, que permite demostrar y probar su concordancia.

La tesis recoge el sistema existente, para complementarle y mejorarle; parece que llena una necesidad sentida y ya sugerida, por lo que aspiro a que el estudiante y el diseñador de sistemas

de control, encuentre el programa que el área de Ingeniero de control necesitabá con un método que resuma lo intrincado que es análisis diseño e implementación.

EL AUTOR

GENERALIDADES

2.1 RESPUESTA DE FRECUENCIA

La respuesta de frecuencia de un sistema se define como la respuesta del sistema en el estado estacionario a una señal sinusoide de entrada.

Las ventajas que presenta el método de la respuesta de frecuencia son:

- Fácil disponibilidad de señales de prueba sinusoidales para diversos rangos de frecuencia y amplitudes.
- Se puede obtener la función de transferencia que describe el comportamiento sinusoide en el estado estacionario de un sistema, reemplazando en la función de transferencia del sistema T(s) a s por jw.
- El diseño de un sistema en el dominio de la frecuencia proporciona al diseñador un control del ancho de banda y alguna medida de la respuesta del sistema a ruidos y perturbaciones indeseables.

La principal desventaja de este método para el análisis es la correlación directa pero no tan sólido que existe entre las caracteristicas de la respuesta de frecuencia y las

correspondientes caracteristicas de la respuesta transitoria; pero en la práctica la caracteristica de la respuesta de frecuencia se ajusta usando diversos criterios de diseño que normalmente dan como resultado una respuesta transitoria satisfactoria.

2.2 OBJETIVOS DEL ANALISIS

Los principales objetivos del análisis de sistemas de control por realimentación, son la determinación de las siguientes caracteristicas del sistema:

a) El grado de estabilidad del sistema.
b) La calidad del trabajo ejecutado en estado estacionario.
c) La respuesta a transitorios.

METODOS DE ANALISIS

El procedimiento general para analizar el sistema de control es el siguiente:

1.- Se determina las ecuaciones o función de transferencia para cada componente del sistema.

2.- Se escoje un modelo para representar al sistema (diagrama en bloque o gráfico del flujo de señales).

3.- Se realiza el modelo del sistema conectando apropiadamente los componentes (bloques o nodos y ramas).

4.- Se determina las caracteristicas del sistema.

DESCRIPCION DE LAS GRAFICAS DE BODE

2.3 RESPUESTA DE FRECUENCIA DE LAZO ABIERTO

Las representaciones de Bode consisten en dos gráficas: La magnitud de GH(jw) y el ángulo de fase de GH(jw), siendo G y H las funciones descritas en el sistema mostrado en la fig 2-0

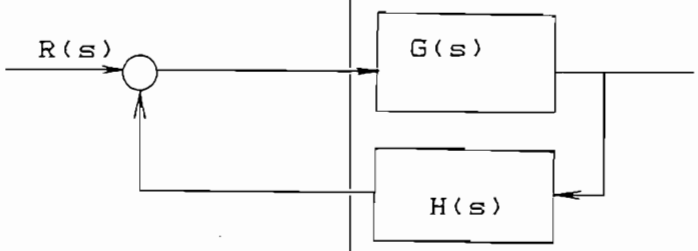


Fig 2-0 Sistema con realimentación

ambas se representan como funciones de la frecuencia w. Generalmente se usan escalas logarítmicas para el eje de la frecuencia y para |GH(jw)|, ya que estas escalas simplifican considerablemente su construcción manejo e interpretación dentro de un amplio intervalo de frecuencias.

La magnitud |P(jw)| de cualquier función de transferencia P(jw) para cualquier valor de w, se representa sobre una escala logarítmica en decibeles (dB), donde

$$dB = 20 \log |P(jw)| \qquad (2.1)$$

Puesto que el decibel es una unidad logarítmica, la magnitud en dB de una función de respuesta de frecuencia, compuesta de un producto de términos, es igual a la suma de las magnitudes en dB. de los términos individuales. Luego, cuando se emplea una escala logarítmica la representación de la magnitud de una función de respuesta de frecuencia expresada como un producto de varios términos, se puede obtener sumando las representaciones de las magnitudes individuales en dB para cada término del producto. Es conveniente además, usar la llamada forma de Bode de una función de respuesta de frecuencia para construir representaciones de Bode.

2.4 LA FORMA DE BODE Y LA GANANCIA DE BODE

La forma de Bode para la función

$$\frac{K(jw+z1)(jw+z2)\ldots(jw+zm)}{(jw)^2(jw+p1)(jw+p2)\ldots(jw+pn)}$$

donde n es un entero no negativo, se obtiene factorizando todos los zi y pi y ordenando en la forma

$$\frac{[K\,\Pi zi/\,\Pi pi]\;(1+jw/z1)\;(1+jw/z2)\ldots(1+jw/zm)}{(jw)\;(1+jw/p1)\;(1+jw/p2)\ldots(1+jw/pn)} \qquad (2.2)$$

Definiéndose por tanto la ganancia de bode como el coeficiente del numerador en (2.2):

$$KB = \frac{K\,\Pi\,zi}{\Pi\,pi} \qquad (2.3)$$

2.5 REPRESENTACIONES DE BODE DE FUNCIONES SIMPLES

Las cuatro clases diferentes de factores que pueden encontrarse en una función de transferencia son:

1) Ganancia constante KB.

2) Polos o ceros en el origen $(jw)^{\pm 1}$

3) Polos o ceros en el eje real $(jaw + 1)^{\pm 1}$

4) Polos o ceros conjugados complejos $((1 + 2\,\zeta/wn\,)jw + (jw/w)^2)^{\pm 1}$

1) La constante KB tiene una magnitud |KB|, un ángulo de fase de 0 grados si KB es positiva y -180 grados si KB es negativa. Por tanto, las representaciones de Bode para KB son simplemente lineas rectas horizontales como se muestra en las figuras 2-1 a) y b).

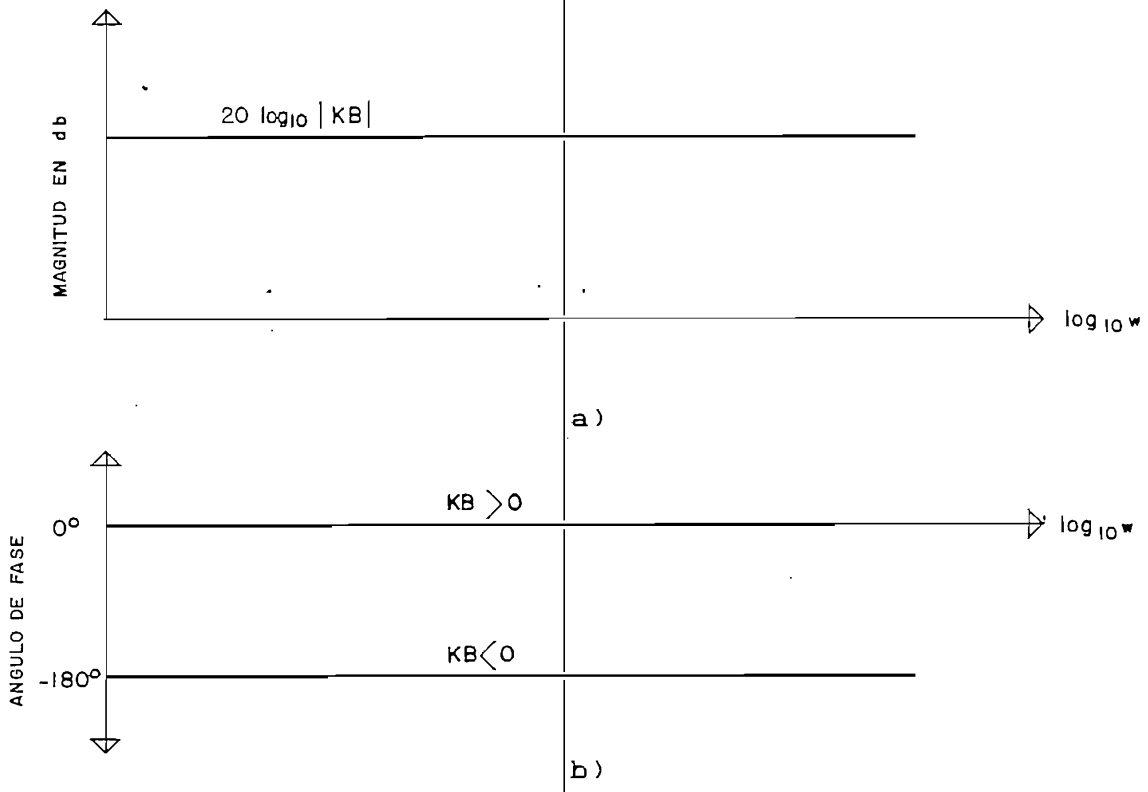


Fig. 2-1 Representaciones de Bode para Kb a) Magnitud en dB
b) Angulo de fase

2) La función de respuesta de frecuencia para un polo de orden n en el origen es

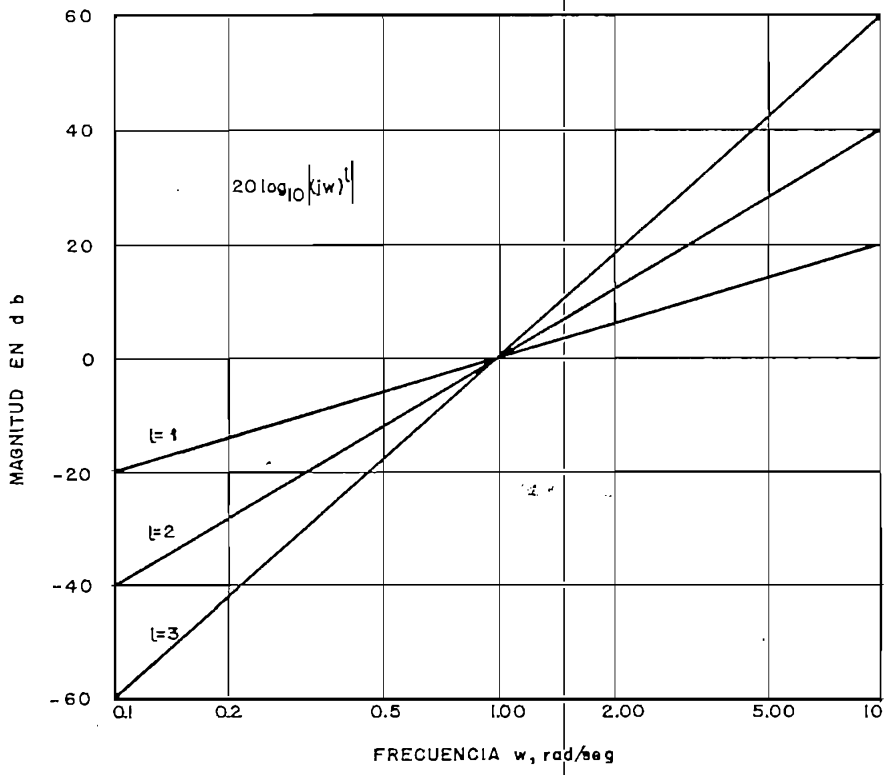
$$\frac{1}{(jw)^n} \qquad (2.4)$$

Las representaciones de Bode para esta función son líneas rectas como se muestran en las figuras 2-3 a) y b).

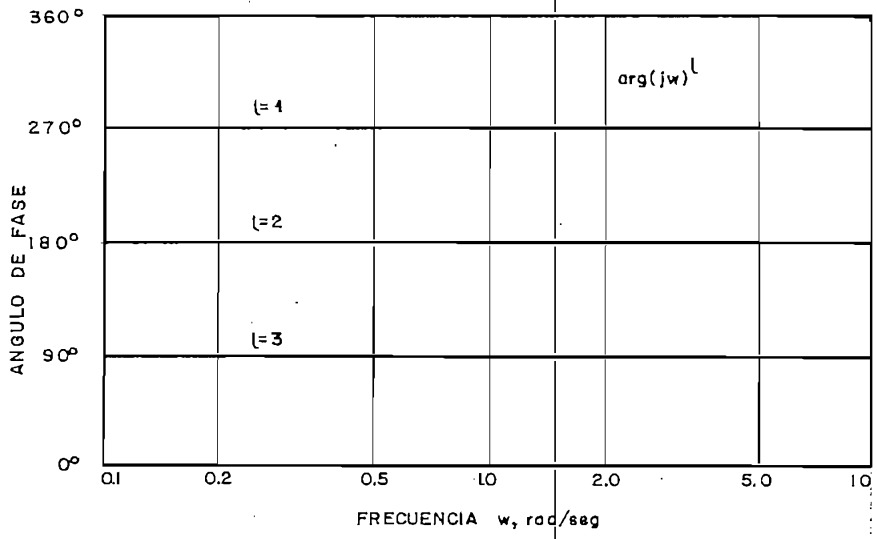
Mientras que para un cero de orden n en el origen

$$(jw)^n \qquad (2.5)$$

Siendo sus representaciones de Bode las reflexiones acerca de las líneas de 0 dB y 0 grados de las figuras que se muestran en las figuras 2-3 a) y b) como se muestran en las figuras 2-4 a) y b).



a)



b)

fig. 2-4 Representación de Bode para un cero de orden n
a) Magnitud de dB y b) ángulo de fase

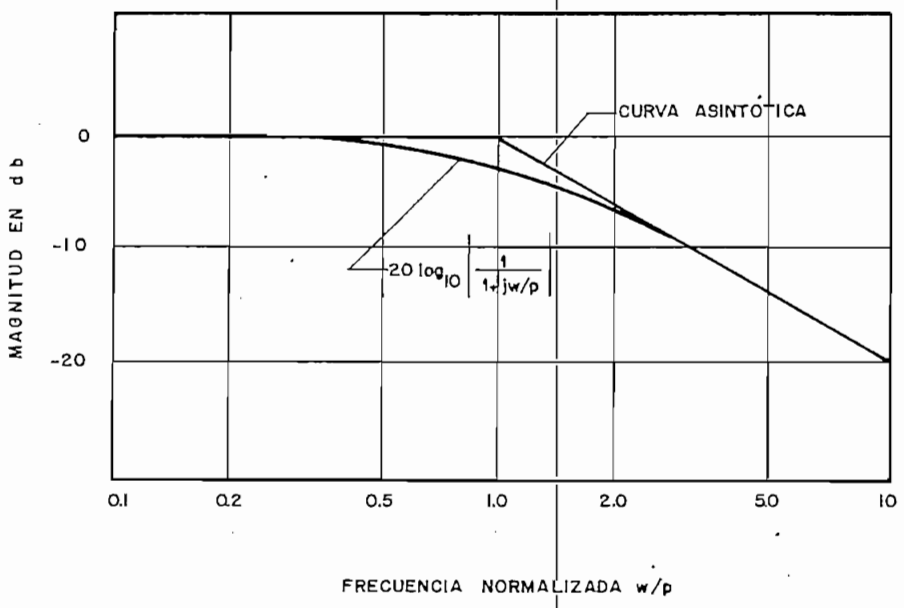
3) Considérese la función de transferencia de polo simple

$$\frac{1}{1+jw/p} \qquad p > 0 \qquad (2.6)$$

cuyas representaciones de Bode se dan en las figuras 2-5 a) y b).

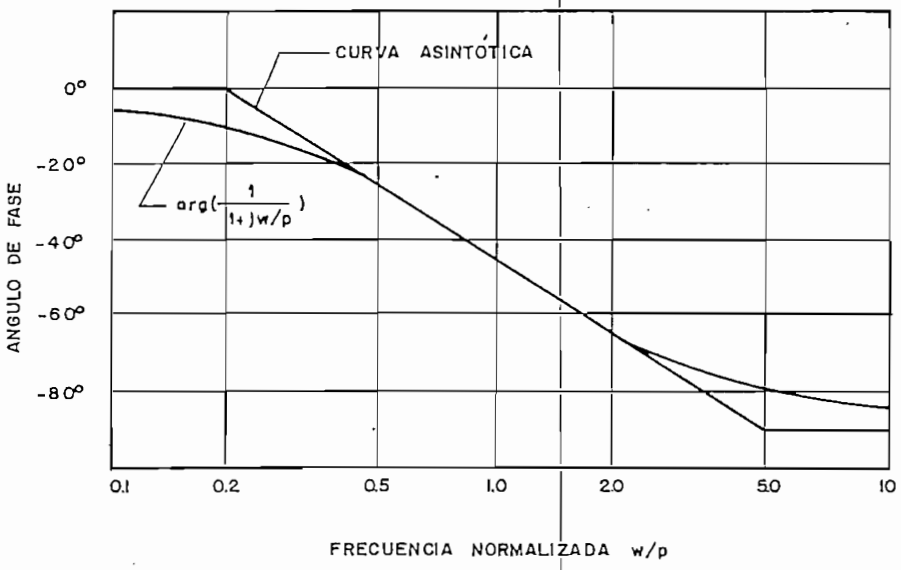
Obsérvese que la escala logarítmica de frecuencia está normalizada en términos de p. Para determinar las aproximaciones asintóticas para estas representaciones de Bode se observa que $w/p << 1$, o $w << p$,

$$20 \log \left| \frac{1}{1+jw/p} \right| = 20 \log 1 = 0 \text{ dB}$$



a)

Fig 2-5 Representación de Bode para un polo simple
a) Magnitud en dB



b)

fig. 2-5 Representación de Bode para un polo simple, a) Magnitud de dB y b) Angulo de fase

y para w/p >> 1 o w >> p,

$$20 \log \left| \frac{1}{1+jw/p} \right| = 20 \log \left| \frac{1}{jw/p} \right| = -20 \log (w/p)$$

Por consiguiente la representación de Bode para la magnitud tiende asintóticamente hacia una línea recta horizontal en 0 dB a medida que w/p tiende a cero y a - 20 log (w/p) cuando w/p tiende a infinito (fig. 2-5 a). Obsérvese que esta asintota de alta frecuencia es una línea recta con pendiente igual a - 20 dB/década o -6 dB/octava cuando se representa sobre una escala logaritmica de frecuencia como se muestra en la figura 2-5 a) Las dos asintotas se interceptan en la frecuencia de corte w =p rad/seg. Para determinar la asintota del ángulo de fase se ve que para w/p << 1, o w << p,

$$\arg \frac{1}{1+jw/p} = - \tan^{-1} (w/p) = 0$$

y para w/p >> 1, o w >> p,

$$\arg \frac{1}{1+jw/p} = -\tan^{-1}(w/p) = -90$$

Luego la representación de Bode para el ángulo de fase tiende asintóticamente a 0 grados a medida que w/p tiende a cero, y a 90 grados cuando w/p tiende a infinito como se muestra en la figura 2-5 b). Una asintota en linea recta con pendiente negativa se puede usar para unir la asintota de 0 grados y la de -90 grados dibujando una linea desde la asintota de 0 grados en w = p/5 hasta la de -90 grados en w = 5p. Obsérvese que esta es tangente a las curvas en w = p.

Los errores introducidos por estas aproximaciones asintóticas se muestran en la tabla 2-1 para la función de transferencia de polo único a varias frecuencias.

Tabla 2-1. Errores asintóticos para $\frac{1}{1+jw/p}$

w	p/5	p/2	p	2p	5p
Error de Magnitud (dB)	-0,17	-0,96	-3	-0,96	-0,17
Error del ángulo de fase	-11,3	-0,8	0	0,,8	11,3

Las representaciones de Bode y sus aproximaciones

Las representaciones de Bode y sus aproximaciones asintóticas para la función de respuesta de cero único

$$1+jw/z \qquad (2.7)$$

se muestra en la figura 2-6 a) y b). Para el caso en que la función de transferencia dada tenga términos como $(1+jw/a)^{+n}$ se puede realizar una construcción asintótica similar. La frecuencia de corte sigue estando en $w = a$, y las asintotas son lineas rectas. La asintota de baja frecuencia es una linea recta horizontal en Ø dB, mientras que la asintota de alta frecuencia tiene una pendiente de -20ndB/década o 20ndB/década. El error resultante de las expresiones asintóticas es n veces el correspondiente a $(1+jw/a)^{+n}$. El ángulo de fase es n veces el de $(1+jwa)^{+n}$, en cada punto de frecuencia.

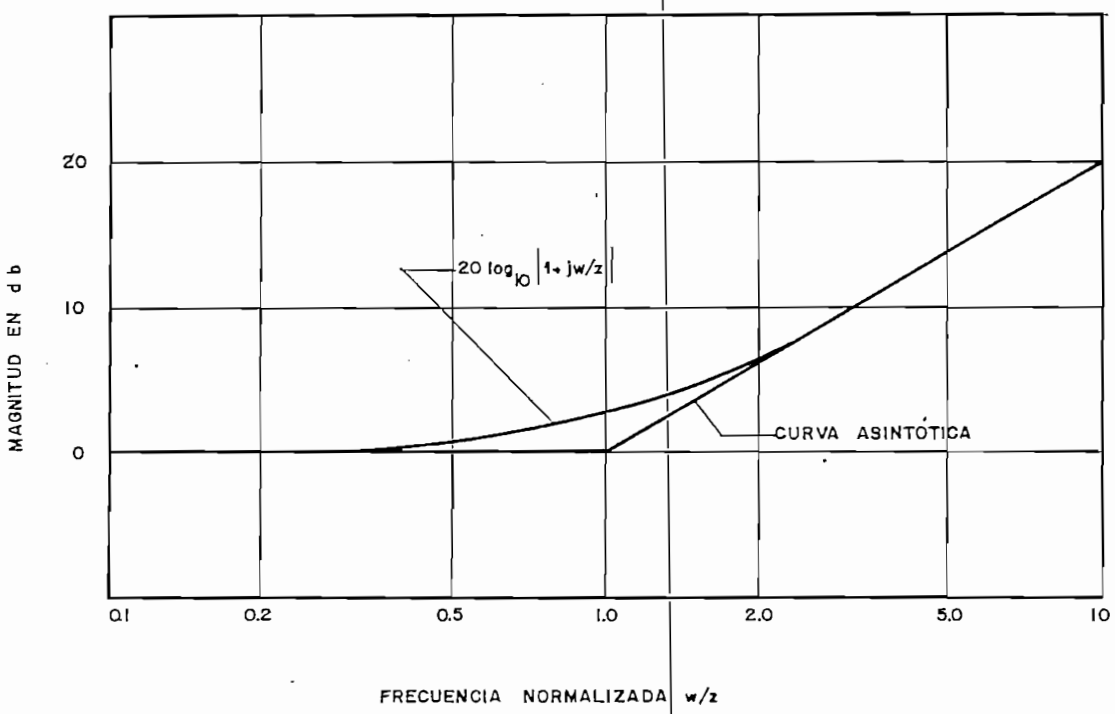
4) Las representaciones de Bode y sus aproximaciones asintóticas para la función de respuesta de frecuencia de segundo orden con polos complejos,

$$\frac{1}{1+j2\zeta\, w/wn - (w/wn)^2} \qquad (2.8)$$

se muestran en las figuras 2-7 a) y b). si > 1, se puede expresar este factor cuadrático como un producto de dos de primer orden como polos reales. Si $0 < \zeta < 1$, este factor cuadrático es el producto de dos factores complejos. Obsérvese que la razón de amortiguamiento es un parámetro en estas gráficas, la cual determina la amplitud del pico de resonancia que se produce y que era de esperar de la ecuación (2.8).

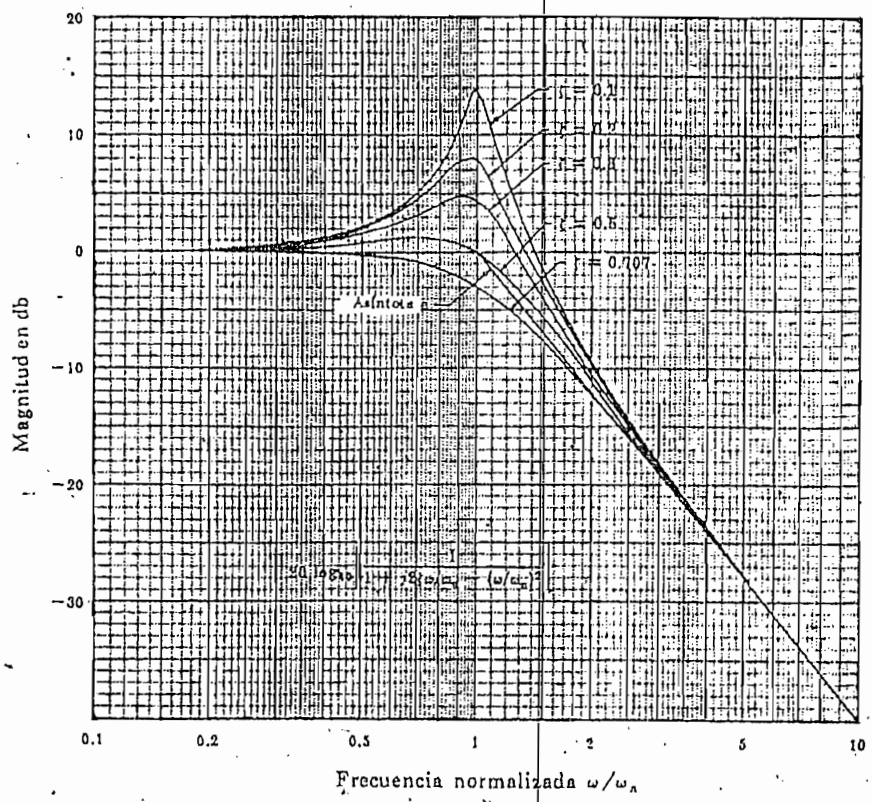
La asíntota de la magnitud que se muestra en la figura 2-7 a) tiene una frecuencia de corte en w = wn y una pendiente de alta frecuencia que está en -180 grados en el lugar de -90 y el punto tangencial o inflexión está en -90 grados.

Las representaciones de Bode para un par de ceros complejos son las inversiones de los polos complejos alrededor de las lineas de 0 dB y 0 grados.

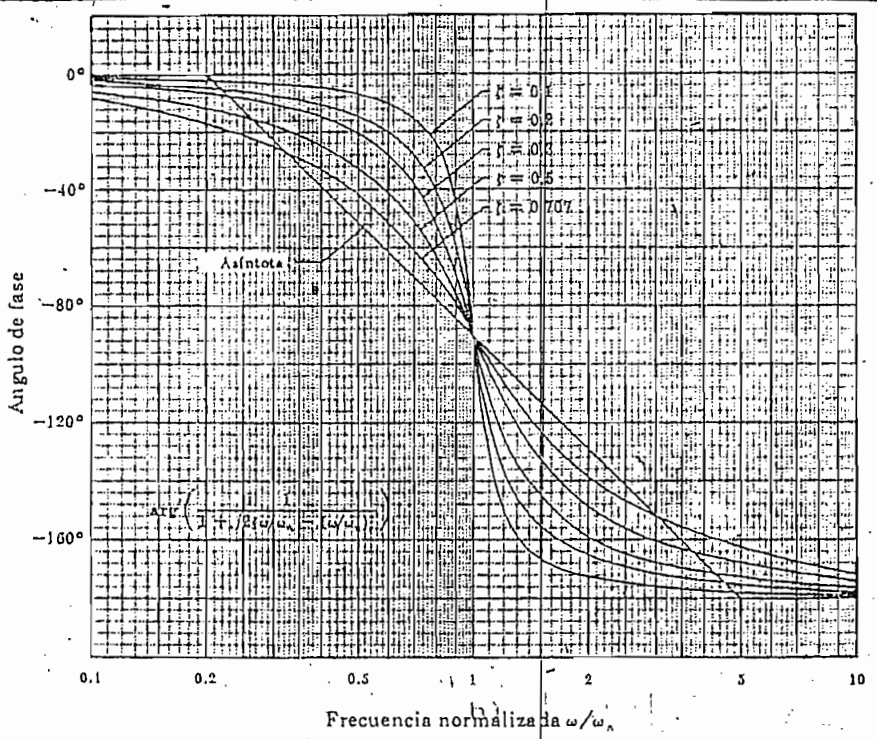


a)

Fig 2-6 Representación de Bode para Cero Unico a) Magnitud en dB-



a)



b)

Fig.2-7 Representación de Bode para la función de segundo orden con polos complejos a) Magnitud en dB b)Angulo de fase

2.6 RESPUESTA DE FRECUENCIA DE LAZO CERRADO

Aunque no hay un método directo para representar la respuesta de frecuencia de lazo cerrado C(jw)/R(jw) a partir de las representaciones de Bode de lazo abierto GH(jw), esto se puede aproximar de la siguiente manera. La respuesta de frecuencia de lazo cerrado está dada por

$$\frac{C(jw)}{R(jw)} = \frac{G(jw)}{1+GH(jw)}$$

Si $|GH(jw)| >> 1$

$$\frac{C(jw)}{R(jw)} = \frac{G(jw)}{GH(jw)} = \frac{1}{H(jw)}$$

Si $|GH(jw)| << 1$

$$\frac{C(jw)}{R(jw)} = G(jw)$$

La respuesta de frecuencia de lazo abierto de la mayoría de sistemas se caracteriza por una alta ganancia en las frecuencias bajas y una ganancia decreciente para las frecuencias más altas, debido al exceso de los polos en comparación con los ceros. Luego, la respuesta de frecuencia de lazo cerrado para un sistema de realimentación de unidad (H=1) se aproxima por medio de una magnitud de 1 (0 dB) y ángulo de fase de 0 grados para las frecuencias que están por debajo de la frecuencia del cruce de ganancia w1. Para frecuencias por encima de w1, la respuesta de

frecuencia de lazo cerrado se puede aproximar por medio de la magnitud y ángulo de fase de G(jw).

2.7 ESTUDIO DE LA REALIMENTACION DE ESTADOS

En el trabajo presentado por el Sr. Juan Carlos Guerra, "Realimentación de Estados", se hace un estudio detallado de este tema, por lo que en este trabajo complementario, se mostrará algunos de los aspectos importantes que son de interés para el desarrollo del análisis de estos sistemas.

Las ventajas que imparte la presencia de la realimentación en general a un sistema son:

1.- Aumento en la exactitud es decir, la habilidad para reproducir la entrada fielmente.

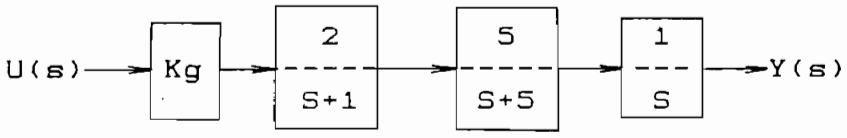
2.- Reducción de sensibilidad de la razón de salida a la entrada las variaciones producidas en las caracteristicas del sistema.

3.- Reduce los efectos producidos por la no linealidad y distorsión.

El sistema realimentado por variables de estado proporciona todas estas ventajas antes mencionadas á mas de dejar al sistema completamente estable.

Usando como método la realimentación de todos los estados de sistemas de una sola entrada y una sola salida, que son los que se analizarán en el presente trabajo, se logra situar los polos de la función de tranferencia, según las especificaciones deseadas.

En la figura 2-8 a) se tiene un diagrama de bloques representando un sistema de lazo abierto de control, el cual será tomado como ejemplo para mostrar los efectos que produce la realimentación de estados.



En la figura 2-8 b) se observa claramente dos etapas del sistema, el proceso o planta en si y la etapa controladora que consiste en una realimentación de cada uno de los estados a través de amplificadores cuyas ganancias son K1, K2, K3, las mismas que se denominan coeficientes de realimentación y de un amplificador adicional de ganancia Kg que contribuirá a dar las características deseadas del sistema. La suma de estas tres cantidades de realimentación es:

$$K1.X1 + K2.X2 + K3.X3 = \underline{K}.\underline{X} \quad (2.9)$$

siendo $\underline{K}$ el vector de realimentación.

Usando técnicas de manipulación de diagramas de bloques se puede simplificar la figura 2-8 b) pasando a la forma que se indica en la figura 2-8 c) y con una posterior reducción se consigue el diagrama de la figura 2-8 d), en la cual se observa

que la realimentación de variables de estado es equivalente a insertar una función de realimentación Heq. como en un sistema convencional, y añadir una ganancia Kg a la función de transferencia G(s) del proceso o planta del sistema.

De manera que se ha conseguido hacer lo que se conoce como reducción a un Heq (figura 2-8 e).

De la (figura 2-8 d) se obtiene:

$$Heq(s) = \frac{k3\ S^2 + 5(\ K3 + K2\ )\ S + 5\ K1}{2} \qquad (2.10)$$

$$G(s) = \frac{10\ Kg}{S\ (S+1)\ (S+5)} \qquad (2.11)$$

Por tanto la función de transfererencia del sistema será:

$$\frac{Y(s)}{R(s)} = \frac{Kg.G(s)}{1 + Kg.G(s).Heq(s)} \qquad (2.12)$$

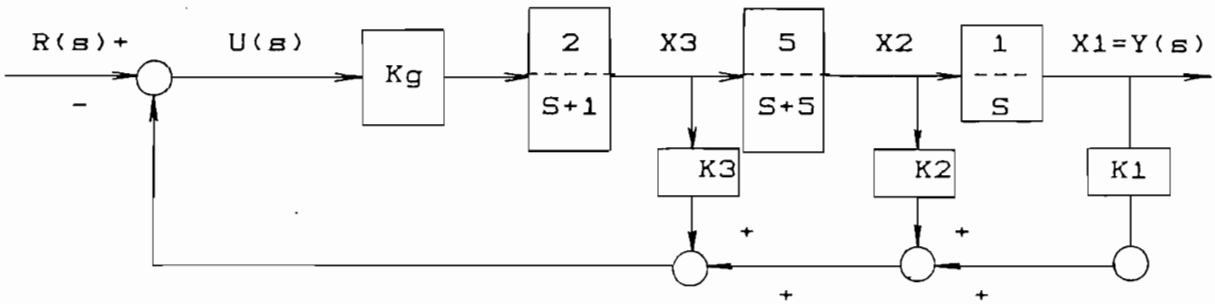


figura 2.8 b)

$$Heq(s) = \frac{K^T X(s)}{Y(s)} = \frac{K^T X(s)}{cX(s)} \qquad (2.16)$$

Cuando se utiliza la relación Xj(s) = sj-1X1(s) de variables de fase, la ecuación (2.16) se convierte en

$$Heq(s) = \frac{knS^{n-1} + kn-1S^{n-2} + \ldots + k2 + k1}{S^{w} + cw-1S^{w-1} + c1 + c0} \qquad (2.17)$$

Así según las ecuaciones (2-13) y (2-17)

$$G(s)\ Heq(s) = \frac{kg(knS^{n-1} + kn-1S^{n-2} + \ldots + k2S + k1)}{Sn + an-1S^{n-1} + a1S + a0} \qquad (2.18)$$

Llevando las ecuaciones (2-13) y (2-18) en la (2-12), resulta

$$\frac{Y(s)}{R(s)} = \frac{kg(S^{w} + S^{w-1} + \ldots + c0)}{S^{n} + (an-1+kgkn)S^{n-1} + \ldots + (a0 + Kgk1)} \qquad (2\text{-}19)$$

Un análisis de las ecuaciones (2-13), (2-17), (2-18), (2-19) conducen a las siguientes conclusiones:

a.- El numerador de Heq(s) es un polinomio de grado n-1, en s, es decir, tiene n-1 ceros. Pueden seleccionarse los valores de los coeficientes de este polinomio, una vez que se haya sacado

factor común kq, para lograr el comportamiento deseado del sistema.

b.- El numerador de G(s) a excepción de Kg es igual al denominador de Heq(s). Por tanto la función de transferencia en bucle abierto G(s)Heq(s) tiene los mismos n polos que G(s) y tiene los n-1 ceros de Heq(s). La función G(s)H(s) tiene n-1 ceros, que se determinan en el proceso de diseño.

c.- La ecuación (2.17) implica que cuando K = c se tendrá realimentación unitaria (Heq = 1).

d.- Según la ecuación (2-19) se observa que el resultado de la realimentación de estados a través o por medio de elementos constantes, es el de cambiar las posiciones de los polos en bucle cerrado, dejando los ceros del sistema, si los hay, iguales a los de G(s). Puede ser deseable además especificar que uno o más polos en bucle cerrado se anulen con uno o más ceros indeseados de C(s)/R(s).

e.- El diagrama del lugar de raices, basado en la ecuación (2-18) para Kn>0, revela que existe una única asintota con Θ = -180 grados, que n-1 ramas terminan en los n-1 ceros arbitrarios que pueden situarse en cualquier lugar del plano s, y que una rama termina en el eje real negativo en $s=-\infty$. La estabilidad del sistema se asegura para los valores elevados de Kg si todos los ceros de Heq(s) se sitúan en el semiplano s izquierdo. Para Kn<0 existe una síntota única con = 0 grados, así el sitema resulta inestable para valores grandes de Kg.

ANALISIS DE BODE

2.8 TRABAJO EN REGIMEN TRANSITORIO

El estado transitorio del sistema o el funcionamiento con respecto al tiempo es una respuesta de interés para los sistemas de control.

Aunque la respuesta de frecuencia de un sistema de control da una imagen cualitativa de la respuesta transitoria, la correlación entre frecuencia y respuestas transitorias, es indirecta, excepto en el caso de sistemas de segundo orden en los cuales se puede predecir exactamente el trabajo transitorio, determinado éste por la rapidez de la respuesta, esto es la rapidez en alcanzar el estado estacionario, en razón de la relación existente con la frecuencia de resonancia wr y el ancho de banda.

2.9 FRECUENCIA DE RESONANCIA

Como se determinó en 2.5 4) el sistema con una función de transferencia con polos o ceros conjugados complejos, producen un pico de resonancia (Mp), denominándole a la frecuencia a la que ocurre este pico como frecuencia de resonancia (wr), la cual se puede determinar tomando la derivada de la magnitud de la ecuación (2.8) respecto de la frecuencia normalizada w/wn y haciéndola igual a cero. De tal forma que la frecuencia de resonancia se representa por la relación :

$$wr = wn \sqrt{1-2\xi^2} \qquad (2.20)$$

la cual está ilustrada en la figura 2-9

El valor de la frecuencia de resonancia wr es una medida de la rapidez de la respuesta transitoria. Cuanto mayor es el valor de wr, más rápido es el tiempo de respuesta. En otras palabras, el tiempo de crecimiento varia inversamente con wr.

2.10 ANCHO DE BANDA

Con referencia a la figura 2-9 se denomina ancho de banda al rango de frecuencia $0 < w < wc$ en el que el valor del lazo cerrado no cae por debajo de -3 decibelios del valor máximo. Llamándose a wc la frecuencia de corte.

Un ancho de banda elevado corresponde a un tiempo de crecimiento breve, es decir, respuesta rápida. En términos generales, se puede decir que el ancho de banda es directamente proporcional a la rapidez de respuesta.

Para que el sistema siga con exactitud entradas arbitrarias, es necesario que el sistema tenga un elevado ancho de banda. Sin embargo, desde el punto de vista del ruido, el ancho de banda no deberia ser muy grande.

Cabe añadir que un sistema con ancho de banda elevado requiere componentes de caracteristicas elaboradas. (El costo de los componentes generalmente se incrementa con el ancho de banda)

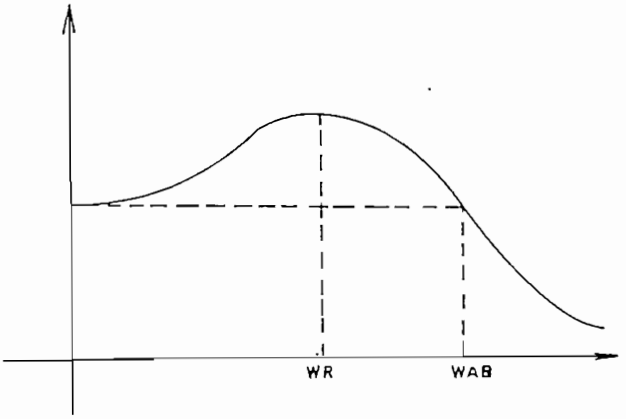


figura 2-9

2.11 TRABAJO EN REGIMEN PERMANENTE

Para un sistema de control es necesario determinar si el sistema es o no estable. Además, si el sistema es estable, frecuentemente es necesario investigar la estabilidad relativa, punto que lo trataremos más adelante.

Un sistema estable se define como aquel que tiene una respuesta limitada; es decir, se dice que el sistema es estable si estando sujeto a una entrada o perturbación limitada, su respuesta es de magnitud limitada.

2.12 ERROR EN UN SISTEMA CON REALIMENTACION DE ESTADO

De las ventajas de realimentación mencionadas en la sección 2.7, a pesar de su costo y mayor complejidad, es el mejoramiento esperado en la reducción del sistema en estado estacionario, de aquí la importancia de analizar el error en régimen permanente.

En los desarrollos que siguen se emplea la representación de variables de fase (forma canónica) en la que se determinan los valores nesesarios de los coeficientes de realimentación.

ERROR DE POSICION

Despejando Y(s) de la ecuación (2.19), basada en la representación con variables de fase, y aplicando el teorema del valor final, se obtiene para una entrada en escalón

$$Y(t)ss = \frac{Kg\ co\ Ro}{ao+KgK1} \qquad (2.21)$$

El error del sistema se define por

$$e(t) = r(t) - y(t) \qquad (2.22)$$

Para un error nulo en régimen permanente, e(t)ss = 0, la salida debe ser igual a la entrada:

$$y(t)ss = r(t) = Ro = \frac{Kg\ co\ Ro}{ao + KgK1} \qquad (2.23)$$

en la que co ≠ 0. Esto requiere que Kg co = ao + KgK1, o sea

$$K1 = co - \frac{ao}{Kg} \qquad (2.24)$$

FACULTAD DE INGENIERIA ELECTRICA
BIBLIOTECA
2837
E.P.N.

Así, puede lograrse un error nulo en régimen permanente con entrada en escalón con realimentación de variables de estado aunque G(s) sea del tipo 0. En una planta polar (sin ceros) Co= 1 y para un Tipo 1 o mayor ao =0. En este caso se requiere que K1=1. Por tanto se determina el coeficiente K1 con los parámetros de la planta, una vez especificado un error nulo en régimen permanente para una entrada en escalón. Según la ecuación (2.19) la ecuación característica del sistema es:

$$S^n+(an-1+kgkn)S^{n-1}+\ldots+(a2+kgk3)S^2+(a1+kgk2)S+(a0+Kgk1)=0 \quad (2\text{-}25)$$

Nótese que el término constante del polinomio es positivo, así se satisface el requisito de que todos los coeficientes de la ecuación (2.25) sean positivos para que exista una respuesta estable.

ERROR DE VELOCIDAD

Para realizar el análisis con entradas rampa o parabólica debe determinarse primero la función error E(s). Despejando Y(s) de la ecuación (2.19) y llevándo a E(s) = R(s) - Y(s) resulta

$$E(s)= R(s)\frac{S^n+(an-1+kgkn)S^{n-1}+\ldots-kg(S^w+cw-1S^{w-1}+\ldots+c1S+c0)}{S^n+(an-1+kgkn)S^{n-1}+\ldots+(a2+kgk3)S^2+(a1+kgk2)S+(a0+Kgk1)}$$

(2.26)

llevando la ecuación (2.24), requisito para tener un error nulo en régimen permanente con una entrada en escalón, a la ecuación

(2.26) se produce la anulación de los términos constantes del numerador.

$$E(s) = R(s)\frac{S^n+(an-1+kgkn)S^{n-1}+\ldots+(a1+kgk2)S - kg(S^n+cw-1S^{n-1}+\ldots+c1S+c0)}{S^n+(an-1+kgkn)S^{n-1}+\ldots+(a2+kgk3)S^2+(a1+kgk2)S+kgc0} \qquad (2.27)$$

Para una entrada en rampa $R(s) = R1/S^2$

$$e(t)ss = \lim sE(s) = \frac{a1 + kgK2 - Kgc1}{Kgco} R1 \qquad (2.28)$$

Para obtener $e(t)ss = 0$ es necesario que:

$$a1 + KgK2 - Kgc1 = 0$$

Esto se logra cuando:

$$K2 = c1 - \frac{a1}{Kg} \qquad (2.29)$$

En una planta sin ceros $co = 1$ y $c1 = 0$; así $K2 = a1 / Kg$. En este caso la primera potencia de s en la ecuación característica, (2-25), tiene un coeficiente nulo y el sistema es inestable. Por tanto, no puede conseguirse un error nulo en régimen permanente para una entrada en rampa con una

realimentación de variables de estado en un sistema con planta polar.

Si a1 + kgk2 > 0, para mantener un coeficiente positivo de s en la ecuación (2-25), el sistema puede ser estable pero con un error finito. El error en una planta polar (sin ceros) es

$$e(t)ss = k2 + \frac{a1}{kg} R1 \qquad (2.30)$$

Supongamos que el valor de k2 dado por la ecuación (2.29) está especificado para lograr un error nulo en régimen permanente para una entrada en rampa, siendo el sistema cero-polar en la que c1 > 0. Llevando la ecuación (2.29) a la ecuación (2.25) resulta un coeficiente positivo Kgci para la primera potencia de s. Así, un sistema estable con realimentación de variables de estado con un error nulo en régimen permanente tanto con una entrada en escalón como en rampa, sólo puede lograrse cuando la razón de mando tiene al menos un cero. Nótese que esto ocurre aunque G(s) sea del Tipo 0 ó 1.

ERROR DE ACELERACION

Entrada Parabólica r(t) = R2u-3(t) = (R2t2)u-1(t), R(s) = R2/s3

Para este tipo de entrada conviene considerar separadamente la planta polar de las plantas cero-polares. Para una planta polar solamente, satisfecha la ecuación (2.24), la ecuación (2.26) se reduce a

$$E(s)=\frac{R(s)}{S^3}\;\frac{S^n+(an-1+kgkn)S^{n-1}+\ldots+(a1+kgk2)S-kg(S^w+cw-1S^{w-1}+\ldots+c2S^2)}{S^n+(an-1+kgkn)S^{n-1}+\ldots+(a2+kgk3)S^2+(a1+kgk2)S+kgc0} \qquad (2.31)$$

Como $e(t)ss = \lim sE(s) = \infty$ se llega a la conclusión de que una planta sólo polar no puede seguir a una entrada parabólica. Esto ocurre incluso si no se satisface la ecuación (2.24). Impuesta la condición de que $e(t)ss = 0$ tanto para la entrada en escalón como en rampa en un sistema estable con ceros y polos, se llevan las ecuaciones (2.24) y (2.29) a la ecuación (2.27), resultando

$$E(s)=\frac{R(s)}{S^3}\;\frac{S^n+(an-1+kgkn)S^{n-1}+\ldots+(a1+kgk2)S-kg(S^w+cw-1S^{w-1}+\ldots+c2S^2)}{S^n+(an-1+kgkn)S^{n-1}+\ldots+(a2+kgk3)S^2+(a1+kgk2)S+kgc0} \qquad (2.32)$$

Nótese que s^2 es la potencia menor en el numerador. Aplicando el teorema del valor final a ésta resulta

$$e(t)ss = \lim sE(s) = \frac{a2 + KgK3 - Kgc2}{Kgco} R2 \qquad (2.33)$$

La condición para que $e(t)ss = 0$ es que $a2 + KgK3 - Kgc2 = 0$. Así

$$K3 = c2 - \frac{a2}{Kg}$$

Con este valor de K3, el término en s2 de la ecuación (2.24) sólo

Con este valor de K3, el término en s2 de la ecuación (2.24) sólo tiene positivo el coeficiente Kgc2 cuando $w \geq 2$. Así, un sistema cero-polar con dos o más ceros se puede lograr que sea estable con un error nulo en régimen permanente con una entrada parabólica.

En un sistema que tenga sólo un cero ($w = 1$) los valores $c2 = 0$ y $K3 = -a2/Kg$ producen un coeficiente cero para el término en s^2 de la ecuación característica (2.25), dando lugar a un sistema inestable. Por tanto, no puede lograrse un error nulo en régimenpermanente con entrada parabólica en un sistema con ceros y polos con realimentación de variables de estado y con sólo un cero. Si $K3 \neq -a2/Kg$ y $a2 + KgK3 > 0$ se satisfagan para mantener un coeficiente positivo en la ecuación (2.25) existirá un error finito.

El sistema puede ser estable pero con un error

$$e(t)ss = \frac{R2(a2+KgK3)}{Kgc0} \qquad (2.35)$$

La tabla 2-10 resume los requisitos para lograr un error nulo en un régimen permanente en un sistema estable con realimentación por variables de estado.

Tabla 2-2. Condiciones necesarias par un error nulo permanente+

Sistema	Número de ceros requeridos	Entrada			$G_{eq}(s)$
		Escalón	Rampa	Parábola	(Tipo)
Planta polar	w = 0	$K1=1-\frac{a0}{Kg}$	&	*	1
Planta cero-polar	w = 1	$K1=c0-\frac{a0}{Kg}$		&	2
	w ≥ 2		$K2=c1-\frac{a1}{Kg}$	$K3=c2-\frac{a2}{Kg}$	3

+ Para una representación con variables de fase.
& Existe error permanente.
* No puede seguir esta entrada.

EMPLEO DE LOS COEFICIENTES DE ERROR PERMANENTE

En el ejemplo representado por la figura 2-8 b) se han manipulado los bloques representativos de las realimentaciones con el fin de dar un bloque equivalente Heq. único, en el diagrama de la figura 2-8 e). Se puede obtener de un modo similar un bloque de Geq(equivalente) como indica la figura 2-10. Las funciones de transferencia globales para las figuras 12-4d y 12-5 son, respectivamente,

$$M(s)=\frac{Y(s)}{R(s)}=\frac{G(s)}{1+G(s)Heq(s)} \qquad (2.39)$$

$$M(s)=\frac{Y(s)}{R(s)}=\frac{G(s)}{1+Geq(s)} \qquad (2.40)$$

Despejando Geq(s) de la ecuación (2.40) resulta

$$Geq(s)=\frac{M(s)}{1-M(s)} \qquad (2.41)$$

Empleando la expresión de la razón de mando M(s) de la ecuación (2.19) en la ecuación (2.41) resulta

$$Geq(s)=\frac{-kg(S^{w}+cw-1S^{w-1}+...+c1S+c0)}{S^{n}+(an-1+kgkn)S^{n-1}+...+(a2+kgk3)S^{2}+(a1+kgk2)S+kgc0} \qquad (2.43)$$

que es una función de transferencia del tipo 0 y tiene un coeficiente de error a entrada rampa

$$Kp=\frac{kgc0}{a0+kgk1-kgk0}$$

Satisfaciendo la condición k1=c0 - a0 / kg para tener e(t)ss = 0 con una entrada en escalón, la ecuación (2.43) se reduce a

$$Geq(s)=\frac{kg(S^{w}+cw-1S^{w-1}+...+c1S+c0)}{S^{n}+(an-1+kgkn)S^{n-1}+...+(a1+kgk2)s+kgc0} \qquad (2.44)$$

Como ésta es una función de transferencia del tipo 1, el coeficiente de error al escalón es kp infinito, y el coeficiente de error a la rampa será

$$Kv = \frac{kgc0}{a1+kgk2-kgc1}$$

Cumpliendo las condiciones para que e(t)ss = 0 para las entradas en escalón y en rampa, dadas par las ecuaciones (2.24) y (2.29), la ecuación (2.44) se reduce a

$$Geq(s) = \frac{kg(S^{w}+cw-1S^{w-1}+...+c1S+c0)}{S^{n}+(an-1+kgkn)S^{n-1}+...+(a2+kgk3)S^{2}-kg(S^{w}+...+c2S^{2})} \qquad (2.45)$$

Como ésta es una función de transferencia del tipo 2, existe un error en régimen permanente para entrada en rampa. De aquí que se siga a una entrada parabólica con un error permanente. Los coeficientes de error son:

$$Kp = \infty \qquad Ka = \frac{kgc0}{a2+kgk3-kgc2} \qquad Kv = \infty$$

En el caso de que w mayor o igual que 2, y se cumplan las condiciones para que e(t)ss = 0 para las tres entradas normalizadas dadas por las ecuaciones (2.24), (2.29) y (2.34), la ecuación (2.45) se reduce a

$$Geq(s) = \frac{kg(S^{w}+cw-1S^{w-1}+...+c1S+c0)}{S^{n}+(an-1+kgkn)S^{n-1}+...+(a3+kgk4)S^{3}-kg(S^{w}+...+c3S^{3})} \qquad (2.46)$$

Esta es una función de transferencia del tipo 3 que tiene un error nulo en régimen permanente para una entrada parabólica. Los coeficientes de error son $K_p = K_v = K_a = \infty$. Estos resultados se reunen en la tabla 2-3.

Tal como se indica en las tablas 2-3 y 2-2, las especificaciones del tipo de entrada que el sistema debe poder seguir, determinan el número de ceros que deben incluirse en $Y(s)/R(s)$. El número de ceros determina la facultad del sistema para seguir una entrada particular sin error permanente, y ser además estable.

Con una realimentación por variables de estado puede lograrse cualquier tipo de sistema deseado para $G_{eq}(s)$, con dependencia del tipo representado por $G(s)$. El requisito o condición para tener un sistema del tipo m, para $m > 0$, es que

$$a_{i-1} + k_g k_i - k_g c_{i-1} = 0 \quad \text{para todo} \quad i = 1, 2, 3, \ldots, m$$

Asi, un sistema cuya planta no es del tipo m, puede transformarse efectivamente en uno del tipo m mediante la realimentación por variables de estado. Esto se logra sin añadir integradores puros en cascada con la planta. Para hacer que un sistema sea del tipo m es necesario, como indica la tabla 12-2, que la razón de mando tenga un mínimo de m-1 ceros.

Tabla 2-3 Coeficientes de error permanente*

Sistema con realimentación por variables de estado	Numero de ceros requeridos	Kp	Kv	Ka
Planta polar	w = 0	∞	$\frac{kgc0}{a1+kgk2-kgc1}$	0
Planta	w = 1	∞	∞	$\frac{kgc0}{a2+kgk3-kgc2}$
	w 2			∞

* Para una representación con variables de fase.

Las cosntantes de error, Kp, Kv y Ka de un sistema de control, describen la capacidad del sistema para reducir o eliminar el error en estado estacionario. Por tanto se utilizan como medidas numéricas del funcionamiento en el estado estacionario. Se deben determinar las constantes de error para un sistema dado y determinar mètodos que las incrementen, manteniendo la respuesta transitoria aceptable.

2.13 ESTABILIDAD RELATIVA

2.14 MARGEN DE FASE

El màrgen de fase (MF) representa la cantidad de retardo de fase adicional necesaria a la frecuencia de cruce o de transición de ganancia para que el sistema quede al borde de la inestabilidad. La frecuencia de cruce de ganancia es aquella frecuencia para la cual el valor absoluto | GH(jw)| de la función

de transferencia de lazo abierto, es la unidad. El márgen es 180 grados más el ángulo de fase de la función de transferencia de lazo abierto.

Para que un sistema de fase mínima sea estable el márgen de fase debe ser positivo. Las figuras 2-29 muestran el márgen de fase tanto para sistema estable como para uno inestable en diagramas de Bode.

MARGEN DE GANANCIA

El márgen de ganancia es la reciproca de | GH(jw); a la frecuencia a la cual el ángulo de fase es -180 grados. Definiendose la frecuencia de cruce o de transición de fase w1 como la frecuencia a la cual el ángulo de fase de la función de transferencia de lazo abierto es igual a -180 grados, da el márgen de ganancia:

$$M.G = \frac{1}{GHjw1)|} \qquad (2.47)$$

El márgen de fase expresado en decibeles es positivo si M.G es mayor que la unidad y negativo si es menor que la unidad. Por tanto un márgen de ganancia positivo significa que el sistema es estable y si es negativo es inestable.

Para un sistema de fase mínima, tanto los márgenes de fase como los de ganancia, han de ser positivos para que el sistema sea estable.

Para lograr un funcionamiento satisfactorio, el márgen de fase debe estar entre 30 y 60 grados y el márgen de ganancia debe ser superior a los seis decibeles.

En la figura 2-29 b) se muestra el márgen de ganancia para

un sistema estable y uno inestable.

MAXIMO DE RESONANCIA

El valor del máximo de resonancia Mp, es indicativo de la estabilidad relativa. Generalmente se obtiene una buena respuesta transitoria si el valor de Mp estáen el rango de 0 dB <Mp <3dB, que corresponden a una relación de amortiguamiento efectiva de $0,4 < \xi < 0,7$. Para valores mayores de Mp mayores que 1,5 en la respuesta transitoria a una entrada escalón puede presentarse diversos sobreimpulsos. En general un valor elevado del máximo de resonancia Mp, corresponde a un sobreimpulso elevado en la respuesta escalón transitoria.

SENSIBILIDAD

Las caracteristicas del comportamiento de la mayoria de los componentes quedan afectadas por su ambiente y por envejecimiento asi cualquier cambio en las caracteristicas de los componentes produce un cambio en la función transferencia y por tanto en la cantidad controloda. El efecto producido por el cambio en un parámetro puede expresarse con una funcion sensibilidad. Esta funcio de sensibilidad S_p^M es una medida de la sensibilidad de la respuesta del sistema a una variación de un parámetro y estádada por consiguiente

$$S_p^M \Big|_{\substack{M=M_0 \\ P=P_0}} = \frac{dM/M_0}{dP/P_0}$$

en donde Mo y po representan los valores nominales de M y de p. Cuando M es una función de más de un parámetro, por ejemplo, p1, p2,...,pk, las fórmulas correspondientes de la sensibilidad contiene derivadas parciales.

Aplicando la ecuación de la sensibilidad a cada uno de los casos, en los que M(s) = C(s), y P = G(s) P = H(s), resulta la Tabla 6.5. Para un aumento de la función variable, un valor positivo de la función sensibilidad significa que la salida aumenta sobre su respuesta nominal. De un modo similar, un valor negativo de la función sensibilidad significa que la salida disminuye de su valor nominal. Hay que tener en cuenta que los resultados presentados en la abla se basan en un análisis funcional, es decir, las "variaciones" consideradas son G(s) y H(s).

Sea el caso siguiente cuando r(t) es sinusoidal. Entonces la entrada puede ser representada por el fasor R(jw) y la salida por el fasor C(jw). El sistema esta ahora representado por la funciones transferencia espectrales G(jw) y H(jw).Cuando los parámetros varien dentro de G(jw) y H(jw), la magnitud de la función sensibilidad puede dibujarse en función de la frecuencia y no tiene los límites de 0 a 1 sino que varía desde 0 a cualquier gran magnitud.

Tabla 6.5 Funciones de sensibilidad

Caso	Parámetro del sistema variable	S_b^m
1	G(jw)	$\frac{dCc/dCc}{dG/G} = \frac{1}{1 + GH}$
2	H(jw)	$\frac{dCc/dCc}{dH/H} = \frac{GH}{1 + GH}$

CAPITULO III

3.1 PLANTEAMIENTOS GENERALES

Se ha creado el programa principal llamado ANREES (ANálisi de REalimentación de Estados) que contiene todas las subrutinas que se necesitan para realizar los cálculos de los parámetros de análisis, excepto la subrutina de los gráficos, que ha sido tomado del programa de aplicación "SYMPHONY", y utilizada por el programa principal cuando se lo requiere.

Por la implementación del programa principal en forma estructurada y con subrutinas encargadas de problemas especificos, se facilita la comprensión de la lógica utilizada. Subrutinas que al ser integradas cumplen con el objetivo final de análisis.

A continuación se tiene la distribución del "Menú Principal" que permiten visualizar las diferentes alternativas que se dispone para el análisis de un sistema realimentado por sus variables de estado en el dominio de la frecuencia real.

*** MENU PRINCIPAL ***

1. Ingreso de Datos
2. Cambio de Datos
3. Visualización de Datos Actuales
4. Análisis de Respuesta de Frecuencia
5. Gráficos
6. Salir Temporalmente al sistema
7. Salir al Sistema
8. Imprimir resultados

Los diferentes "submenus" o ramificaciones que tienen cada uno de estos puntos se mencionan más adelante cuando se habla particularmente de cada uno de ellos.

3.2 DESCRIPCION DE SUBRUTINAS VARIABLES Y DIAGRAMAS DE FLUJO

3.2.1 INGRESO DE DATOS

Esta subrutina demanda los datos necesarios para los cálculos de análisis y de los gráficos correspondientes.

Los datos generales necesarios para todos los cálculos son:

La ganancia (Kg) de la función de transferencia directa G(jw) almacenado en (KG).

Los coeficientes del numerador de la función de transferencia directa que se almacenan en forma descendente en el vector (C) de dimensión, (N%) los del denominador en el vector (A) de dimensión (D%).

El numerador de la función equivalente Heq (jw), siendo el grado del numerador de la función de realimentación equivalente (NH%), sin ser necesario especificar el grado y coeficientes del denominador.

Los coeficientes del numerador se encuentran definidos en el vector KE de dimensión (NH%).

El vector de realimentación tendrá el mismo grado que el numerador de la función de realimentación y sus coeficientes, se encuentran definidos en el vector K de dimensión (NH%).

Se pide además en este programa la introducción del rango de frecuencia, dentro del cual se realicen todos los cálculos, sugiriéndose un rango de 0.1 rad/seg. a 20 rad/seg que en la mayoría de sitemas de control reales este rango es bastante apropiado para los propósitos pertinentes.

El programa está diseñado con la utilización de leyendas que permiten una fácil comprensión por parte del usuario.

3.2.2 CAMBIO DE DATOS

Esta subrutina permite cambiar el valor previo de los cuatro parámetros posibles a ser variados, que son los mostrados en el menú de cambio de datos cuya presentación en pantalla está dado por:

*** MENU DE DATOS ***

1. El VECTOR de realimentación
2. GANANCIA de Función Directa
3. Función DIRECTA
4. RANGO de Frecuencia
5. RETORNO a Menú Principal

En caso de querer cambiar los datos sin antes haberlos ingresado, da un mensaje que indica que no es posible cambiar los datos sin haberlos ingresado previamente a través de la subrutina u opción de ingreso de datos.

3.2.3 VISUALIZACION DE DATOS

Debido a los requerimientos del programa, es necesario que el operador esté al tanto de los datos con el que se están realizando los cálculos, por lo cual se ha creado la subrutina de visualización de datos que permite cumplir con este objetivo.

3.2.4 SUBRUTINA PARA LA EVALUACION DE LA FUNCION DE TRANSFERENCIA

Uno de los cálculos más frecuentemente usados por las diferentes subrutinas es la evaluación de la función de transferencia.

Evaluar la función de transferencia significa evaluar los polinomios numerador y denominador, aplicando el método de Horner y reducir de esta forma a numerador y denominador a un número complejo (a-jb), para luego pasar a la forma polar (r) para realizar la división de sus módulos y la resta de sus ángulos. Obteniéndose asi el módulo y la fase de la función de transferencia.

VARIABLES Y DIAGRAMA DE FLUJO PARA EVALUAR NUMERADOR Y DENOMINADOR DE LA FUNCION DE TRANSFERENCIA

RE .- Vector de dimensión dos, que contiene la parte real tanto del numerador RE (Ø) como del denominador RE(1) al evaluar una función de transferencia.

IM .- Vector de dimensión dos, que contiene la parte imaginaria del numerador IM(Ø) y del denominador IM(1).

AUX% .- Variable temporal.

NH% .- Variable que almacena el grado del polinomio numerador .

C .- Vector que contiene los coeficientes del polinomio numerador de dimensión N %.

D% .- Variable en donde se almacena el grado de polinomio del denominador.

A .- Vector de dimensión D% , que contiene los coeficientes del polinomio denominador.

W .- Frecuencia a la cual se evalúa la función.

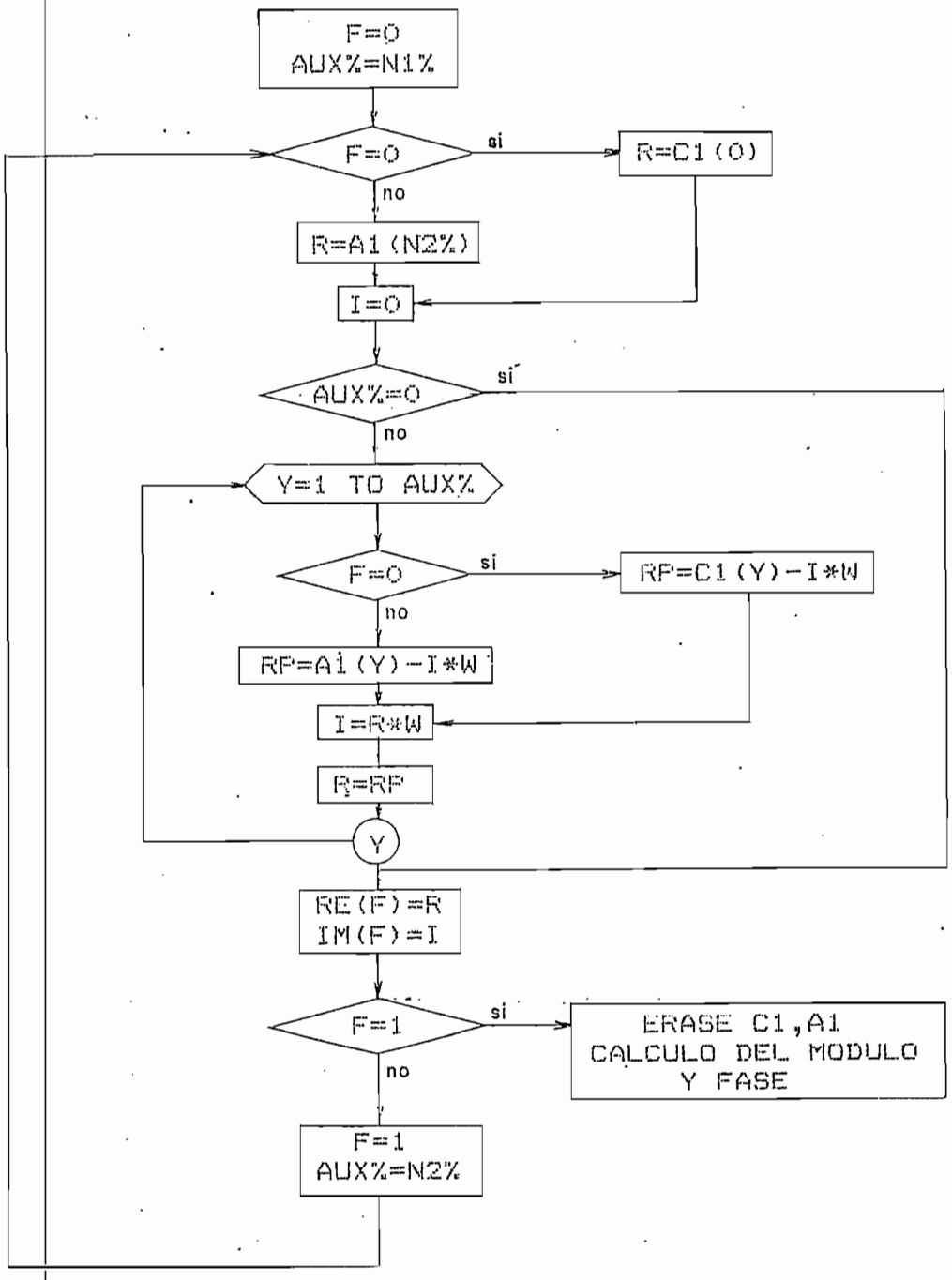
F .- Indicador de evaluación del numerador (F=Ø) y del denomina-

dor (F=1).

RP .- Variable que almacena el valor de la parte real.

R, I .- Variables que mantienen el valor actualizado de la parte (R) y de la parte imaginaria (I).

*** EVALUACION DEL POLINOMIO NUMERADOR Y DENOMINADOR ***



VARIABLES Y DIAGRAMA DE FLUJO PARA CALCULAR EL MODULO Y LA FASE DE LA FUNCION DE TRANSFERENCIA A CIERTA FRECUENCIA W.

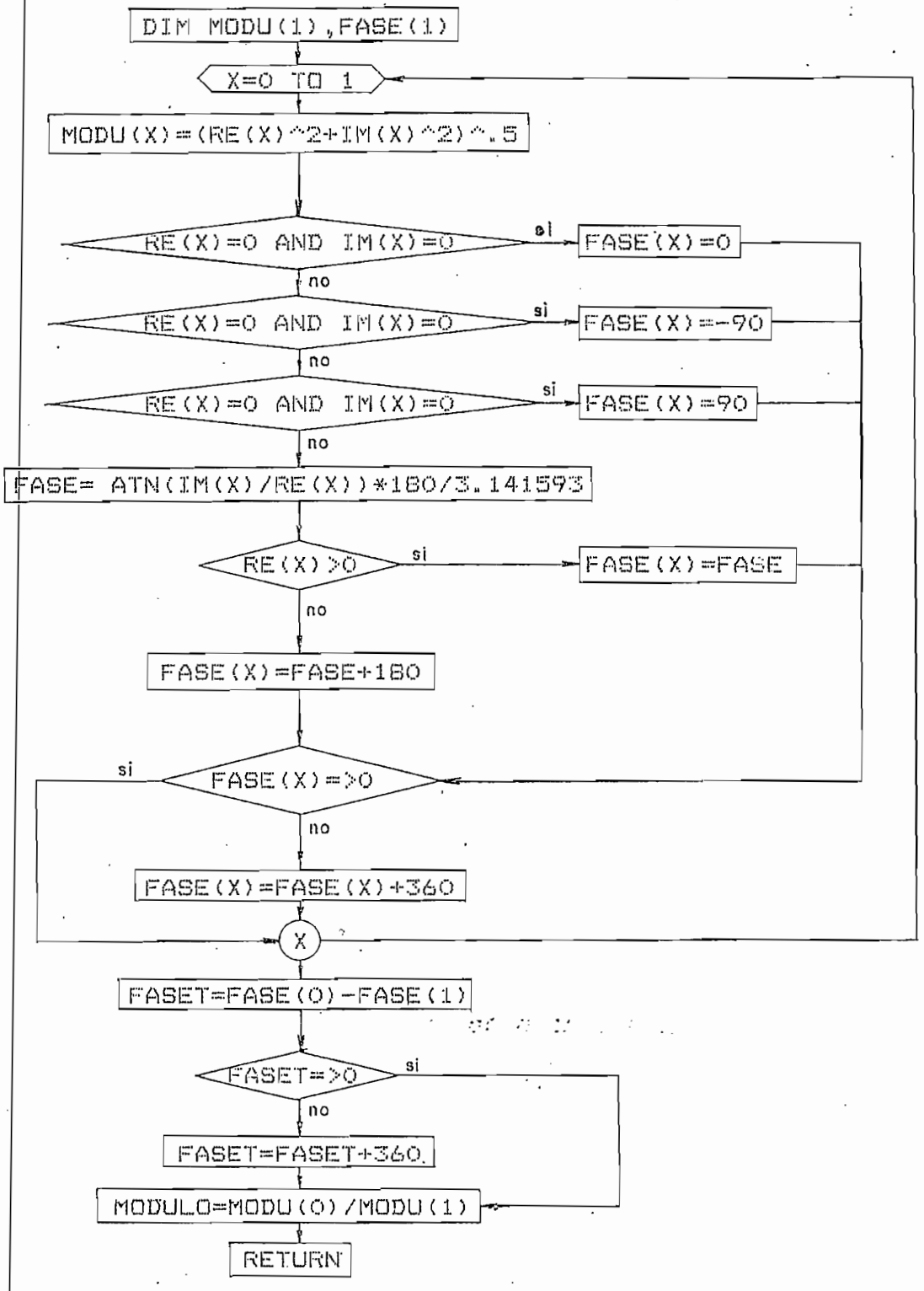
MOD .- Vector de dos elementos que contiene los módulos tanto del numerador MOD (Ø), como del denominador MOD (1).

FASE .- Vector de dimensión dos que almacena la fase del numerador FASE (Ø) y denominador FASE (1) de la función evaluada.

MODULO .- Módulo de la función de transferencia evaluada a la frecuencia W.

FASE .- Fase de la función de transferencia a la frecuencia W.

*** CALCULO DEL MODULO Y FASE DE UNA FUNCION ***



SUBRUTINA PARA EVALUAR LA FUNCION DE LAZO ABIERTO

En base al desarrollo teórico se ha realizado tomando el numerador de la función de realimentación equivalente el cual pasa a ser el numerador de la función de lazo abierto y el denominador de la función de lazo abierto. De esta forma conformada la función de lazo abierto, se procede a realizar su evaluación

VARIABLES Y DIACRAMA DEL FLUJO DE LA SUBRUTINA DE EVALUACION DE LAZO ABIERTO

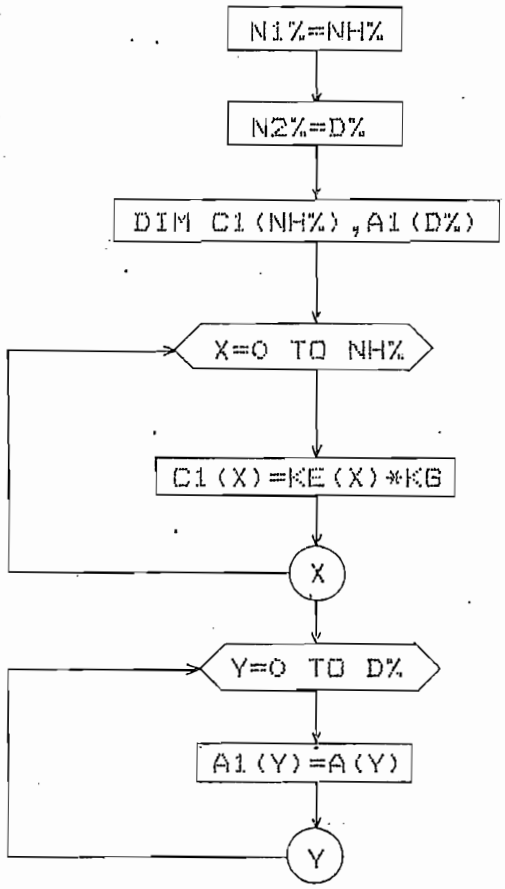
N1% .- Variable auxiliar a ser utilizada en la evaluación del polinomio.

N2% .- Variable auxiliar a ser utilizada en la evaluación del polinomio.

C1 .- Vector auxiliar que contiene los coeficientes del numerador de la función de realimentación equivalente.

A1 .- Vector auxiliar que contiene los coeficientes del denominador de la función directa.

*** SUBRUTINA PARA EL CALCULO DE LA FUNCION DE LAZO ABIERTO ***



3.2.5 SUBRUTINA PARA EVALUAR LA FUNCION DE TRANSFERENCIA CON REALIMENTACION DE ESTADOS

La lógica seguida para evaluar la función de lazo cerrado es la siguiente:

Siendo:

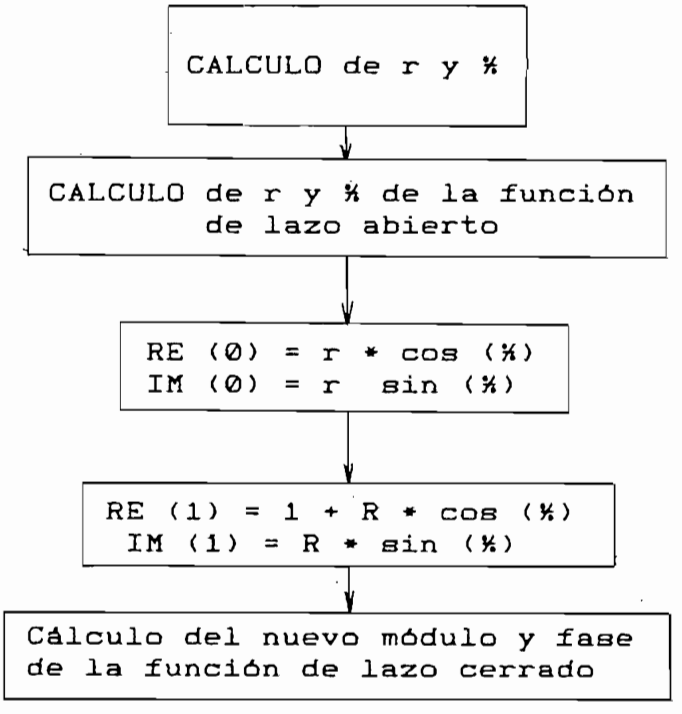
r el módulo de función directa G(jw)

% la fase de la función directa G(jw)

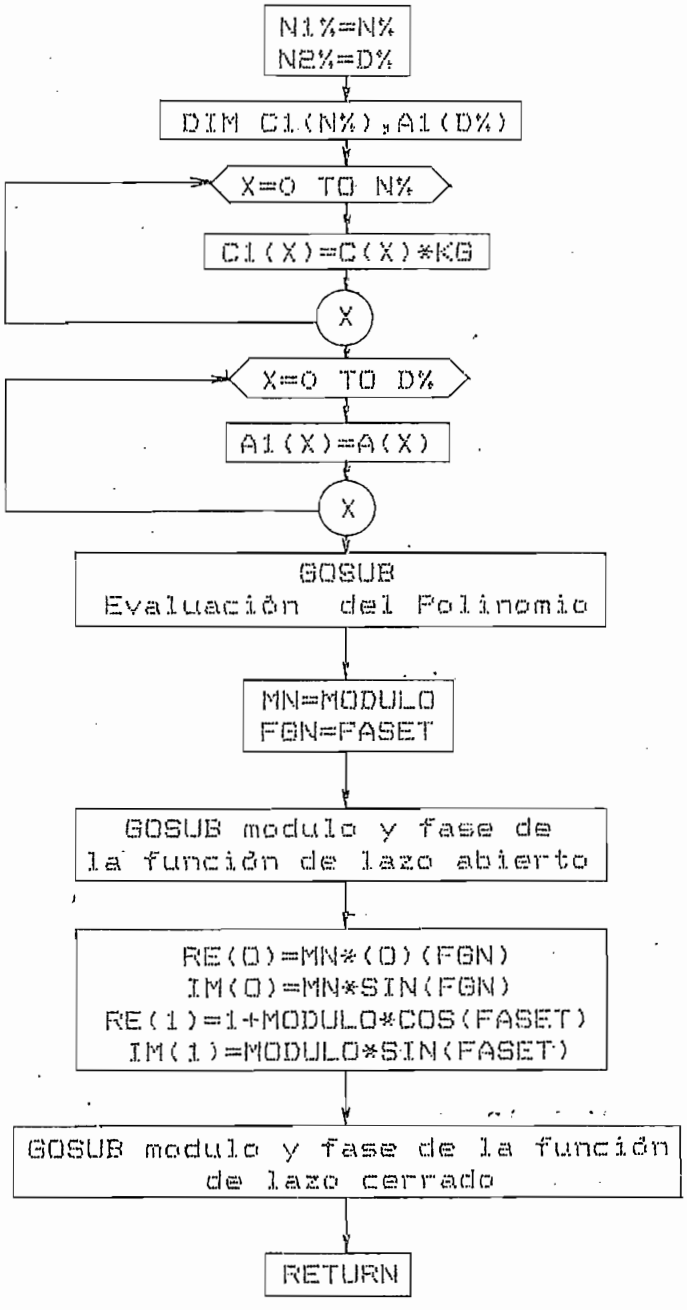
R el módulo la función de lazo abierto

6 la fase de la función de lazo abierto

Se procede de la siguiente manera:



*** SUBRUTINA PARA EL CALCULO DE LA FUNCION CON *** REALIMENTACION DE ESTADOS



3.2.8 MARGEN DE GANANCIA Y FASE

Para encontrar el margen de fase y ganancia de una función de transferencia de lazo abierto utilizaremos el método iterativo que se describe a continuación:

Dada una frecuencia inicial WO, calculamos su función. Si esta corresponde a MODULO<=PRES en el caso del margen de ganancia, hemos resuelto nuestro problema. Si no es así, incrementamos la variable WO en el valor INCW. Buscamos la función en el nuevo punto, si es el valor deseado se terminan los cálculos, de lo contrario incrementamos la variable W hasta conseguir un cambio de signo en la función anterior disminuimos INCW y repetimos el ciclo.

En el parámetro PRES se deja la opción de ingresar su valor a criterio del operador, recomendándose 0.5 escojido con criterio práctico, ya que en estos cálculos más que exactitud se requiere situarlos dentro de un determinado rango.

En el caso del cálculo del margen de ganancia hay que realizar una serie de chequeos. Si el grado del denominador es igual o menor al grado del numerador más dos; entonces el margen de ganancias es infinito. De no ser así se podria dar el caso que para cualquier valor de la frecuencia, siempre se tenga una fase constante; se habló entonces de un margen de ganancia indefinido. Para el resto de posibilidades se puede realizar los cálculos respectivos.

VARIABLES Y DIAGRAMA DE FLUJO PARA EL CALCULO DEL MARGEN DE GANANCIA

WO .- Variable que contiene la frecuencia inicial.

WF .- Variable que almacena la frecuencia final.

INCW .- Variable con el incremento de frecuencia.

D% .- Grado del denominador de la función de transferencia de lazo abierto.

NH% .- Grado del numerador de la función de transferencia de lazo abierto.

MG .- Margen de ganancia.

C1 .- Vector de dimensión (N%) cuyos elementos son los coeficientes del polinomio numerador de la función de transferencia de lazo abierto.

A1 .- Vector de dimensión (D%) que almacena los coeficientes del denominador de la función de lazo abierto.

MG$.- Margen de ganancia cuando esta es indefinida o infinito

MF .- Margen de fase

MF$.- Margen de fase cuando esta es indefinida.

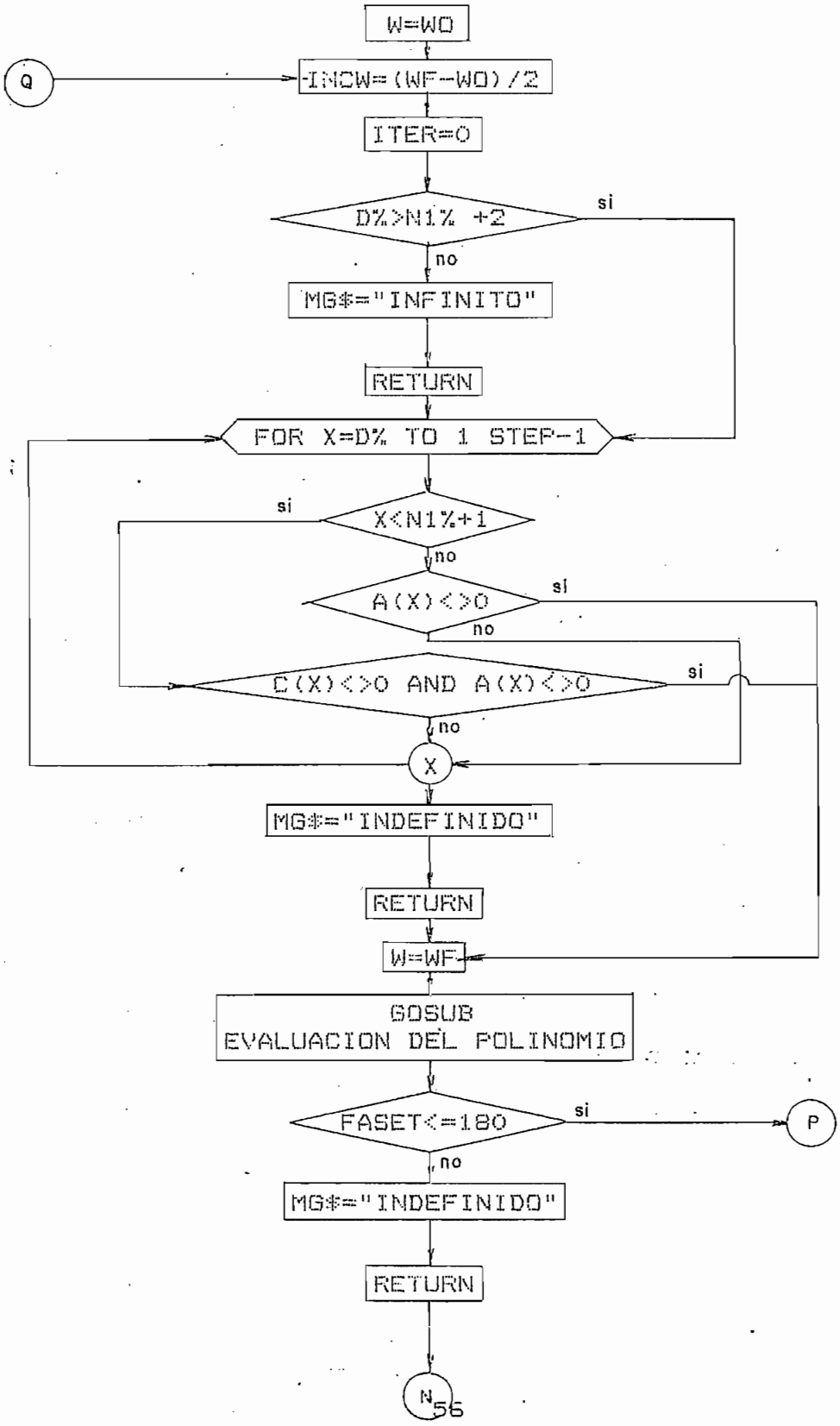
ITER.- Contador del número de iteraciones.

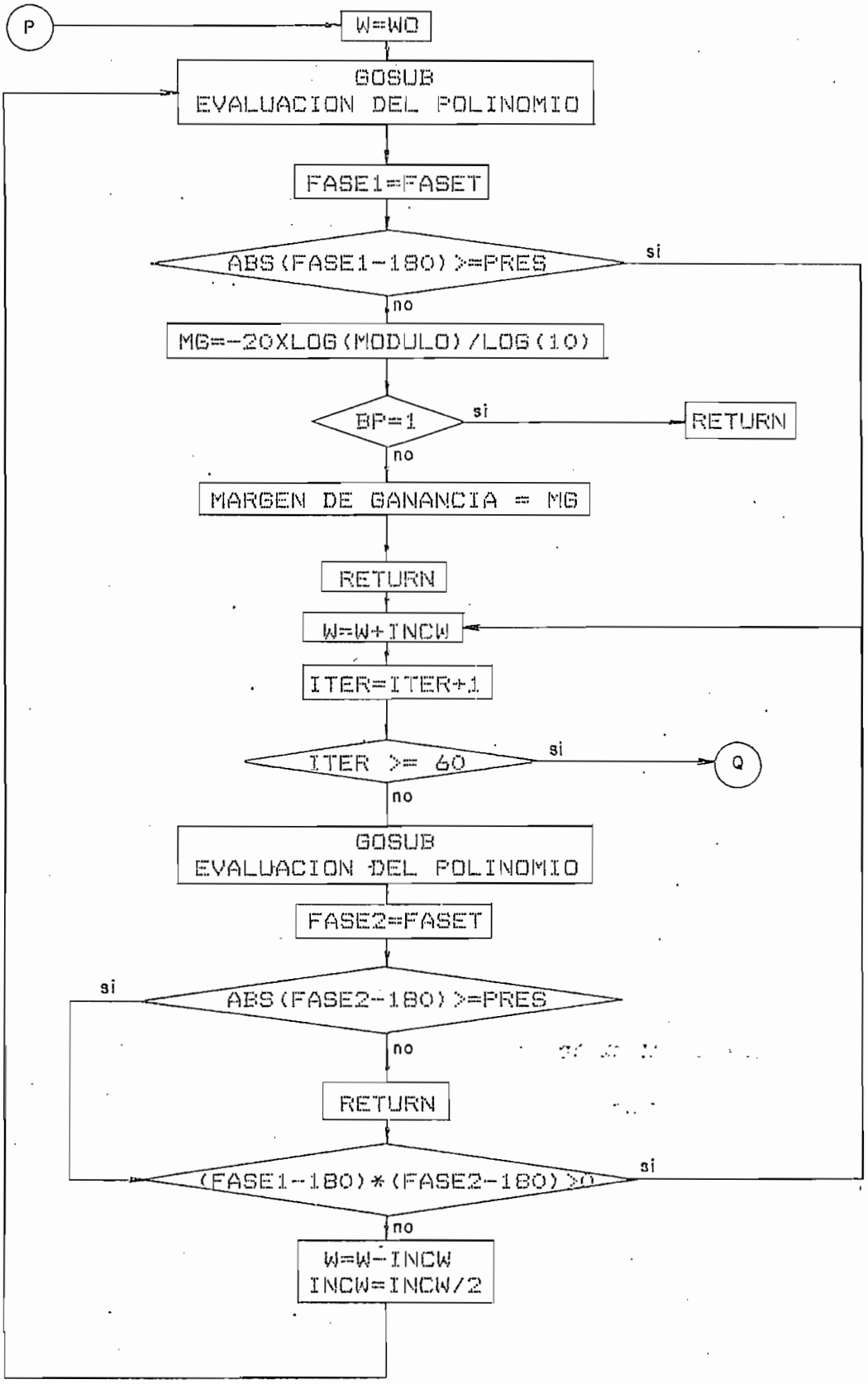
FASE1 Y FASE2 .- Variable de referencia para comprar si se ha alcanzado al valor 180°.

PRES.- Variable que indica el valor de precisión.

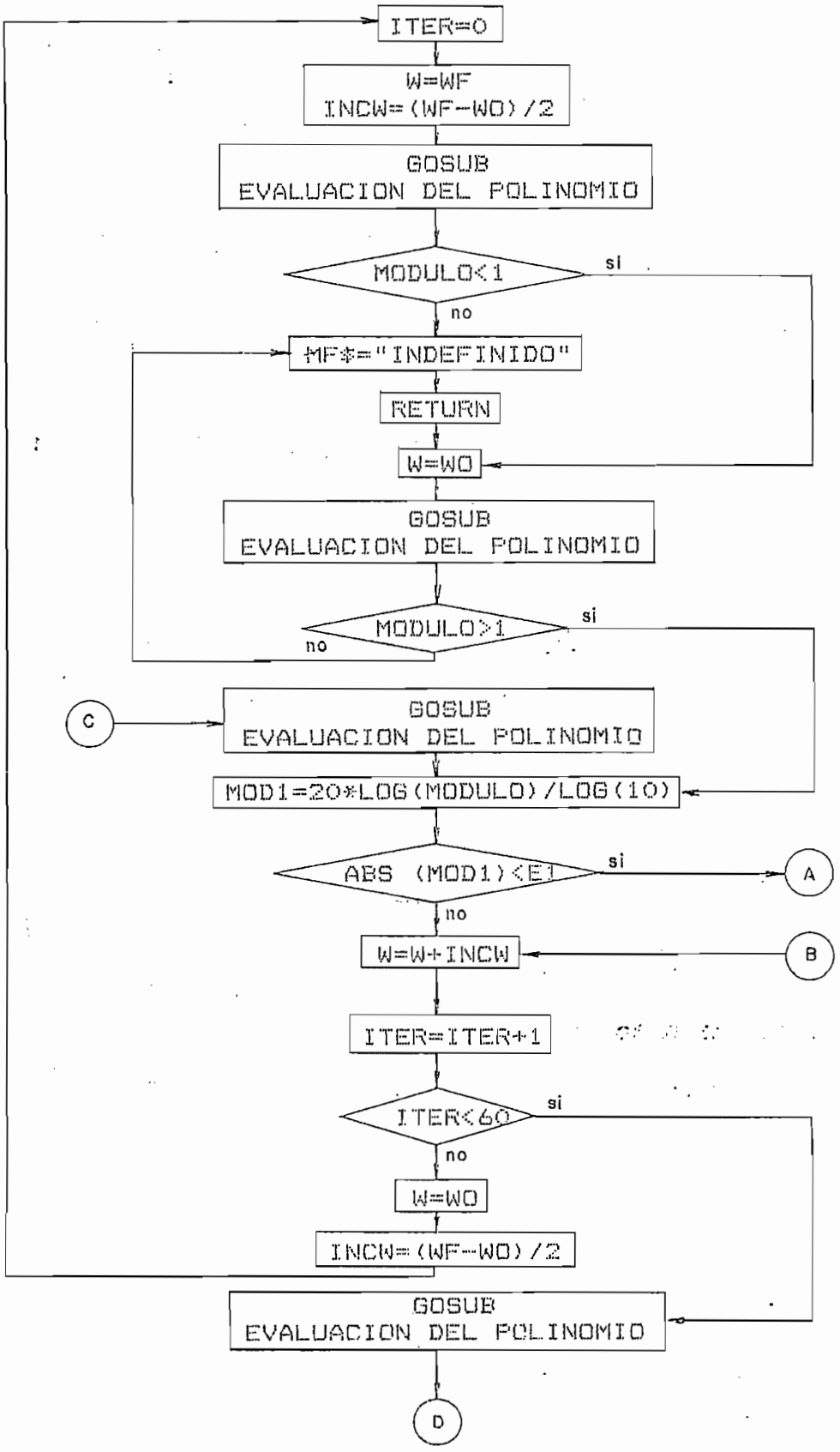
En la subrutina de cálculo de margen de fase, se utilizan los mismos parámetros y variables anteriormente descritas para el cálculo de margen de ganancia, excepto las variables MOD1 y MOD2 que representan las referencias para comparar si se ha alcanzado al valor de cero decibeles.

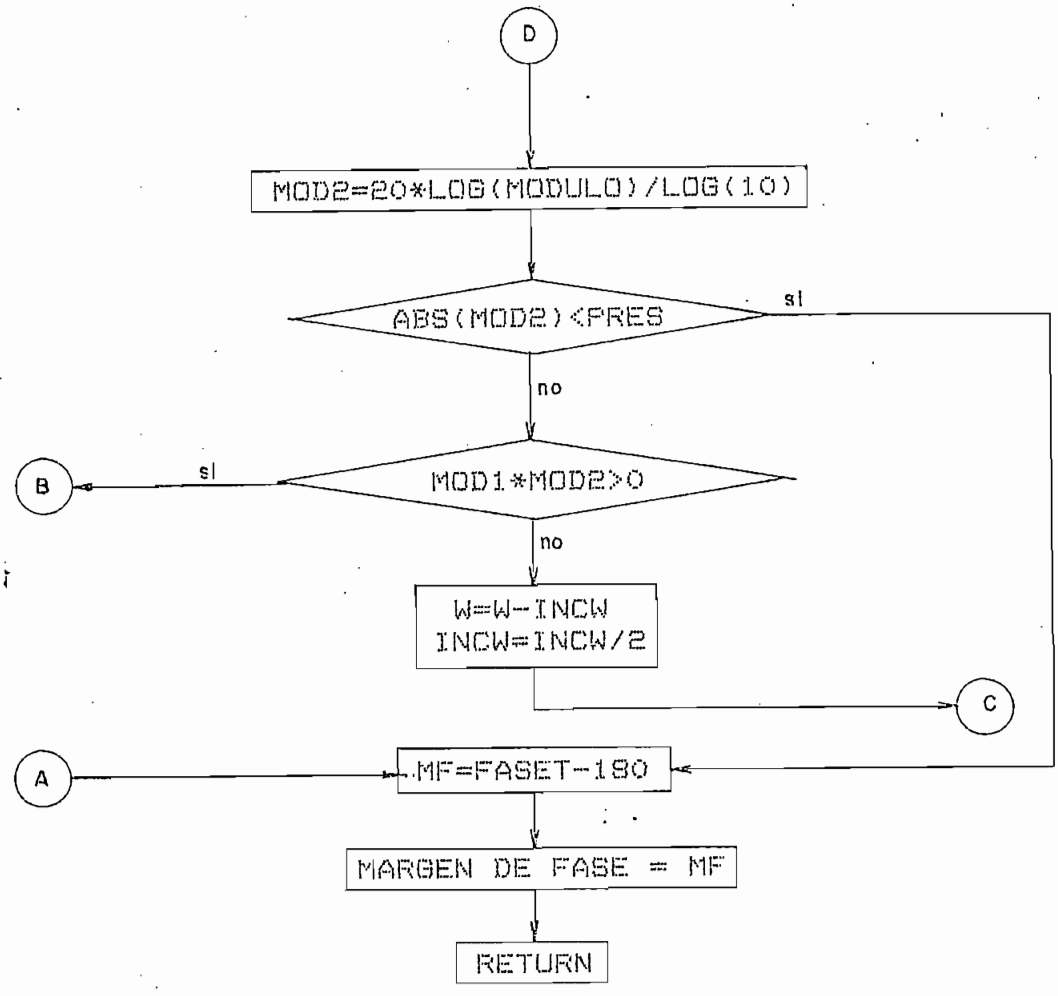
*** CALCULO DEL MARGEN DE GANANCIA ***




P
W=WO
GOSUB
EVALUACION DEL POLINOMIO
FASE1=FASET
ABS(FASE1-180)>=PRES
si
no
MG=-20XLOG(MODULO)/LOG(10)
BP=1
si
RETURN
no
MARGEN DE GANANCIA = MG
RETURN
W=W+INCW
ITER=ITER+1
ITER >= 60
si
Q
no
GOSUB
EVALUACION DEL POLINOMIO
FASE2=FASET
si
ABS(FASE2-180)>=PRES
no
RETURN
(FASE1-180)*(FASE2-180)>0
si
no
W=W-INCW
INCW=INCW/2

*** SUBRUTINA PARA EL CALCULO DEL MARGEN DE FASE ***




D
MOD2=20*LOG(MODULO)/LOG(10)
ABS(MOD2)<PRES
sI
no
B
sI
MOD1*MOD2>0
no
W=W-INCW
INCW=INCW/2
C
A
MF=FASET-180
MARGEN DE FASE = MF
RETURN

3.2.9 MAXIMO DE RESONANCIA

Dado el valor con el cual se incrementa la frecuencia WO hasta alcanzar a WF, es decir cubrir todo el rango de frecuencia establecido, se calcula la máxima magnitud de la función de lazo cerrado a la cual se le denomina máximo de resonancia, asi como a la frecuencia correspondiente a este máximo, se le denomina frecuencia de resonancia.

VARIABLES Y DIAGRAMA DE FLUJO PARA EL CALCULO DEL MAXIMO DE RESONANCIA Y LA FRECUENCIA DE RESONANCIA

INCW .- Factor de multiplicación de frecuencia (incremento).

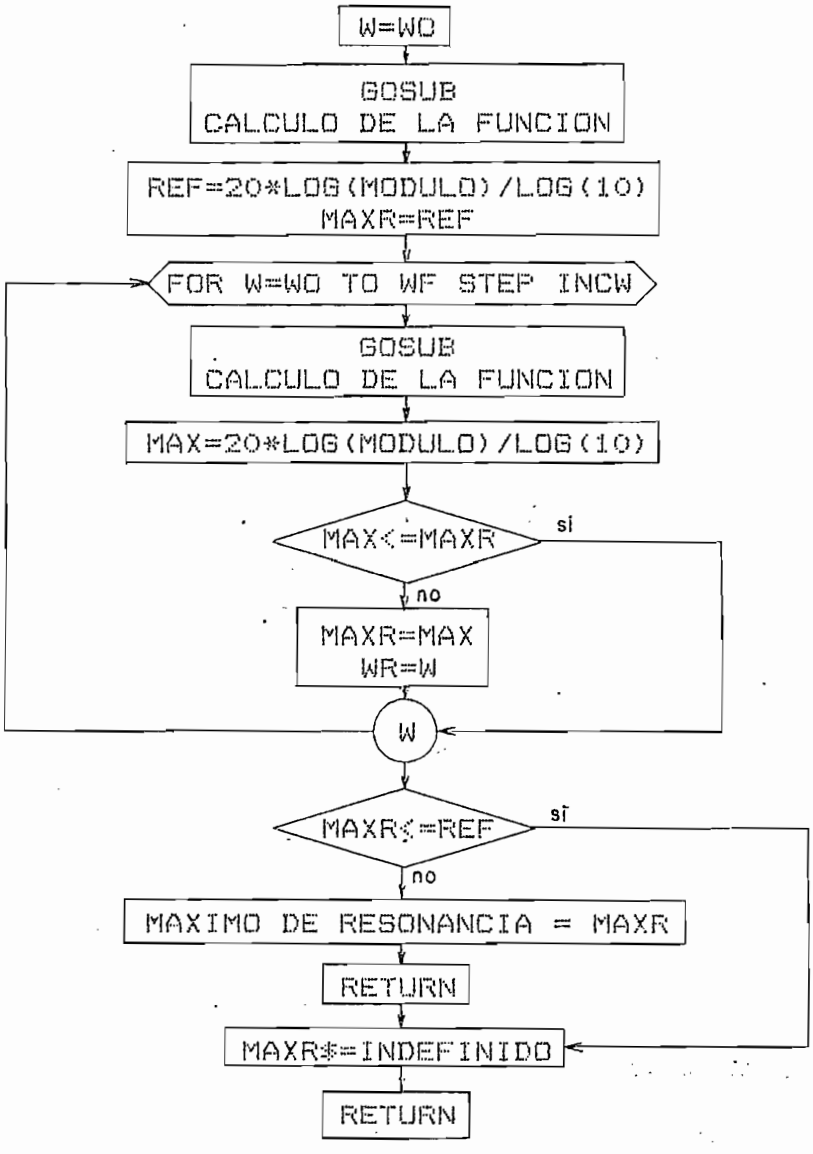
MAXR .- Máximo de resonancia.

PART .- Número de puntos, para dividir el rango de frecuencia.

MAX .- Variable temporal.

REF .- Variable de referencia para la existencia del máximo de resonancia.

*** SUBRUTINA PARA EL CALCULO DEL MAXIMO DE RESONANCIA ***



3.2.10 VELOCIDAD DE RESPUESTA

Para el cálculo de las especificaciones de velocidad de respuesta, se han desarrollado dos subrutinas, una para el cálculo de ancho de banda y otra para la frecuencia de resonancia, siendo estas las opciones del menú de velocidad cuya presentación en pantalla es:

*** VELOCIDAD DE RESPUESTA ***

1. Frecuencia de Resonancia
2. Ancho de Banda
3. Todo lo anterior
4. Regreso al Menú de Análisis

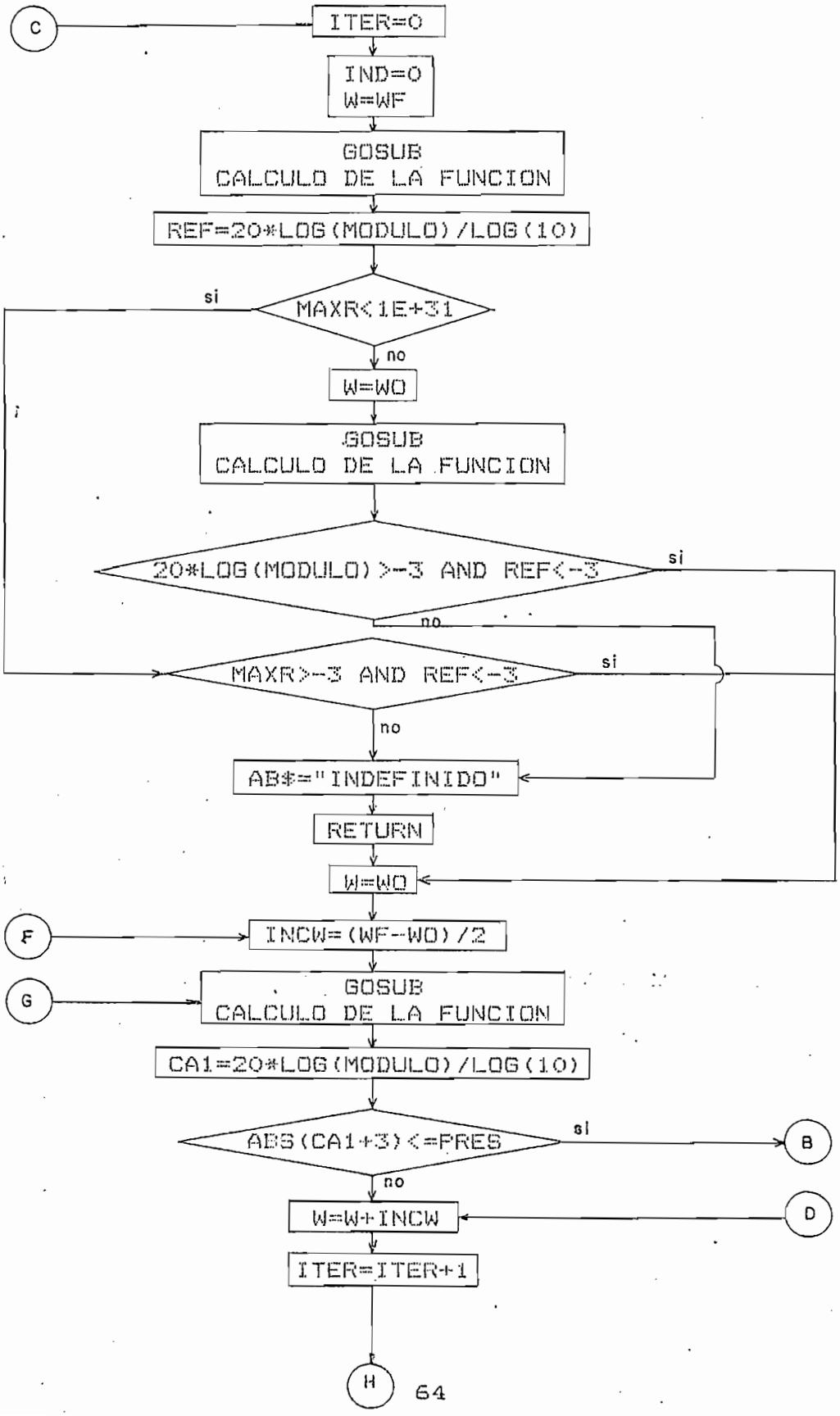
3.2.11 FRECUENCIA DE RESONANCIA

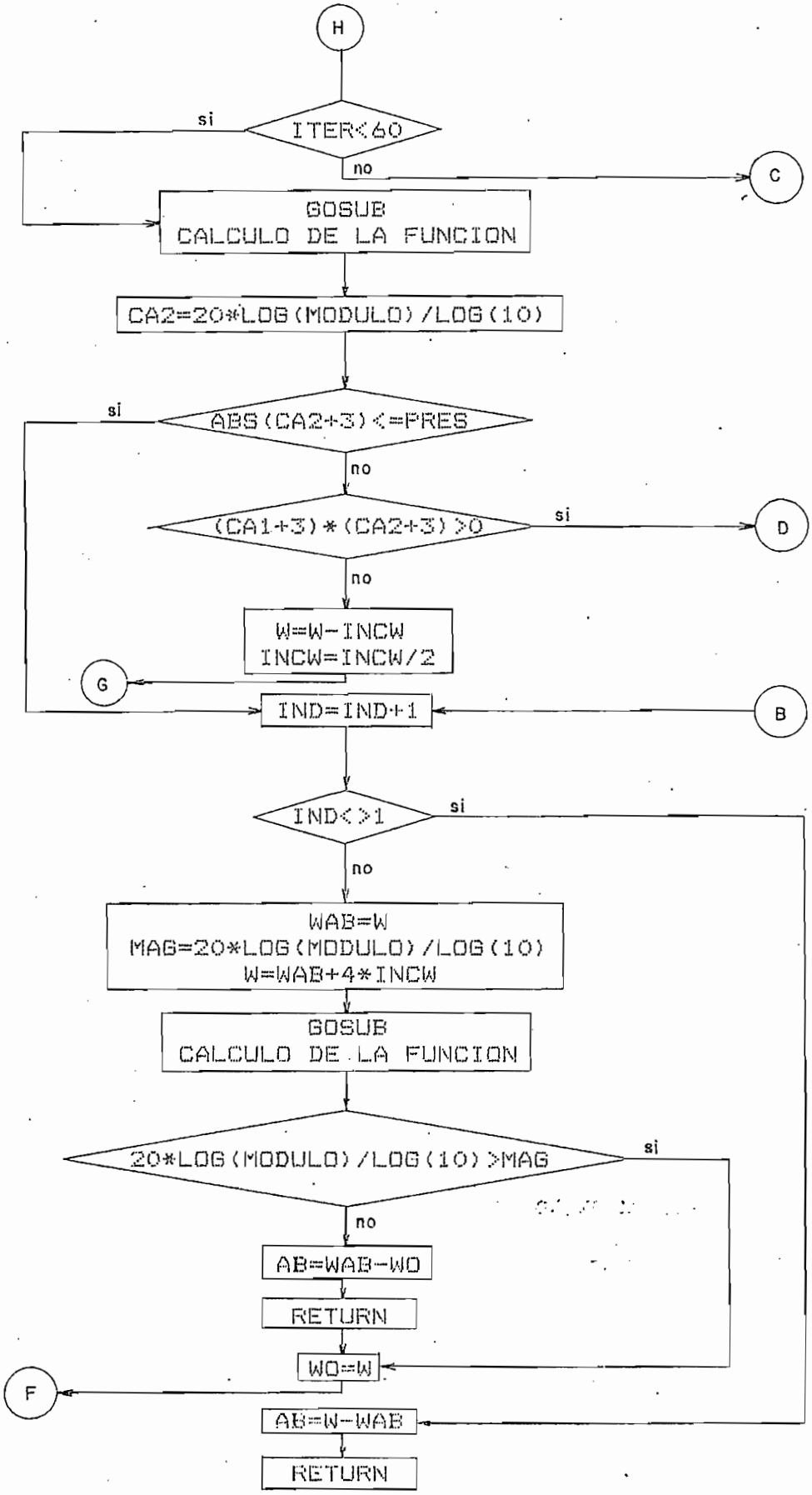
El cálculo de la frecuencia de resonancia se realiza junto al máximo de resonancia, ya que como se indicó anteriormente el máximo de resonancia, se define justamente a dicha frecuencia en la función de transferencia de lazo cerrado.

3.2.12 ANCHO DE BANDA

Existirá un ancho de banda de la respuesta de frecuencia, solamente cuando la función dentro del rango de frecuencia seleccionado, sea mayor que -3 decibelios. En el diagrama de

*** SUBRUTINA PARA EL CALCULO DEL ANCHO DE BANDA (AB) ***




H
ITER<60
si
no
C
GOSUB
CALCULO DE LA FUNCION
CA2=20*LOG(MODULO)/LOG(10)
ABS(CA2+3)<=PRES
si
no
(CA1+3)*(CA2+3)>0
si
D
no
W=W-INCW
INCW=INCW/2
G
IND=IND+1
B
IND<>1
si
no
WAB=W
MAG=20*LOG(MODULO)/LOG(10)
W=WAB+4*INCW
GOSUB
CALCULO DE LA FUNCION
20*LOG(MODULO)/LOG(10)>MAG
si
no
AB=WAB-WO
RETURN
WO=W
F
AB=W-WAB
RETURN

3.2.13 EXACTITUD

En base al análisis realizado en el capitulo segundo del error para los sistemas realimentados por variables de estado se han creado tres subrutinas que toman en cuenta las consideraciones hechas en el desarrollo teórico siendo su menú de presentación en pantalla:

*** EXACTITUD DE RESPUESTA ***

1. Error de Posición
2. Error de Velocidad
3. Error de Aceleración
4. Todo lo anterior
5. Regreso al Menú de Análisis

DESCRIPCION DE VARIABLES Y DIAGRAMAS DE FLUJO PARA EL CALCULO DE ERROR

EP.- Variable de error de posición

EV.- Variable de error de velocidad

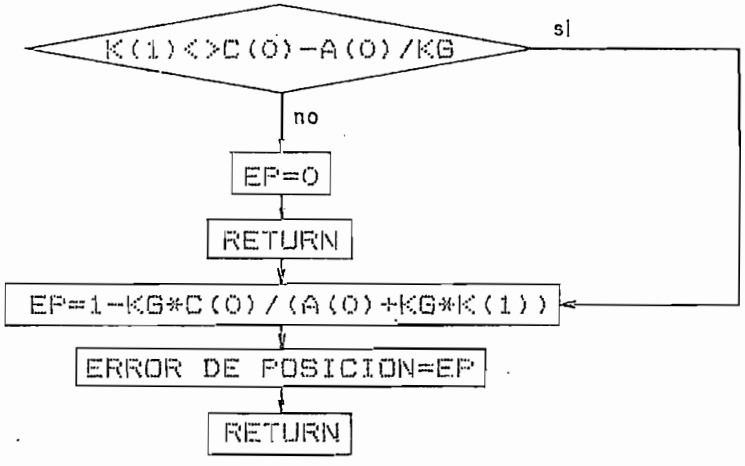
EV$.- Variable de error de velocidad cuando este es infinito

EA.- Variable de error de aceleración

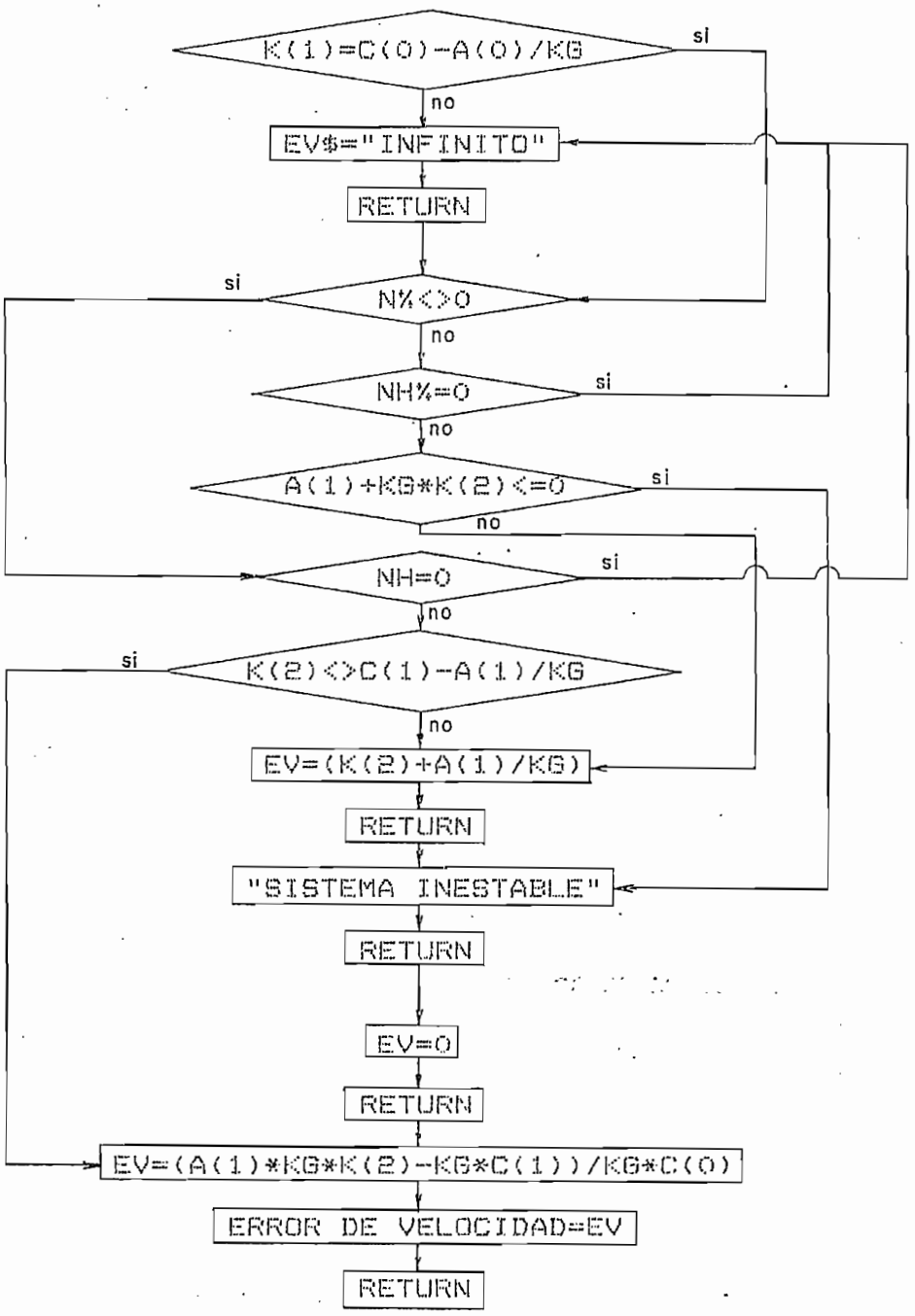
EA$.- Variable de error de aceleración cuando este es infinito

*** SUBRUTINA DEL CALCULO DE ERRORES ***

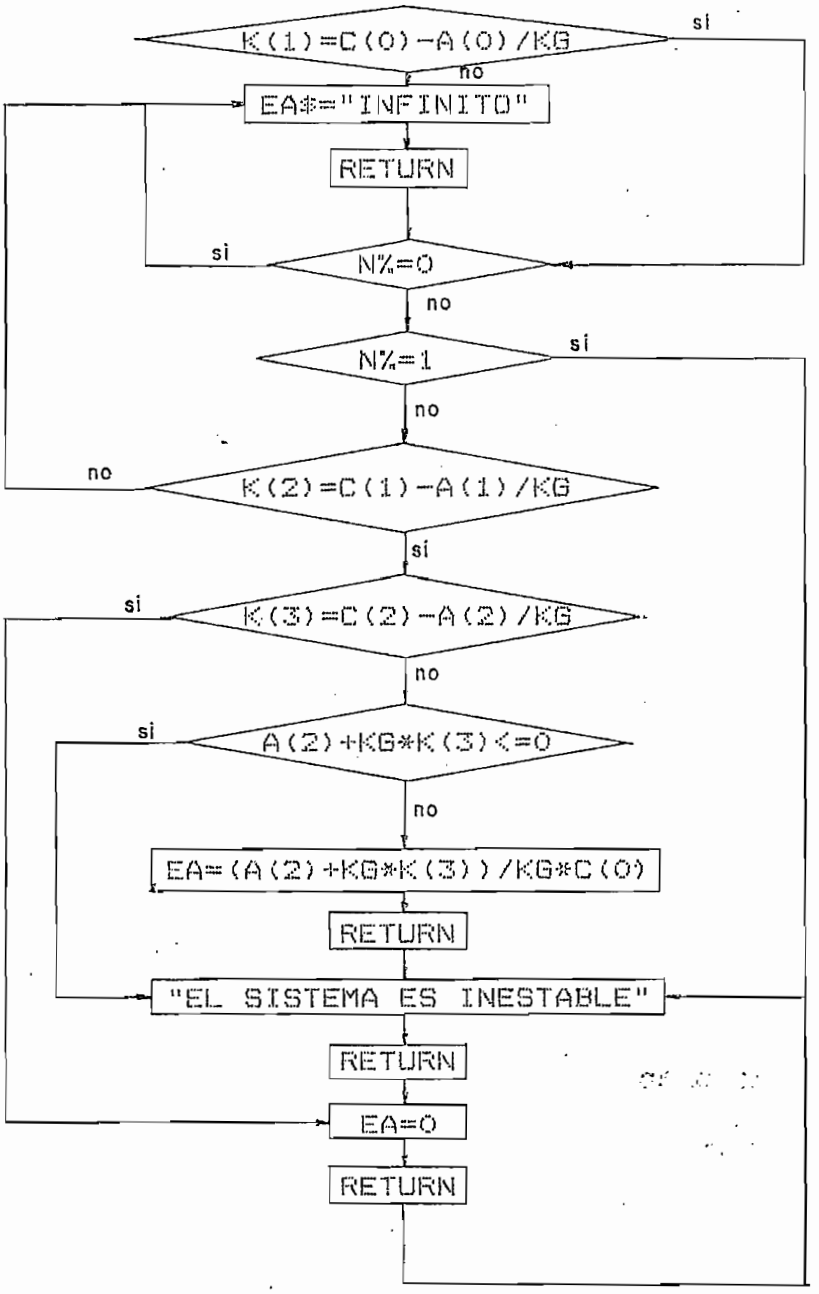
*** ERROR DE POSICION ***



*** ERROR DE VELOCIDAD ***



*** ERROR DE ACELERACION ***



3.2.14 GRAFICOS

Para realizar los gráficos con una alta resolución y versatilidad en el cambio de escalas, presentación e impresión, se ha incorporado como una subrutina del programa principal ANREES al programa de aplicación SYMPHONY.

Por medio de archivos de datos que proporciona el programa principal al programa GRAF, creando en SYMPHONY, con Macros (una serie de intrucciones propias del SYMPHONY) y comandos SCL (Symphony Command Language), se logra crear las diferentes opciones de gráficos, mostrados en pantalla mediante el siguiente menú:

*** GRAFICOS DE BODE ***

1. Gráficos de Bode
2. Ganancia vs. Margen de Ganancia y Fase
3. Gráfico Comparativo
4. Imprimir Gráficos
5. Regreso al Menú de Análisis

A continuación describiremos cada una de estas subrutinas de gráficos.

3.2.15 GRAFICOS DE BODE

Esta subrutina calcula la magnitud y fase de la función de

lazo cerrado y de lazo abierto, creando un archivo denominado DIAG.DAT. de tal forma que sea interpretado adecuadamente por el programa GRAF. para obtener los gráficos de magnitud y fase para lazo cerrado y lazo abierto.

VARIABLES Y DIAGRAMAS DE FLUJO PARA LOS GRAFICOS DE BODE

VW.- Variable que almacena el valor del logaritmo de la frecuencia

VMA.- Vector que almacena el valor de la magnitud en dB de la función de lazo abierto

VFA.- Vector que almacena el valor de la fase de la función de lazo abierto

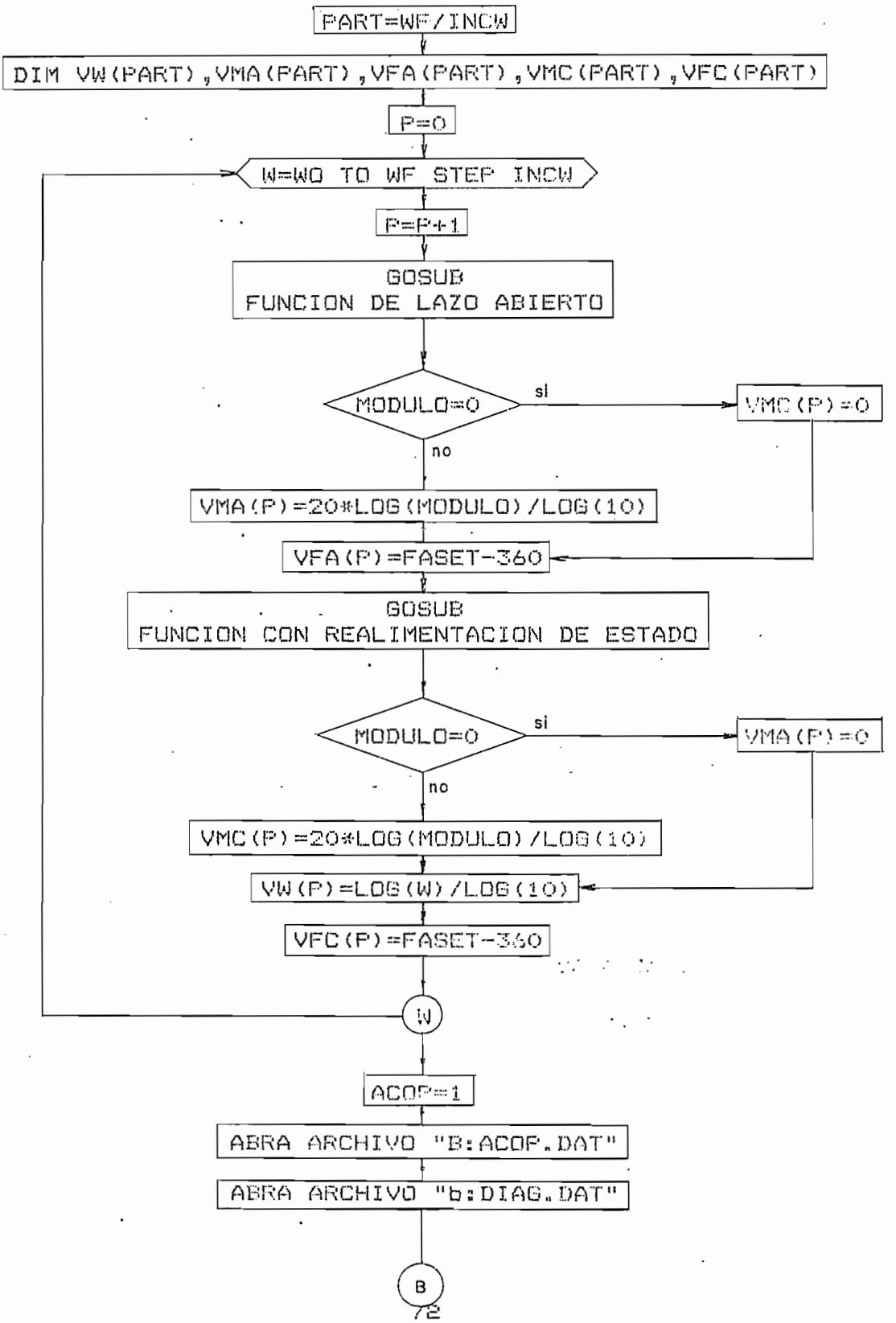
VMC.- Vector que almacena el valor de la magnitud en dB de la función de lazo cerrado

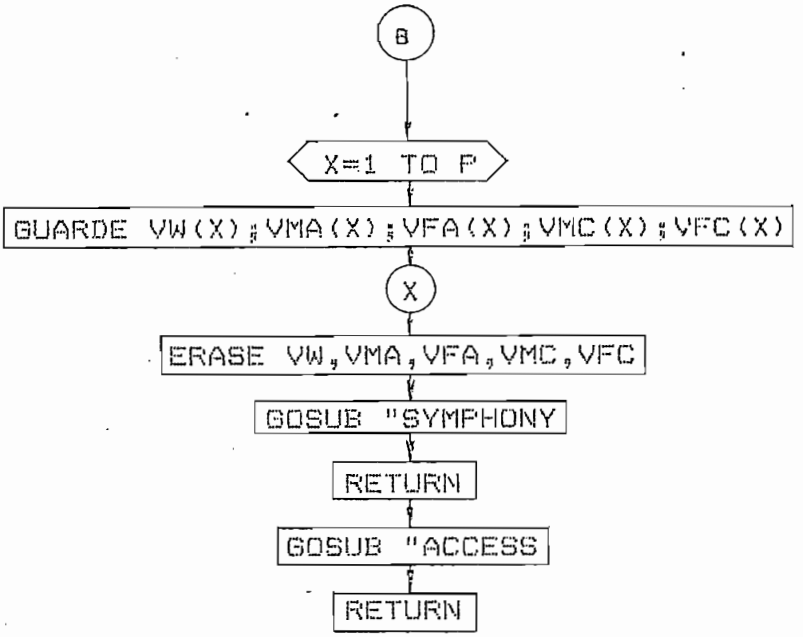
VFC.- Vector que almacena el valor de la fase en dB de la función de lazo cerrado

P.- Contador del número de datos

PART.- Número total de datos

*** GRAFICOS DE BODE ***




B
X=1 TO P
GUARDE VW(X);VMA(X);VFA(X);VMC(X);VFC(X)
X
ERASE VW,VMA,VFA,VMC,VFC
GOSUB "SYMPHONY
RETURN
GOSUB "ACCESS
RETURN

3.2.16 GRAFICO DE GANANCIA vs. MARGEN DE GANANCIA Y FASE

Esta subrutina calcula el margen de ganancia y el de fase para diferentes valores de ganancia de la función directa, dando la opción de variar el rango y el incremento de ganancia.

Esta subrutina interrumpe su ejecución si existe una salida infinita o indefinida y crea un archivo denominado ESTABILI.DAT para que sea interpretado adecuadamente por el programa GRAF y obtener así en un mismo gráfico el margen de ganancia y el margen de fase en función de la ganancia (KG).

INM.- Bandera que indica la salida infinita o indefinida.

BP.- Bandera de paso.

KO.- Variable que almacena el valor inicial de la ganancia de la función directa.

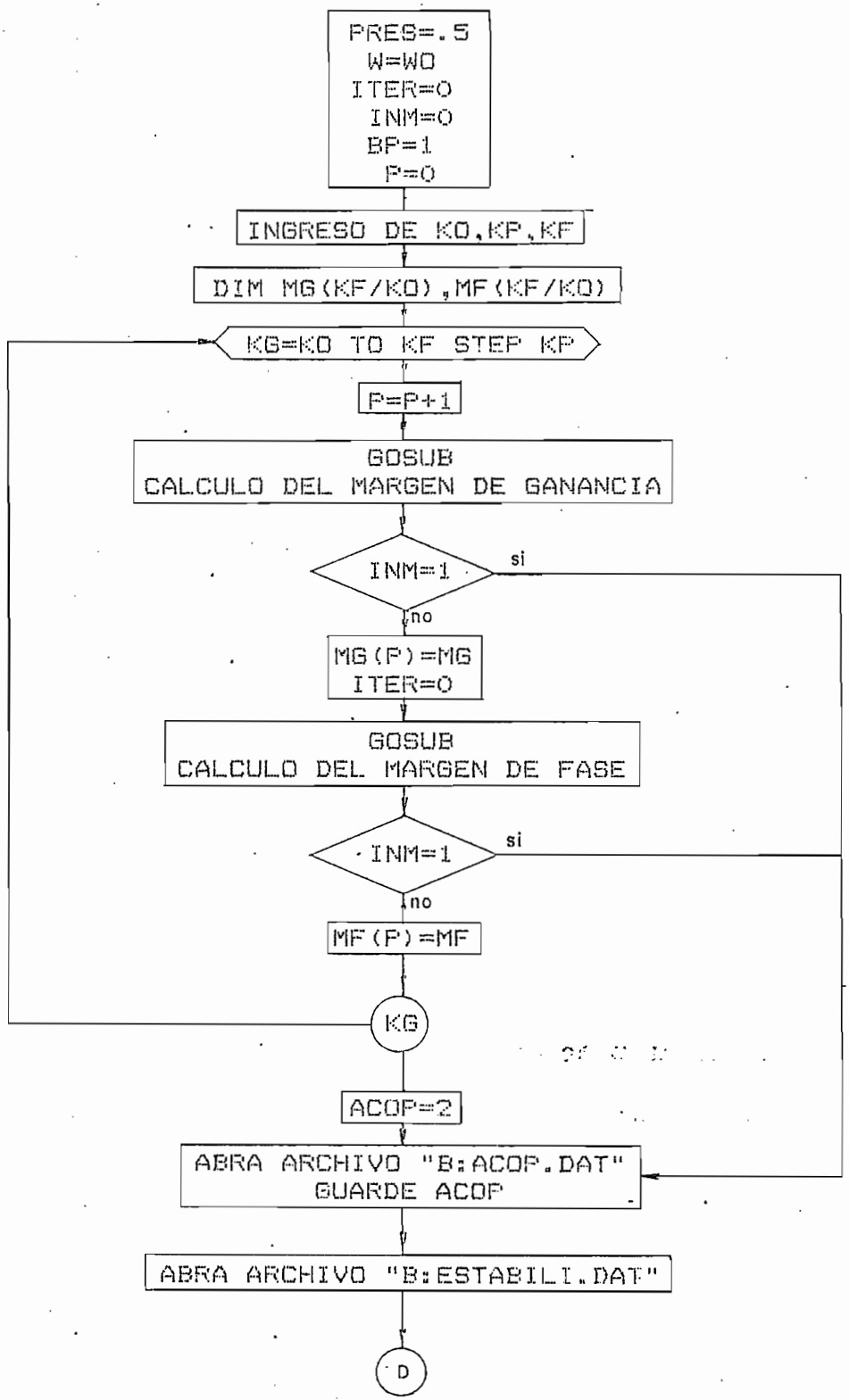
KF.- Variable que almacena el valor final de la ganancia de la función directa.

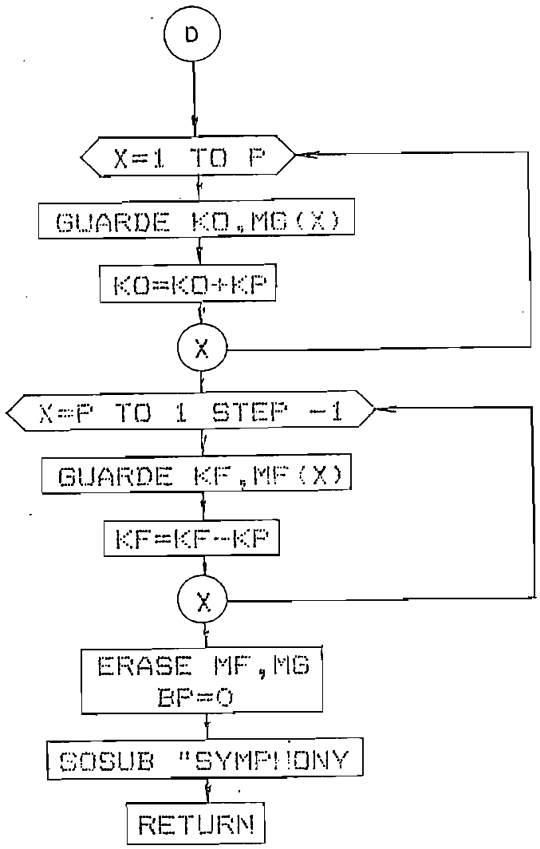
KP.- Variable que almacena el valor incremento de la ganancia de la función directa.

MG(P).- Vector que almacena el margen de ganancia.

MF(P).- Vector que almacena el margen de fase.

*** GRAFICO DE GANANCIA vs. MARGEN DE GANANCIA Y FASE***




D
X=1 TO P
GUARDE KO,MG(X)
KO=KO+KP
X
X=P TO 1 STEP -1
GUARDE KF,MF(X)
KF=KF-KP
X
ERASE MF,MG
BP=0
GOSUB "SYMPHONY
RETURN

3.2.17 GRAFICO COMPARATIVO

Esta subrutina calcula los valores de la magnitud de lazo cerrado y de la sensibilidad de dos diferentes sistemas en todo el rango de frecuencia especificada. Dando la posibilidad de cambiar los parámentros mencionados en el menú de cambio de datos, es decir, la ganancia, el vector de realimentación, la función directa y el rango de frecuencia, para cada sistema. Creando un archivo de datos denominado COMB.DAT de tal forma que sea interpretado adecuadamente por el programa GRAF para obtener dos gráficos, uno de sensibilidad con los dos diferentes sistemas y otro de magnitud de la respuesta de frecuencia en lazo cerrado con los dos diferentes sistemas.

Para realizar el gráfico de sensibilidad, la subrutina necesita que se le especifique si la planta es variable o si la función de realimentación es variable.

VARIABLES Y DIAGRAMAS DE FLUJO PARA LOS GRAFICOS COMPARATIVOS

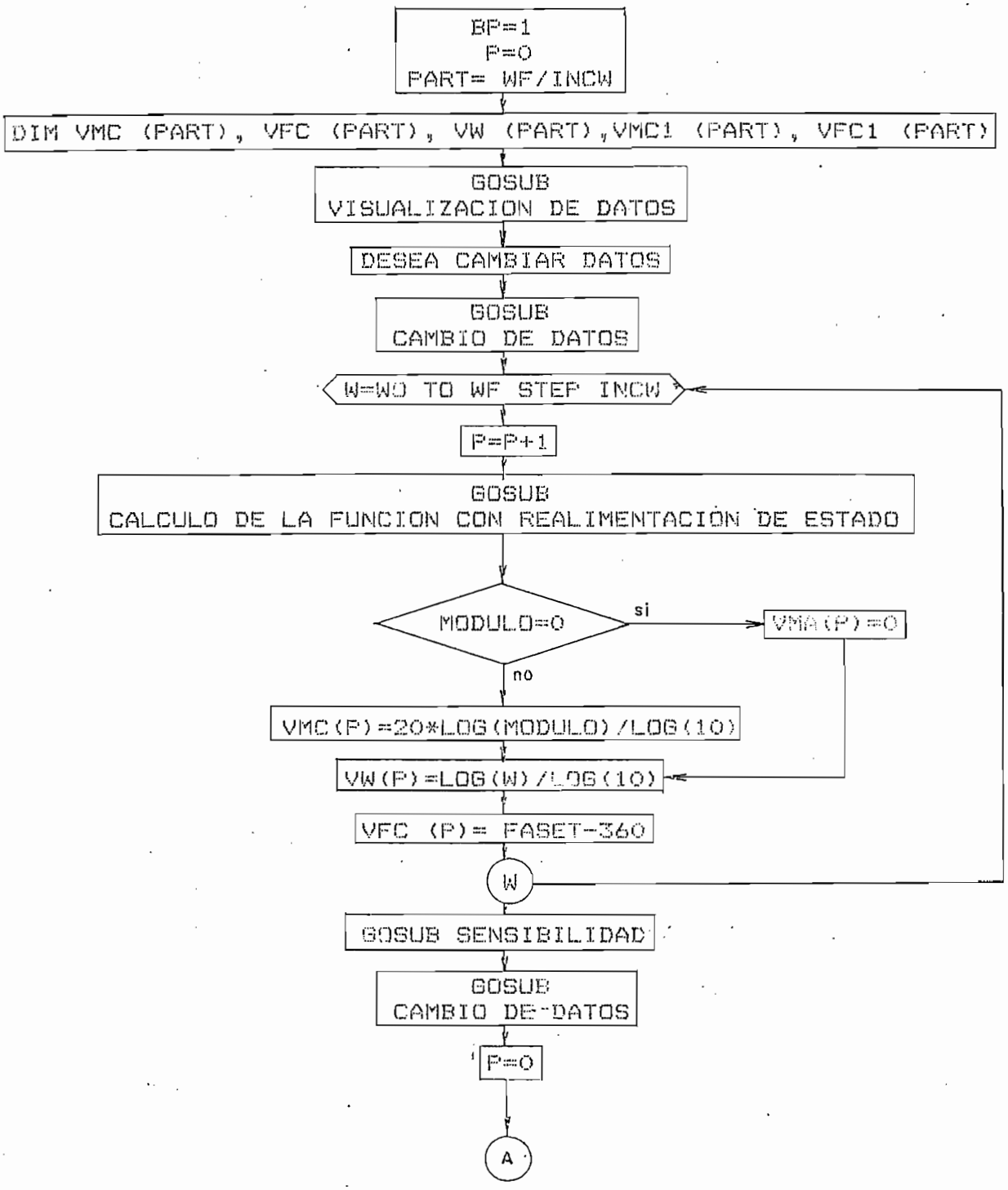
VSE.- Vector que almacena el valor de la sensibilidad para el primer sistema.

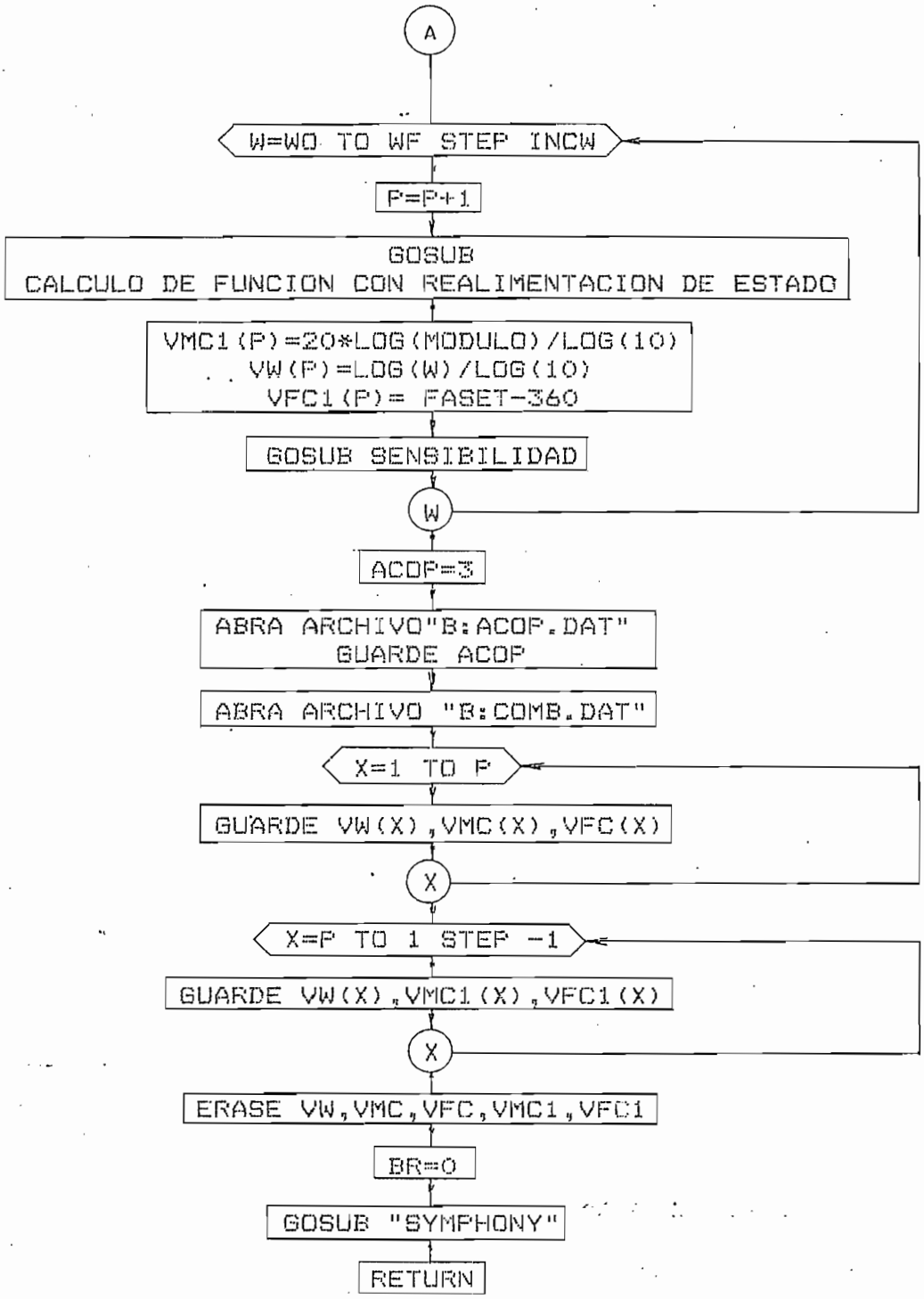
VSE1.- Vector que almacena el valor de la sensibilidad para el segundo sistema.

VMC, VMC1.- Vectores que almacenan el valor del módulo de lazo cerrado para el primer sistema y segundo sistema respectivamente.

VFC, VFC1.- Vectores que almacenan el valor de la fase de lazo cerrado para el primer sistema y segundo sistema respectivamente.

*** DIAGRAMAS DE COMPARACION ***




A
W=WO TO WF STEP INCW
P=P+1
GOSUB
CALCULO DE FUNCION CON REALIMENTACION DE ESTADO
VMC1(P)=20*LOG(MODULO)/LOG(10)
VW(P)=LOG(W)/LOG(10)
VFC1(P)= FASET-360
GOSUB SENSIBILIDAD
W
ACOP=3
ABRA ARCHIVO"B:ACOP.DAT"
GUARDE ACOP
ABRA ARCHIVO "B:COMB.DAT"
X=1 TO P
GUARDE VW(X),VMC(X),VFC(X)
X
X=P TO 1 STEP -1
GUARDE VW(X),VMC1(X),VFC1(X)
X
ERASE VW,VMC,VFC,VMC1,VFC1
BR=0
GOSUB "SYMPHONY"
RETURN

SUBRUTINA DE SENSIBILIDAD

Esta subrutina calcula la sensibilidad de un sistema realimentado, pudiendo escojerse el cálculo en caso de ser los parámetros de la planta los que varien o los parámetros de la cunción equivalente de realimentación. Si la llamada de esta subrutina proviene del menú de análisis, se realiza el cálculo para la frecuencia a la cual la función de lazo cerrado es 0.707 (-3dB), presentandose en pantalla el resultado correspondiente de sensibilidad.

VARIABLES Y DIAGRAMA DE FLUJO PARA LA SUBRUTINA DE SENSIBILIDAD

VA.- Variable que almacena el valor indicativo del cálculo que debe realizarse

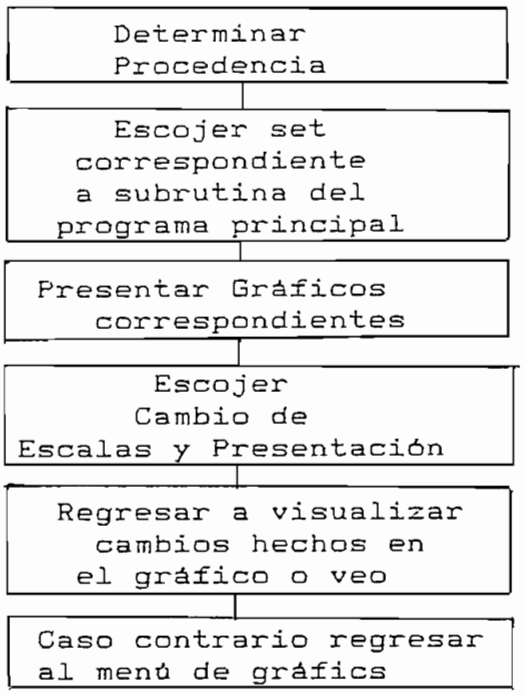
SUBRUTINA GRAF

Esta subrutina denominada GRAF ha sido creada con macros y comandos SCL, lenguage propio del Symphony. Esta subrutina es autoejecutada al ser cargado el Symphony y toma los datos creados por el programa principal para elaborar los gráficos.

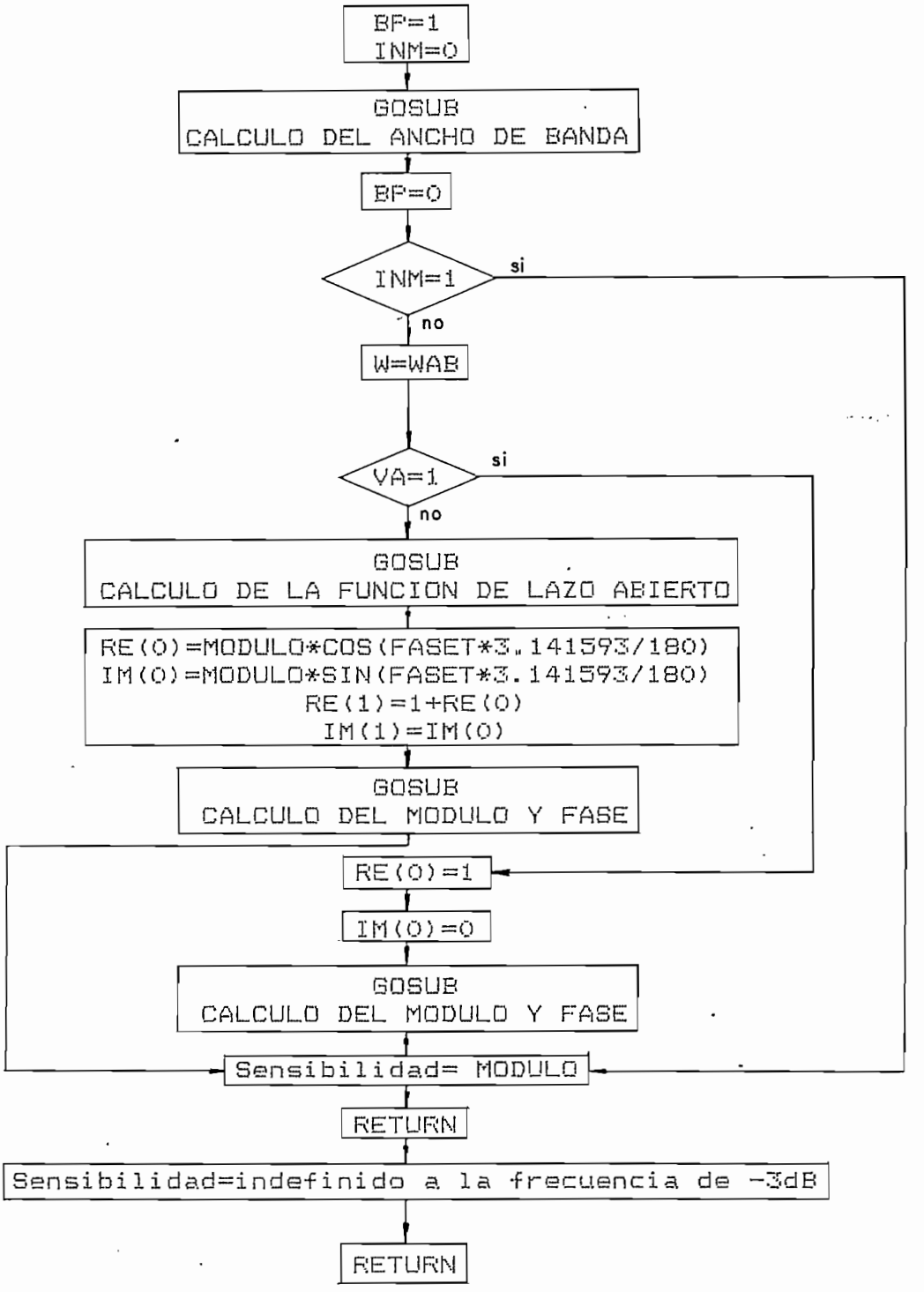
Esta subrutina determina la procedencia de la subrutina de la cual provienen los datos en el programa principal para así realizar el gráfico correspondiente, dando la posibilidad de hacer cambios en las escalas de manera que se pueda visualizar detalladamente una parte del rango total. Dando también la posibilidad de cuadricular los gráficos, es decir colocar líneas,

verticales, horizontales o ambas a la vés.

DIAGRAMA DE BLOQUES



*** SUBRUTINA PARA CALCULO DE SENSIBILIDAD ***



CAPITULO IV

EJEMPLOS Y RESULTADOS

En este capitulo se pretende mostrar la utilidad que brinda el programa implementado restringuiéndose el análisis por la gran variedad de situaciones que pueden presentarse.

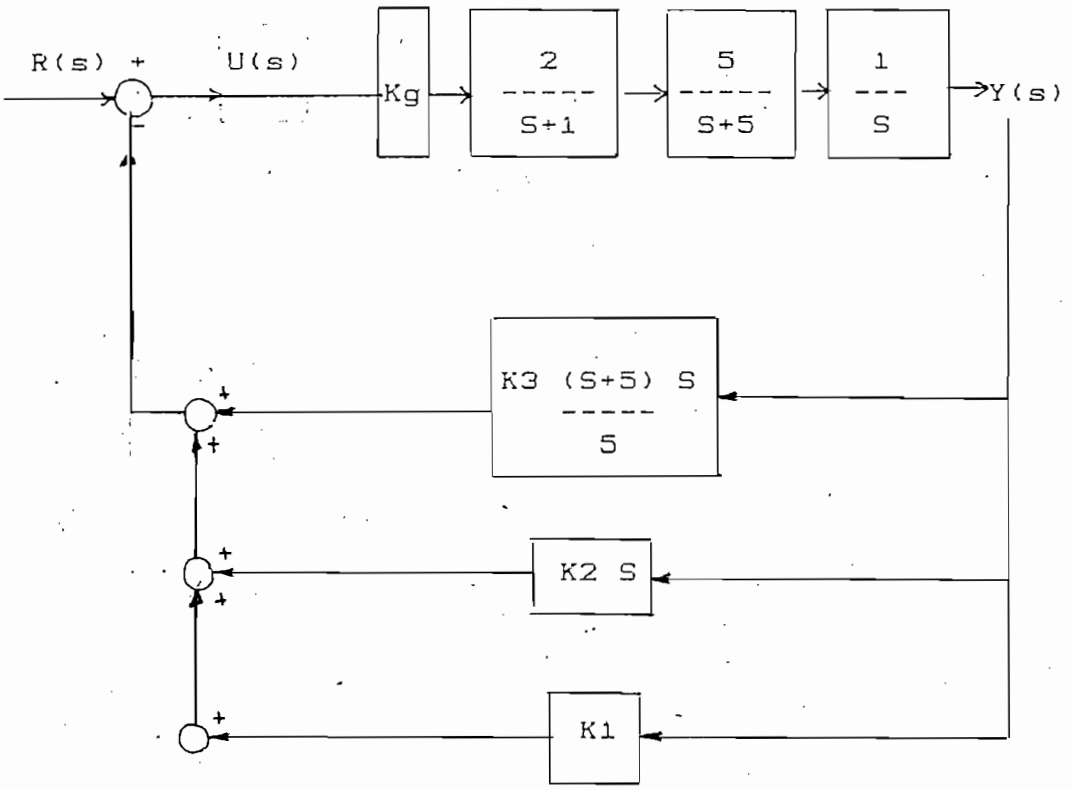
Es necesario como punto de partida para la utilización de dichos programas, el disponer de la función de transferencia y vector de realimentación de estados, y del numerador de la función equivalente de realimentación siempre que el sistema sea controlable. Siendo estos datos los dados por el programa creado en la tesis de "Realimentación de Estados".

EJEMPLO 1

Realimentación por variables de estado con una plan polar:

Ha sido diseñado un sistema empleando el método de realimentación por variables de estado, para lograr que la planta mostrada en la figura 3-1, tenga un sobre tiro no mayor a Mp=1.043, un tiempo de estabilización de ts=5.65 segundos y un error nulo en régimen permanente para una entrada en escalón.

PLANTA



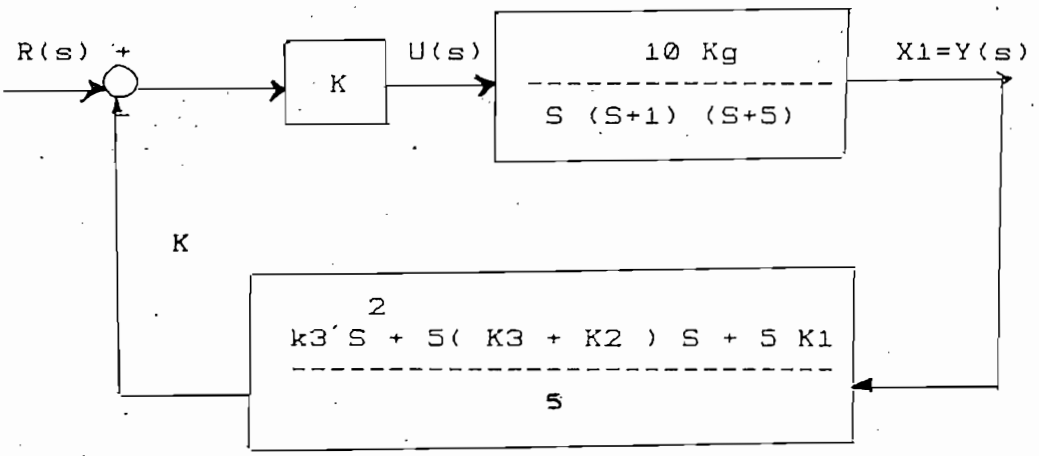


figura 3-1

Un análisis del sistema con realimentación unitaria mostrada

en las figuras 3-2 y 3-3, revelan los siguientes hechos: Con valores grandes de ganancia el sistema con realimentacio unitaria es inestable. Todo variación de ganancia cambia apreciablemente la respuesta del sistema, es decir tiene alta sencibilidad a los cambios de ganancia. Siendo las caracteristicas del sistema:

*** ESTABILIDAD ****

MARGEN DE GANACIA = -10.44 dB

MARGEN DE FASE = -22.83 grados

MAXIMO DE RESONANCIA = 8.8dB

*** VELOCIDAD ***

FRECUENCIA DE RESONANCIA = 3.59 rad.seg.

ANCHO DE BANDA = 5.28 rad.seg.

*** EXACTITUD ***

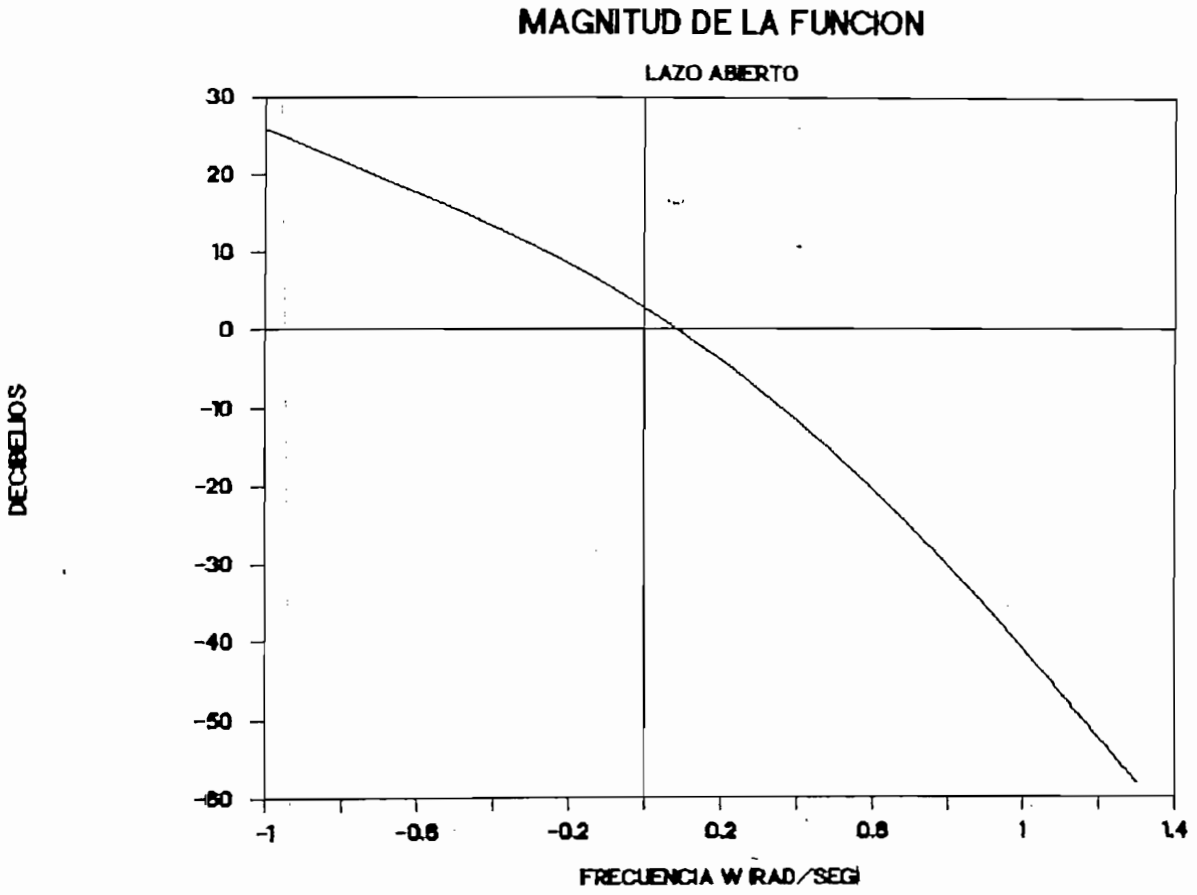
ERROR DE POSICION = -0

ERROR DE VELOCIDAD = infinito

ERROR DE ACELERACION = infinito

*** SENSIBILIDAD ***

SENSIBILIDAD = 1.20


MAGNITUD DE LA FUNCION
LAZO ABIERTO
DECIBELIOS
30
20
10
0
-10
-20
-30
-40
-50
-60
-1
-0.6
-0.2
0.2
0.6
1
1.4
FRECUENCIA W (RAD/SEG)

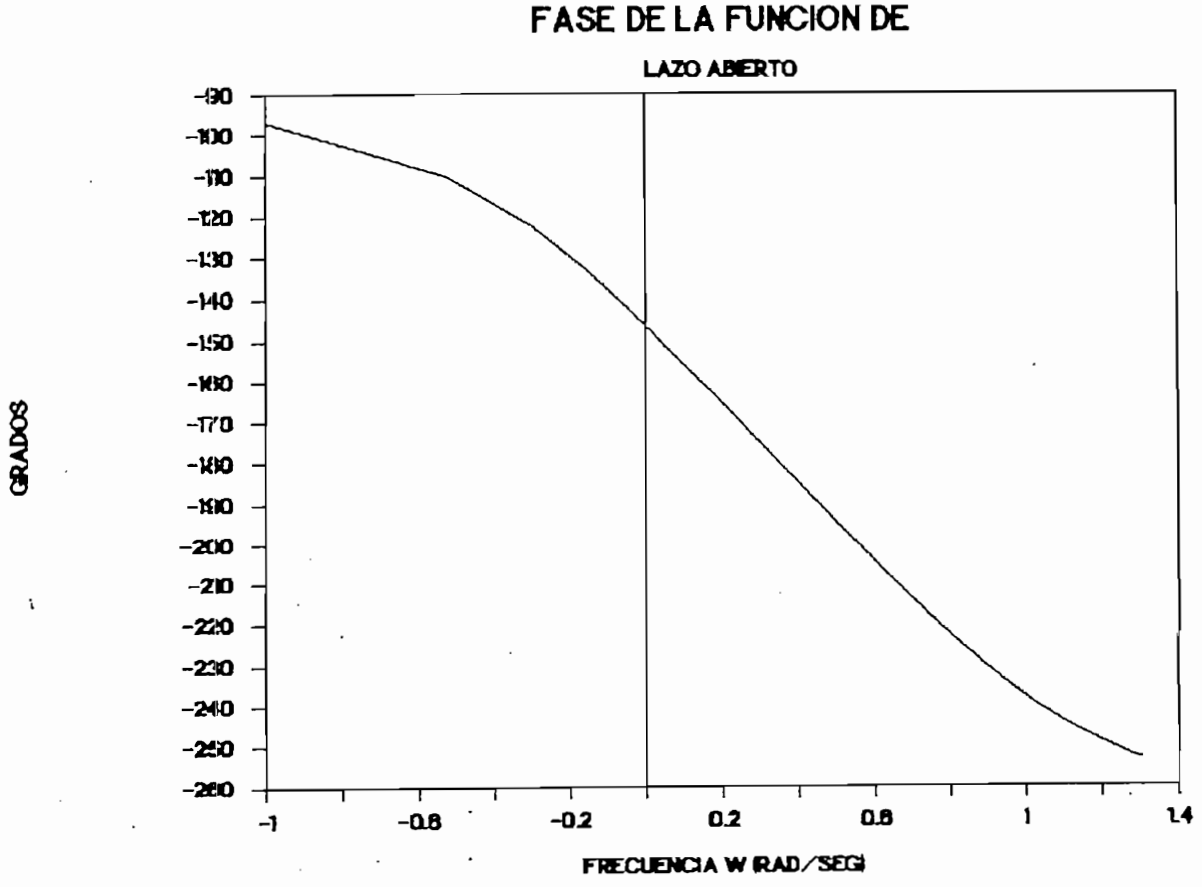

FASE DE LA FUNCION DE
LAZO ABIERTO
GRADOS
-90
-100
-110
-120
-130
-140
-150
-160
-170
-180
-190
-200
-210
-220
-230
-240
-250
-260
-1
-0.6
-0.2
0.2
0.6
1
1.4
FRECUENCIA W (RAD/SEG)

Fig. 3-2

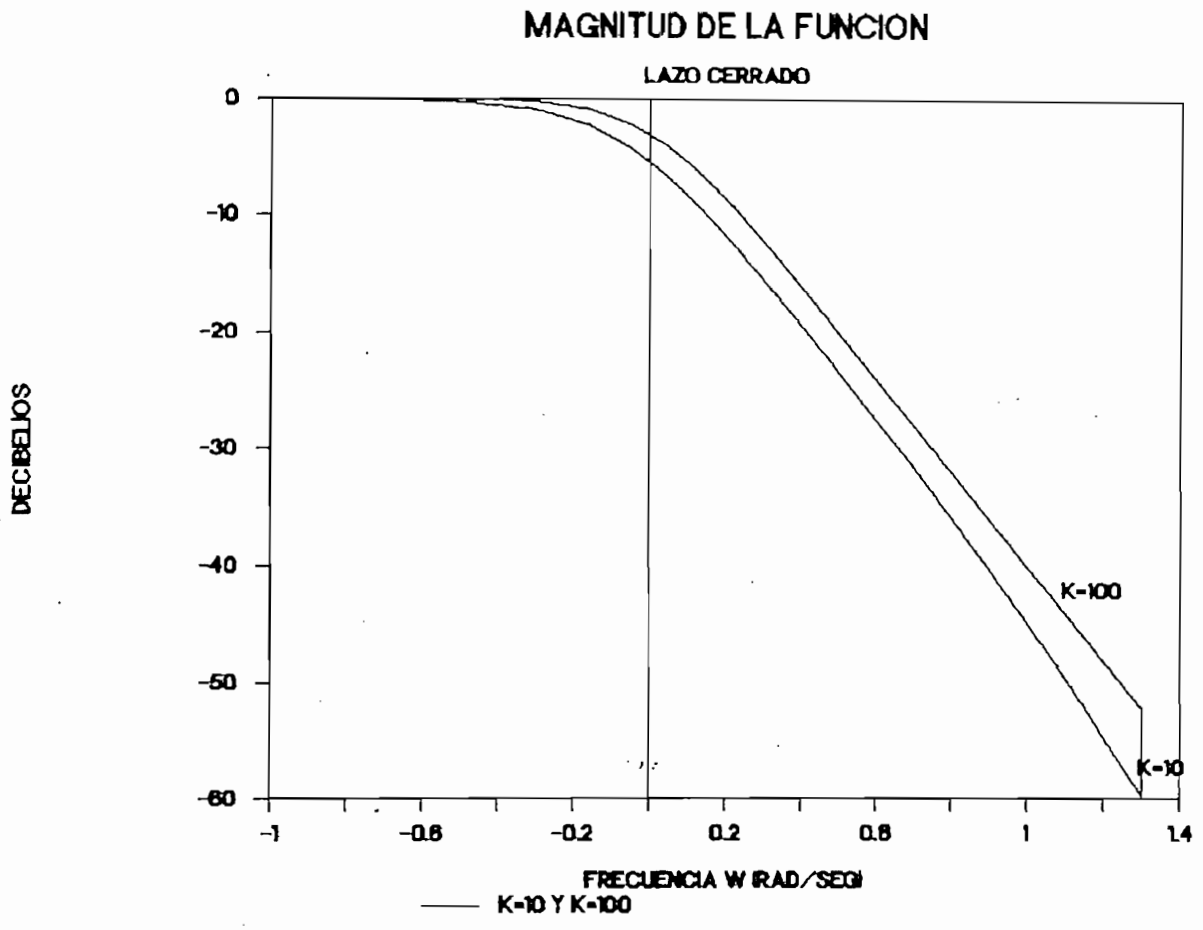

MAGNITUD DE LA FUNCION
LAZO CERRADO
DECIBELIOS
0
-10
-20
-30
-40
-50
-60
-1
-0.6
-0.2
0.2
0.6
1
1.4
K=100
K=10
FRECUENCIA W (RAD/SEG)
K=10 Y K=100

Fig. 3-3

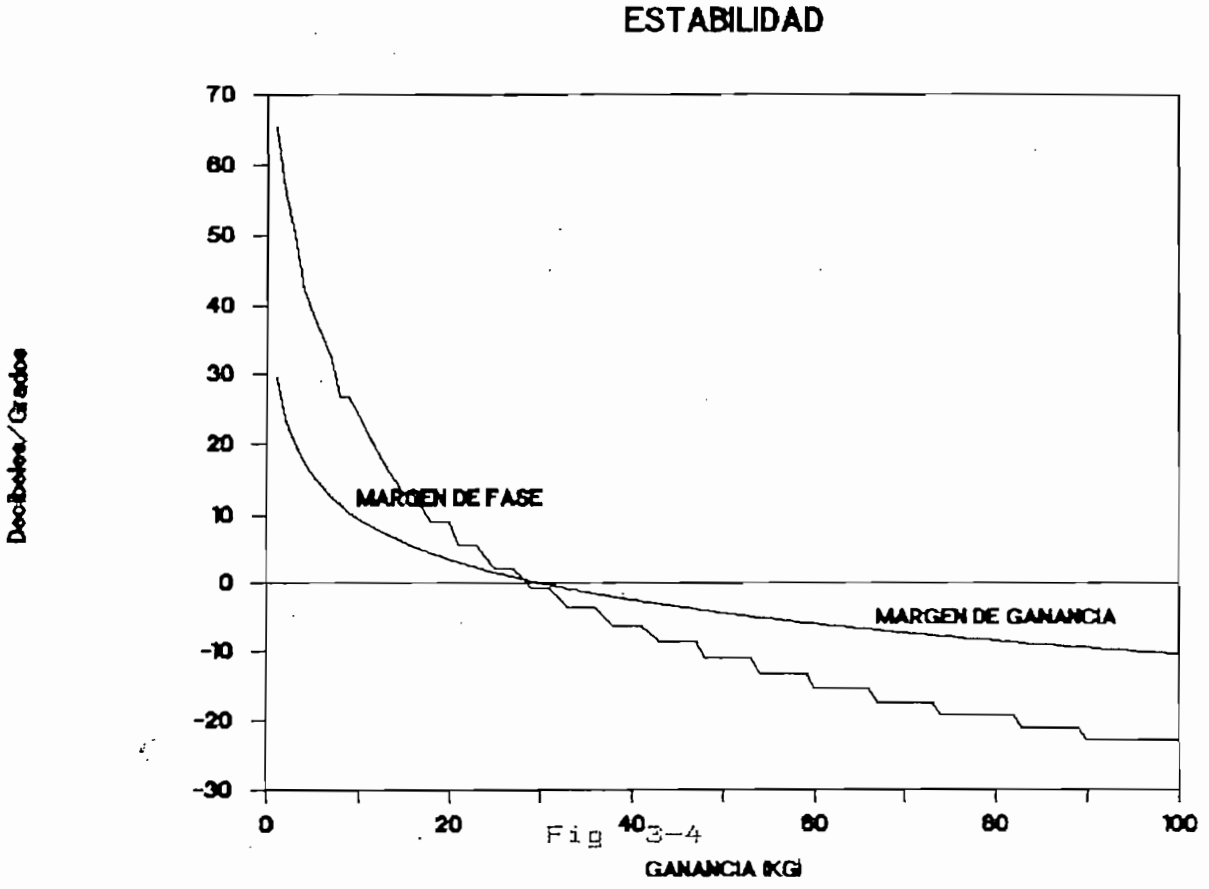

ESTABILIDAD
Decibelios/Grados
70
60
50
40
30
20
10
0
-10
-20
-30
0
20
40
60
80
100
MARGEN DE FASE
MARGEN DE GANANCIA
GANANCIA (KG)

Fig 3-4

Mientras que el análisis de fecuencia del sistema realimentado cuyos datos de realimentación son:

$$kg = 100$$

$$Heq = .954\ S + 1.377\ S + 1$$

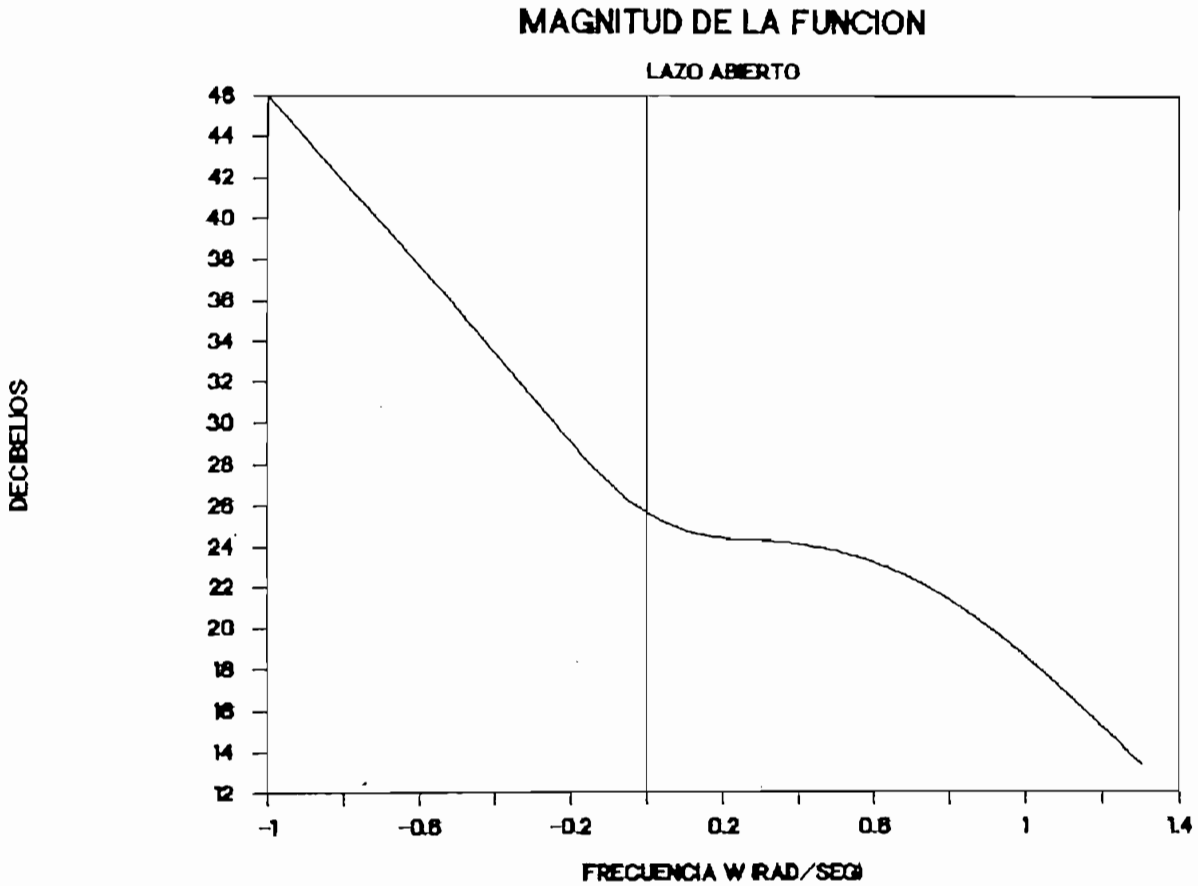
$$k1 = 1$$

$$k2 = -3.393$$

$$k3 = 4.77$$

y cuya respuesta de frecuencia mostrada en las figuras 3-3, 3-4 y 3-5 revelan los siguientes hechos:

El sistema con realimentación por variables de estado es conpletamente estable (ver fig 3-5), para todo valor de Kg>0, notandose que para todo aumento de ganancia desde el valor de Kg=10 produce cambios pequeños, es decir que para valores de gran ganancia, Kg>10, la respuesta del sistema queda esencialmente inalterada por las variaciones de Kg, siempre que los coeficientes de realimentación permanezcan fijos. Siendo esto tambien comprobado por las caracteristicas del sistema obtenidas y mostradas a continuación.


MAGNITUD DE LA FUNCION
LAZO ABIERTO
DECIBELIOS
46
44
42
40
38
36
34
32
30
28
26
24
22
20
18
16
14
12
-1
-0.6
-0.2
0.2
0.6
1
1.4
FRECUENCIA W (RAD/SEG)

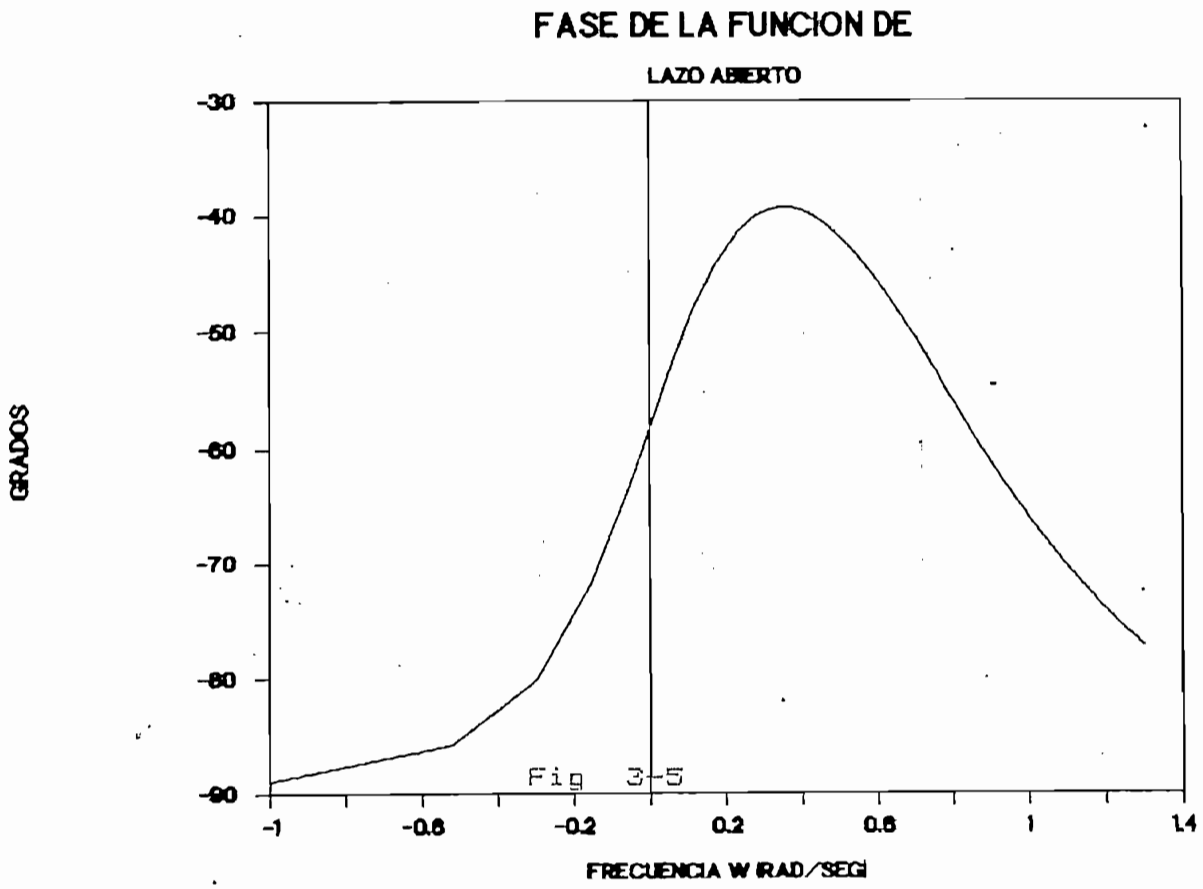

FASE DE LA FUNCION DE
LAZO ABIERTO
GRADOS
-30
-40
-50
-60
-70
-80
-90
-1
-0.6
-0.2
0.2
0.6
1
1.4
FRECUENCIA W (RAD/SEG)

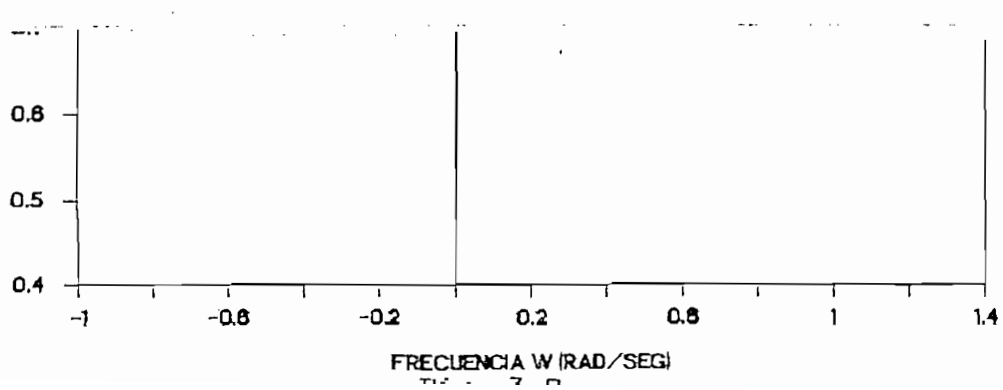
Fig 3-5

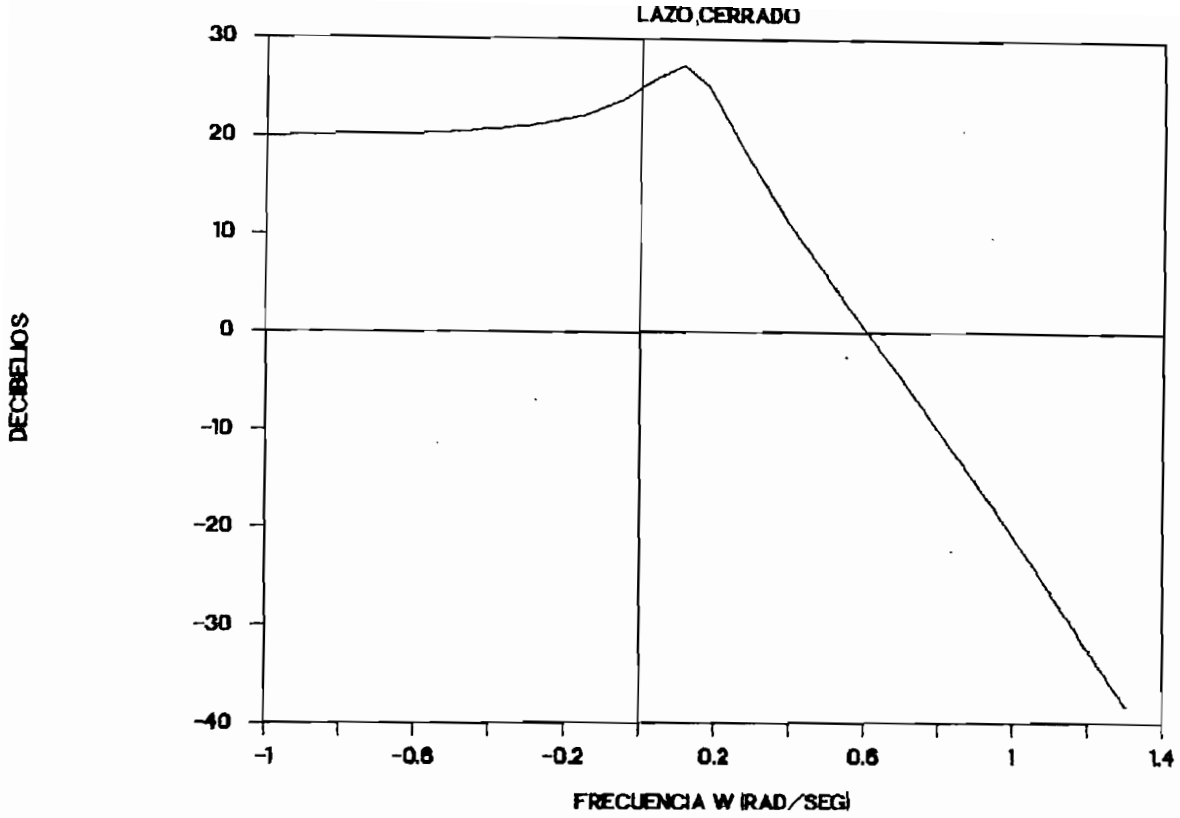
La insensibilidad de la respuesta a variaciones de Kg del sistema re4alimentado por variables de estado se puede notar en la figura 3-5 frente al sistema con realimentación unitaria, que tiene una alta sensibilidad, ver figura 3-7.

Tanto el sistema con realimentación unitaria como el de estado puede seguir a una entrada escalón sin error permanente. Lo mismo ocurre para una entrada de rampa con un error fijo.

Debido a que G(s) no contiene un cero, el sistema con realimentación con variables de estado no puede producir un error fijo para una entrada en rampa como vemos en las características obtenidas del sistema.

Generalmente en el diseño de la realimentación por variables de estado, al seleccionar los polos y ceros, que tendra el sistema, se suele elegir un par de polos dominantes conjugados complejos y los demos polos se situan muy a la izquierda de los polos dominantes. En este ejemplo existe un polo a la izquierda del par complejo dominante lo que hace que se reduzca el máximo de resonancia que presenta en la magnitud de la respuesta de frecuencia el sistema con realimentación unitaria, ver figura 3-8 notandose esta reducción en la magnitud de respuesta de frecuencia de lazo cerrado con realimentación de estado en la figura 3-9




LAZO CERRADO
DECIBELIOS
30
20
10
0
-10
-20
-30
-40
-1
-0.6
-0.2
0.2
0.6
1
1.4
FRECUENCIA W (RAD/SEG)

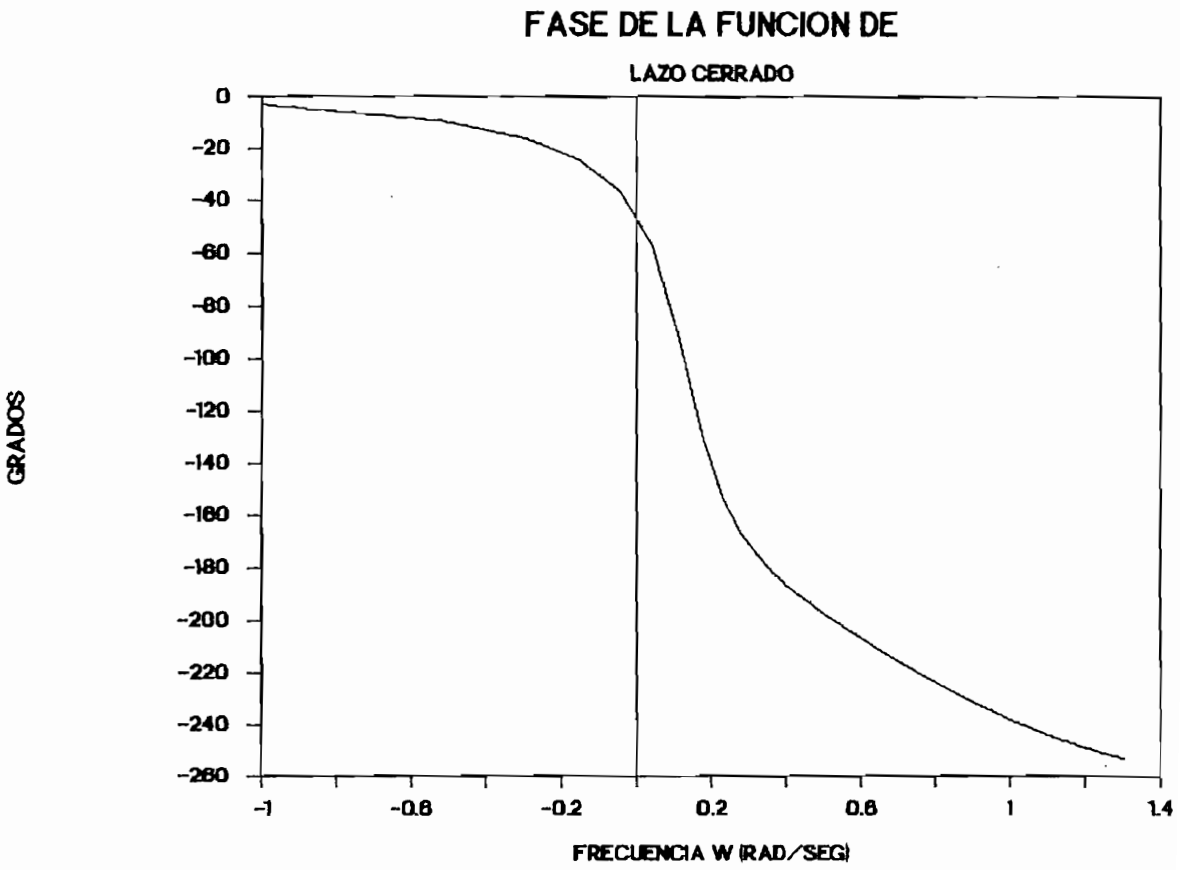
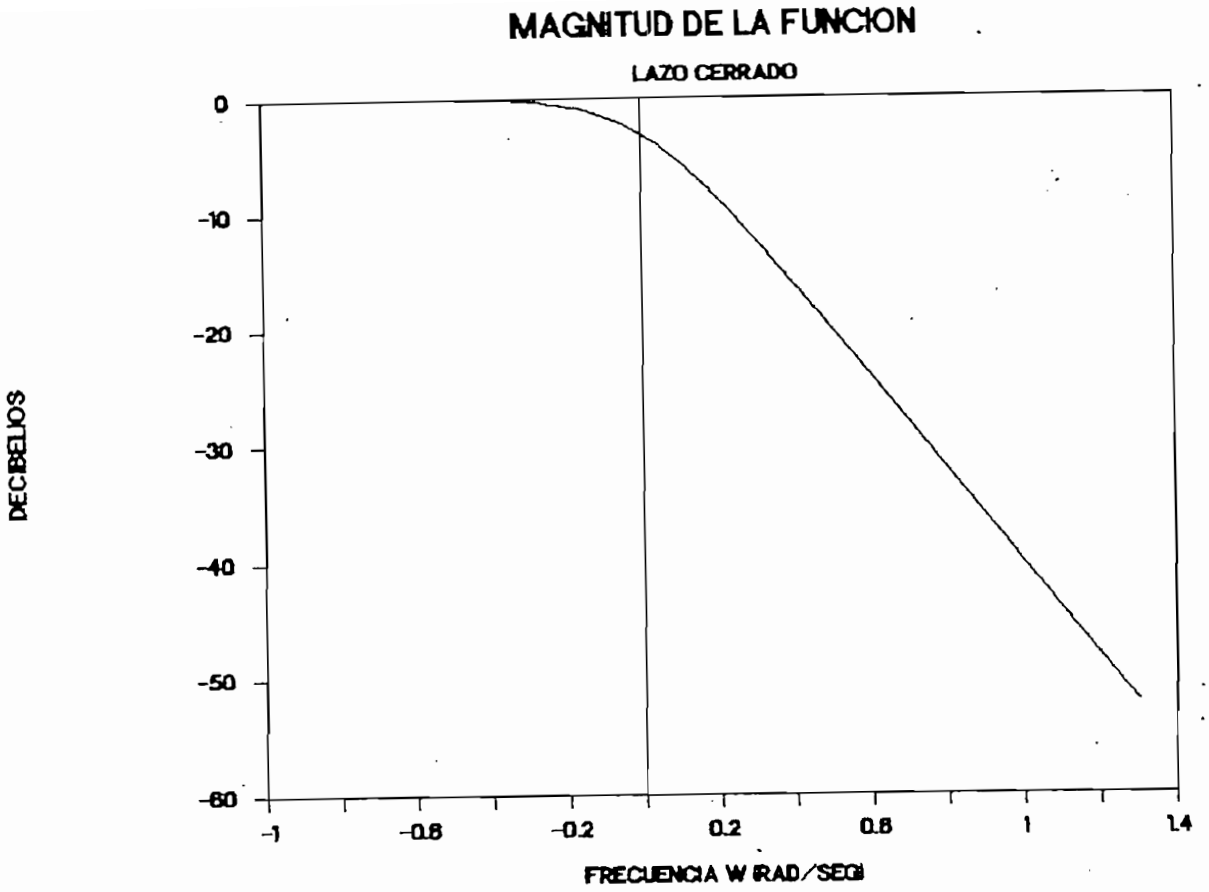
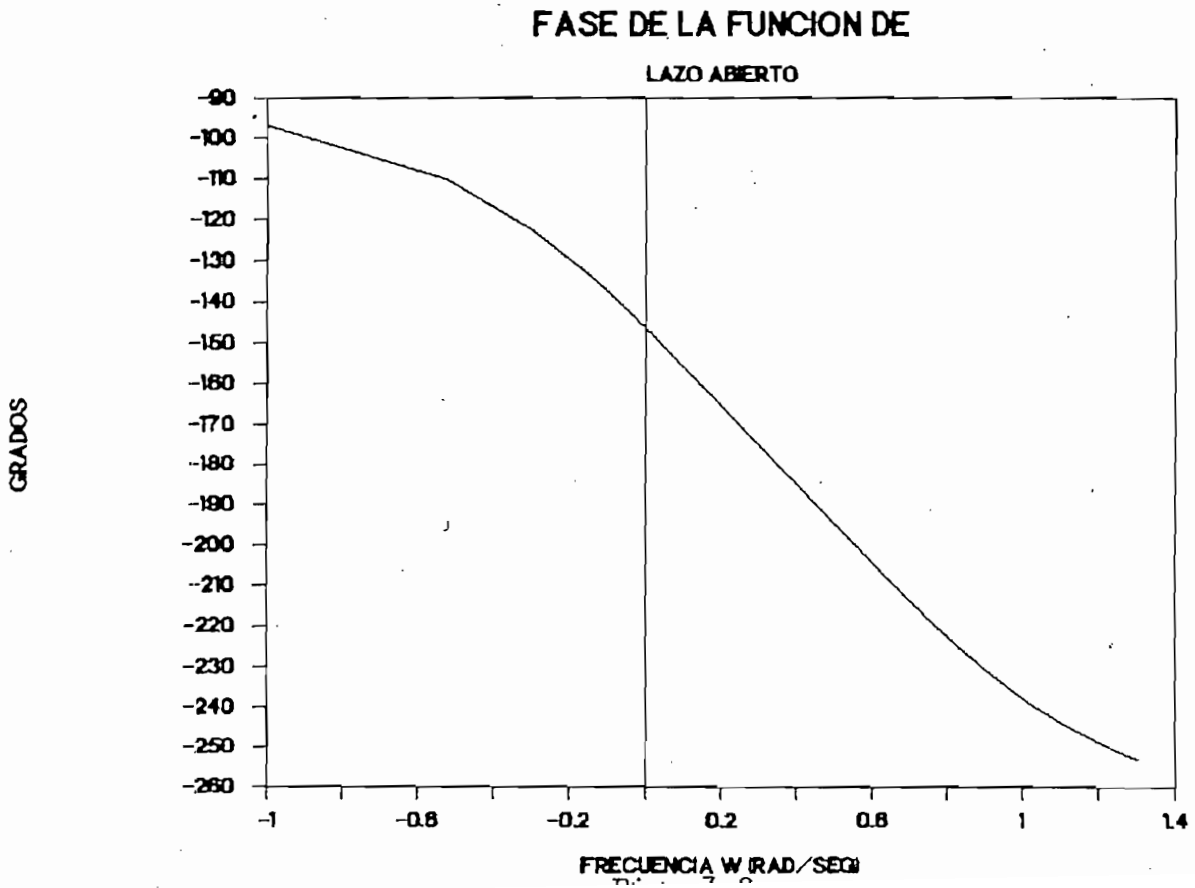

FASE DE LA FUNCION DE
LAZO CERRADO
GRADOS
0
-20
-40
-60
-80
-100
-120
-140
-160
-180
-200
-220
-240
-260
-1
-0.6
-0.2
0.2
0.6
1
1.4
FRECUENCIA W (RAD/SEG)

Fig. 328


MAGNITUD DE LA FUNCION
LAZO CERRADO
DECIBELIOS
0
-10
-20
-30
-40
-50
-60
-1
-0.6
-0.2
0.2
0.6
1
1.4
FRECUENCIA W (RAD/SEG)


FASE DE LA FUNCION DE
LAZO ABIERTO
GRADOS
-90
-100
-110
-120
-130
-140
-150
-160
-170
-180
-190
-200
-210
-220
-230
-240
-250
-260
-1
-0.6
-0.2
0.2
0.6
1
1.4
FRECUENCIA W (RAD/SEG)

Cabe indicar que todos los gráficos aquí mostrados han sido elavorados por el programa implementado, pudiendo obtenerse por tanto, los gráficos de respuesta de frecuencia en magnitud y fase tanto para el sistema en lazo abierto como para el de lazo cerrado, además de los gráficos de sensibilidad y comparativos.

Siendo por tranto una herramienta útil para el análisis de los sistemas realimentados por variables de estado en el dominio de la frecuencia.

CONCLUSIONES Y RESUMEN

La tesis " Análisis por diagrama de Bode de sistemas realimentados por variables de estado" contiene un programa analítico aplicable a variables de estado que utiliza un programa digital implementado en un sistema IBM P.C. denominado ANREES (Análisis de Realimentación de Estados).

Los sistemas realimentados son analizados además, con el apoyo de diagramas de BODE que reciben procesamientos mediante el programa computacional SYMPHONY.

Basicamente se ha escogido el análisi en el dominio de la frecuencia, en el que los diagramas de Bode permiten graficar una función de transferencia, indicando el diseñador, el efecto que tienen los polos y ceros individuales en un gran rango de frecuencias. Con aquella aplicación se definen los parámetros que determinan el trabajo en régimen transitorio y el trabajo en régimen permanente.

Por tanto se ha diseñado una herramienta útil y siendo la realimentación por variables de estado una nueva forma de hacer control, se esta tendiendo a perder los conocimientos del control clásico como son el margen de ganancia, margen de fase, máximo de resonancia, ancho de banda, etc.

Por lo que es de importancia el presente trabajo aquí realizado ya que entrelaza la forma clásica y la nueva forma de

hacer control.

Cuando se tiende a perder los conocimientos clásicos, reafirmarlas mediante la comprobación, el análisis y la utilización de herramientas como la computación es sencillamente situarse en lo que la época demanda.

RECOMENDACIONES

En la presente tesis se ha hecho el análisis por diagramas de Bode de sistemas univariables realimentados por variables de estado por la cual se recomienda se lo haga para sistemas multivariables .

También se realiza el análisis de sensibilidad para dos casos:

1.- Cuando la planta es variable

2.- Cuando la función de realimentación es variable, es recomendable.

Por tanto hacer un análisis poormenorisado de la sensibilidad cuando vari'a cada uno de los parámetros de realimentación.

```
10 NV=0
20 KEY OFF:CLS:LOCATE 5,24:PRINT "***  MENU PRINCIPAL  ***"
30 PRINT:PRINT
40 LOCATE 8,27:PRINT "1.Ingreso de Datos"
50 LOCATE 10,27:PRINT "2.Cambio de Datos"
60 LOCATE 12,27:PRINT "3.Visualizacion de Datos Actuales"
70 LOCATE 14,27:PRINT "4.Analisis de Respuesta de Frecuencia"
80 LOCATE 16,27:PRINT "5.Graficos"
90 LOCATE 18,27:PRINT "6.Salir Temporalmete al sistema"
100 LOCATE 20,27:PRINT "7.Salir al Sistema"
110 LOCATE 23,1
120 INPUT "Introducir Eleccion (1-7) _";ESCOJA%
130 IF ESCOJA%=1 THEN NV=NV+1
140 IF ESCOJA%<1 OR ESCOJA%>7 THEN GOTO 150 ELSE GOTO 180
150 PRINT "Sirvase Introducir una Eleccion entre 1 y 7.
    Pulsar cualquier tecla para continuar"
160 IF INKEY$="" THEN 160
170 GOTO 20
180 ON ESCOJA% GOSUB 200,670,1560,920,4770,6280,6310
190 GOTO 20
200 CLS:KEY OFF:CD=0
210 IF NV>=2 THEN ERASE C,A,K,KE
220 PRINT:LOCATE 5,1
230 PRINT "GANANCIA de Funcion Directa"
240 INPUT "KG = ",KG
250 IF KG=0 THEN PRINT "LA GANANCIA DEBE SER MAYOR QUE CERO":GOTO 23
260 IF CD=1 THEN RETURN
270 PRINT
280 PRINT "NUMERADOR de la FUNCION DIRECTA "
290 INPUT "GRADO = ",N%
300 DIM C(N%)
310 INPUT "COEFICIENTE del NUMERADOR de la Funcion
    Directa en Forma DESCENDENTE = ",C(N%)
320 IF C(0)<0 THEN PRINT "LOS COEFICIENTES DEL NUMERADOR
    DEBEN SER TODOS POSITIVOS":INPUT "Ingrese valor
    POSITIVO de este coeficiente = ",C(I)
330 FOR I=N%-1 TO 0 STEP -1
340 INPUT "El SIGUIENTE Coeficiente = ",C(I)
350 IF C(I)<0 THEN PRINT "LOS COEFICIENTES DEL NUMERADOR
    DEBEN SER TODOS POSITIVOS":INPUT "Ingrese valor
    POSITIVO de este coeficiente = ",C(I)
360 NEXT I
370 PRINT
380 PRINT "DENOMINADOR de la FUNCION DIRECTA "
390 INPUT "GRADO = ",D%
400 IF N%>D% THEN PRINT "EL GRADO DEL DENOMINADOR DEBE
    SER MAYOR QUE EL GRADO DEL NUMERADOR":GOTO 380
410 DIM A(D%)
420 INPUT "COEFICIENTE del DENOMINADOR de la funcion
    Directa en forma DESCENDENTE = ",A(D%)
430 FOR I=D%-1 TO 0 STEP -1
440 INPUT "El SIGUIENTE Coeficiente = ",A(I)
450 NEXT I
460 IF CD=1 THEN RETURN
470 PRINT:PRINT "NUMERADOR de la Funcion EQUIVALENTE de
```

```
     Realimentacion"
 480 INPUT "GRADO = ",NH%
 490 IF D%<NH% THEN PRINT "EL GRADO DEL NUMERADOR DE LA
     FUNCION EQUIVALENTE DE REALIMENTACION DEBE SER MENOR
     AL GRADO DEL DENOMINADOR DE LA FUNCION DIRECTA ":GOTO
     480
 500 DIM K(NH%+1),KE(D%)
 510 INPUT "COEFICIENTE en forma DESCENDENTE = ",KE(NH%)
 520 FOR I=NH%-1 TO 0 STEP -1
 530 INPUT "El SIGUIENTE COEFICIENTE = ",KE(I)
 540 NEXT I
 550 PRINT:PRINT "VECTOR de REALIMENTACION"
 560 INPUT "COEFICIENTE DEL VECTOR en forma DESCENDENTE =
     ",K(NH%+1)
 570 FOR I=NH% TO 1 STEP -1
 580 INPUT "El SIGUIENTE coeficiente = ",K(I)
 590 NEXT I
 600 IF CD=1 THEN RETURN
 610 PRINT
 620 PRINT "RANGO de FRECUENCIA"
 630 INPUT "Frecuencia de INICIO = ",WO
 640 INPUT "Frecuncia FINAL = ",WF
 650 IF CD=1 THEN RETURN
 660 RETURN
 670 CLS:LOCATE 12,1:IF NV=0 THEN PRINT "NO es posible
     CAMBIAR DATOS sin haberlos INGRESADO PREVIAMENTE.
     Pulse cualquier tecla para continuar" ELSE GOTO 700
 680 IF INKEY$="" THEN 680
 690 GOTO 20
 700 LOCATE 5,24:PRINT "***  CAMBIO DE DATOS  ***"
 710 PRINT :PRINT
 720 LOCATE 8,25:PRINT "1.El VECTOR de realimentacion"
 730 LOCATE 10,25:PRINT "2.GANANCIA de Funcion Directa"
 740 LOCATE 12,25:PRINT "3.Funcion DIRECTA"
 750 LOCATE 14,25:PRINT "4.RANGO de Frecuencia"
 760 LOCATE 16,25:PRINT "5.RETORNO a Menu Principal"
 770 LOCATE 21,1
 780 INPUT "Introducir Eleccion (1-5) _";ESCJ%
 790 IF ESCJ%<1 OR ESCJ%>5 THEN 780
 800 IF ESCJ%=5 THEN RETURN
 810 ON ESCJ% GOSUB 860,880,840,900
 820 IF BR=1 THEN RETURN
 830 GOTO 670
 840 CLS:LOCATE 5,1:ERASE C,A:CD=1:GOSUB 270
 850 RETURN
 860 CLS:LOCATE 5,1:ERASE K,KE:CD=1:GOSUB 470
 870 RETURN
 880 CLS:CD=1:GOSUB 220
 890 RETURN
 900 CLS:LOCATE 5,5:CD=1:GOSUB 610
 910 RETURN
 920 CLS:LA=1:LOCATE 5,24:PRINT "***  ANALISIS DE RESPUESTA
     DE FRECUENCIA  ***"
930 LOCATE 8,27:PRINT "1. Estabilidad del Sistema"
 940 LOCATE 10,27:PRINT "2. Velocidad de Respuesta"
```

```
950 LOCATE 12,27:PRINT "3. Exactitud de Respuesta"
960 LOCATE 14,27:PRINT "4. Graficas de Bode"
970 LOCATE 16,27:PRINT "5. Sensisibilidad"
980 LOCATE 18,27:PRINT "6. Volver a Menu Principal"
990 LOCATE 23,1:INPUT "Introducir Eleccion (1-6)_";ESC%
1000 IF ESC%<1 OR ESC%>6 THEN 1010 ELSE GOTO 1040
1010 PRINT "Sirvase Introducir una eleccion entre 1 y 6.
     Pulse cualquier tecla para continuar"
1020 IF INKEY$="" THEN 1020
1030 GOTO 920
1040 IF ESC%=6 THEN 20
1050 ON ESC% GOSUB 1070,1240,1400,4880,5170
1060 GOTO 920
1070 CLS:LOCATE 5,24:PRINT "***  ESTABILIDAD DEL
     SISTEMA  ***"
1080 LOCATE 8,27:PRINT "1. Margen de Ganancia"
1090 LOCATE 10,27:PRINT "2. Margen de Fase"
1100 LOCATE 12,27:PRINT "3. Maximo de Resonancia"
1110 LOCATE 14,27:PRINT "4. Todo lo anterior"
1120 LOCATE 16,27:PRINT "5. Regreso al Menu de Analisis"
1130 LOCATE 20,1:INPUT "Introducir Eleccion (1-5)_";ES%
1140 IF ES%<1 OR ES%>5 THEN 1150 ELSE GOTO 1180
1150 PRINT "Sirvase Introducir uan eleccion entre 1 y 5.
     Pulse cualquier tecla para continuar"
1160 IF INKEY$="" THEN 1160
1170 GOTO 1070
1180 IF ES%=5 THEN 920
1190 T=0
1200 IF ES%=4 OR TODO=1 THEN ES%=1:T=1
1210 ON ES% GOSUB 2660,3130,3490
1220 IF T=1 AND ES%<3 THEN ES%=ES%+1:GOTO 1210
1230 GOTO 1070
1240 CLS:LOCATE 5,24:PRINT "***  VELOCIDAD DE RESPUESTA  ***"
1250 T=0
1260 LOCATE 8,27:PRINT "1. Frecuencia de Resonancia"
1270 LOCATE 10,27:PRINT "2. Ancho de Banda"
1280 LOCATE 12,27:PRINT "3. Todo lo anterior"
1290 LOCATE 14,27:PRINT "4. Regreso al Menu de Analisis"
1300 LOCATE 20,1:INPUT "Introducir Eleccion (1-4)_";E%
1310 IF E%<1 OR E%>4 THEN 1320 ELSE GOTO 1350
1320 PRINT "Sirvase Introducir uan eleccion entre 1 y 4.
     Pulse cualquier tecla para continuar"
1330 IF INKEY$="" THEN 1330
1340 GOTO 1240
1350 IF E%=4 THEN 920
1360 IF E%=3 OR TODO=1 THEN E%=1:T=1
1370 ON E% GOSUB 3490,3690
1380 IF T=1 AND E%<2 THEN E%=E%+1:GOTO 1370
1390 GOTO 1240
1400 CLS:LOCATE 5,24:PRINT "***  EXACTITUD DE RESPUESTA  ***"
1410 LOCATE 8,27:PRINT "1. Error de Posicion"
1420 LOCATE 10,27:PRINT "2. Error de Velocidad"
1430 LOCATE 12,27:PRINT "3. Error de Aceleracion"
1440 LOCATE 14,27:PRINT "4. Todo lo anterior"
1450 LOCATE 16,27:PRINT "5. Regreso al Menu de Analisis"
```

```
1460 LOCATE 20,1:INPUT "Introducir Eleccion (1-5)_";SE%
1470 IF SE%<1 OR SE%>5 THEN 1480 ELSE GOTO 1510
1480 PRINT "Sirvase Introducir uan eleccion entre 1 y 5.
     Pulse cualquier tecla para continuar"
1490 IF INKEY$="" THEN 1490
1500 GOTO 1400
1510 IF SE%=5 THEN 920
1520 T=0:IF SE%=4 THEN SE%=1:T=1
1530 ON SE% GOSUB 4200,4300,4550
1540 IF T=1 AND SE%<3 THEN SE%=SE%+1:GOTO 1530
1550 GOTO 1400
1560 CLS:LOCATE 12,1:IF NV=0 THEN PRINT "NO es posible
     VISUALISAR LOS DATOS sin haberlos INGRESADO PREVIAMENTE.
          Pulse cualquier tecla para continuar" ELSE 1590
1570 IF INKEY$="" THEN 1570
1580 GOTO 20
1590 '****  VISUALIZACION DE DATOS ACTUALES  ****
1600 CLS
1610 PRINT TAB(24) "FUNCION DIRECTA G(jW)"
1620 PRINT
1630 PRINT "GANANCIA KG = "KG
1640 PRINT:PRINT TAB(8)"NUMERADOR ":LOCATE 5,48:PRINT
     "DENOMINADOR "
1650 PRINT
1660 FOR X=N% TO 0 STEP -1
1670 PRINT TAB(8)"S^"X"=";C(X)
1680 NEXT
1690 PO=CSRLIN-N%-2
1700 FOR X=D% TO 0 STEP -1
1710 IF PO=24 THEN 1730
1720 PO=PO+1:LOCATE PO,48
1730 PRINT TAB(48)"S^"X"=";A(X)
1740 NEXT
1750 PRINT "Puse cualquier tecla para continuar"
1760 IF INKEY$="" THEN 1760
1770 PRINT :PRINT TAB(16)"FUNCION DE REALIMENTACION DE
     ESTADOS H(jW)"
1780 PRINT:PRINT TAB(8)"NUMERADOR ","
     DENOMINADOR "
1790 PRINT
1800 FOR X=NH% TO 0 STEP -1
1810 PRINT TAB(8)"S^"X"=";KE(X)
1820 NEXT
1830 PO=CSRLIN-NH%-2
1840 FOR X=N% TO 0 STEP -1
1850 IF PO=23 THEN 1870
1860 PO=PO+1:LOCATE PO,48
1870 PRINT TAB(48)"S^"X"=";C(X)
1880 NEXT
1890 PRINT:PRINT:PRINT:PRINT:PRINT "Pulse cualquier tecla
     para continuar"
1900 IF INKEY$="" THEN 1900
1910 PRINT:PRINT "VECTOR DE REALIMENTACION DE ESTADOS"
1920 FOR X=NH%+1 TO 1 STEP -1
1930 PRINT TAB(8)"K"X"=";K(X)
1940 NEXT
```

```
2460 AUX%=N2%
2470 GOTO 2330
2480 ERASE C1,A1
2490 '***  CALCULO DEL MODULO Y FASE DE UNA FUNCION  ***
2500 FOR X=0 TO 1
2510 MODU(X)=(RE(X)^2+IM(X)^2)^.5
2520 IF RE(X)=0 AND IM(X)=0 THEN FASE(X)=0:GOTO 2580
2530 IF RE(X)=0 AND IM(X)<0 THEN FASE(X)=-90:GOTO 2580
2540 IF RE(X)=0 AND IM(X)>0 THEN FASE(X)=90:GOTO 2580
2550 FASE= ATN(IM(X)/RE(X))*180/3.141593
2560 IF RE(X)>0 THEN FASE(X)=FASE:GOTO 2580
2570 FASE(X)=FASE+180
2580 IF FASE(X)>0 THEN 2600
2590 FASE(X)=FASE(X)+360
2600 NEXT X
2610 FASET=FASE(0)-FASE(1)
2620 IF FASET>0 THEN 2640
2630 FASET=FASET+360
2640 MODULO=MODU(0)/MODU(1)
2650 RETURN
2660 REM ***  CALCULO DEL MARGEN DE GANANCIA  ***
2670 W=WO:CLS:INPUT "INGRESE VALOR DE PRESICION (Se
     recomienda 0.5) ",PRES
2680 INCW=(WF-WO)/2:CLS:PRINT "ESPERE POR FAVOR ...."
2690 ITER=0
2700 IF D%>NH% +2 THEN 2750
2710 MG$="INFINITO":CLS:LOCATE 12,23:PRINT "EL MARGEN DE
     GANANCIA ES "MG$:PRINT :PRINT TAB(23)"(Pulse
     Cualquier Tecla para Continuar)"
2720 IF INKEY$="" THEN 2720
2730 INM=1
2740 RETURN
2750 FOR X=D% TO 1 STEP-1
2760 IF X<NH%+1 THEN 2790
2770 IF A(X)<>0 THEN 2850
2780 GOTO 2800
2790 IF C(X)<>0 AND A(X)<>0 THEN 2850
2800 NEXT X
2810 MG$="INDEFINIDO":CLS:LOCATE 12,23:PRINT "EL MARGEN
     DE GANANCIA ES "MG$:PRINT :PRINT TAB(23)"(Pulse
     Cualquier Tecla para Continuar)"
2820 IF INKEY$="" THEN 2820
2830 INM=1
2840 RETURN
2850 W=WF
2860 GOSUB 2210
2870 IF FASET<=180 THEN 2920
2880 MG$="INDEFINIDO":CLS:LOCATE 12,23:PRINT "EL MARGEN
     DE GANANCIA ES "MG$:PRINT :PRINT TAB(23)"(Pulse
     Cualquier Tecla para Continuar)"
2890 IF INKEY$="" THEN 2890
2900 INM=1
2910 RETURN
2920 W=WO
2930 GOSUB 2210
```

```
2940 FASE1=FASET
2950 IF ABS(FASE1-180)>=PRES THEN 3000
2960 MG=-20*LOG(MODULO)/LOG(10)
2832 IF BP=1 THEN RETURN
2970 CLS:LOCATE 12,23:PRINT "EL MARGEN DE GANANCIA ES "MG:
     PRINT :PRINT TAB(23)"(Pulse Cualquier Tecla para
     Continuar)"
2980 IF INKEY$="" THEN 2980
2990 RETURN
3000 W=W+INCW
3010 ITER=ITER+1
3020 IF ITER >= 60 THEN CLS:LOCATE 5,1:INPUT "Se han
     realizado 60 iteraciones.  Ingrese un nuevo valor de
     presicion ",PRES:GOTO 2680
3030 GOSUB 2210
3040 FASE2=FASET
3050 IF ABS(FASE2-180)>=PRES THEN 3110
3060 MG=-20*LOG(MODULO)/LOG(10)
3070 IF BP=1 THEN RETURN
3080 CLS:LOCATE 12,23:PRINT "EL MARGEN DE GANANCIA ES "MG:
     PRINT :PRINT TAB(23)"(Pulse Cualquier Tecla para Continuar)"
3090 IF INKEY$="" THEN 3090
3100 RETURN
3110 IF (FASE1-180)*(FASE2-180)>0 THEN 3000
3120 W=W-INCW:INCW=INCW/2:GOTO 2930
3130 REM ***  SUBRUTINA PARA EL CALCULO DEL MARGEN DE FASE  ***
3140 ITER=0:CLS:INPUT "INGRESE VALOR DE PRESICION (Se
     recomienda 0.5) ",PRES
3150 W=WF:CLS:PRINT "ESPERE POR FAVOR ...."
3160 INCW=(WF-WO)/2
3170 GOSUB 2210
3180 IF MODULO<1 THEN 3230
3190 CLS:LOCATE 12,24:MF$="INDEFINIDO":PRINT "EL MARGEN
     DE FASE ES "MF$:PRINT TAB(20)"(Presione cualquier
     tecla para continuar)"
3200 IF INKEY$="" THEN 3200
3210 INM=1
3220 RETURN
3230 W=WO
3240 GOSUB 2210
3250 IF MODULO>1 THEN 3280
3260 GOTO 3190
3270 GOSUB 2210
3280 MOD1=20*LOG(MODULO)/LOG(10)
3290 IF ABS (MOD1)<E1 THEN 3440
3300 W=W+INCW
3310 ITER=ITER+1
3320 IF ITER<60 THEN 3370
3330 INPUT "Han Habido 60 iteraciones.  Ponga un nuevo
     valor de la presicion ",PRES
3340 W=WO
3350 INCW=(WF-WO)/2
3360 GOTO 3140
3370 GOSUB 2210
3380 MOD2=20*LOG(MODULO)/LOG(10)
3390 IF ABS(MOD2)<PRES THEN 3440
```

```
3850 RETURN
3860 W=WO
3870 INCW=(WF-WO)/2
3880 GOSUB 2050
3890 CA1=20*LOG(MODULO)/LOG(10)
3900 IF ABS(CA1+3)<=PRES THEN 4030
3910 W=W+INCW
3920 ITER=ITER+1
3930 IF ITER<60 THEN 3960
3940 INPUT "Se han realizado 60 iteraciones.
     Ingrese un nuevo valor de presicion ",PRES
3950 GOTO 3710
3960 GOSUB 2050
3970 CA2=20*LOG(MODULO)/LOG(10)
3980 IF ABS(CA2+3)<=PRES THEN 4030
3990 IF (CA1+3)*(CA2+3)>0 THEN 3910
4000 W=W-INCW
4010 INCW=INCW/2
4020 GOTO 3880
4030 IND=IND+1
4040 IF IND<>1 THEN 4170
4050 WAB=W
4060 MAG=20*LOG(MODULO)/LOG(10)
4070 W=WAB+4*INCW
4080 GOSUB 2050
4090 IF 20*LOG(MODULO)/LOG(10)>MAG THEN 4140
4100 IF BP=1 THEN RETURN
4110 CLS:LOCATE 12,24:AB=WAB-WO:PRINT "EL ANCHO DE BANDA ES
     "AB:PRINT TAB(23)"(Presione cualquier tecla para continuar)"
4120 IF INKEY$="" THEN 4120
4130 RETURN
4140 WO=W
4150 GOTO 3870
4160 IF BP=1 THEN RETURN
4170 CLS:LOCATE 12,24:AB=W-WAB:PRINT "EL ANCHO DE BANDA ES "AB:
     PRINT TAB(23)"(Presione cualquier atecla para continuar)"
4180 IF INKEY$="" THEN 4180
4190 RETURN
4200 '****  SUBRUTINA DEL CALCULO DE ERRORES   ****
4210 '****  ERROR DE POSICION  ****
4220 IF K(1)<>(C(0)-A(0))/KG THEN 4260
4230 EP=0:CLS:LOCATE 12,23:PRINT "EL ERROR DE POSICION ES "EP:PRINT
     :PRINT TAB(23)"(Pulse Cualquier Tecla para Continuar)"
4240 IF INKEY$="" THEN 4240
4250 RETURN
4260 EP=1-KG*C(0)/(A(0)+KG*K(1))
4270 CLS:LOCATE 12,23:PRINT "EL ERROR DE POSICION ES "EP:PRINT
     :PRINT TAB(23)"(Pulse Cualquier Tecla para Continuar)"
4280 IF INKEY$="" THEN 4280
4290 RETURN
4300 '****  ERROR DE VELOCIDAD  ****
4310 IF K(1)=C(0)-A(0)/KG THEN 4350
4320 EV$="INFINITO":CLS:LOCATE 12,23:PRINT "EL ERROR DE VELOCIDAD
     ES "EV$:PRINT :PRINT TAB(23)"(Pulse Cualquier Tecla para Contin

4330 IF INKEY$="" THEN 4330
```

```
4760 GOTO 4700
4770 CLS:LOCATE 5,24:PRINT "****  GRAFICOS  ****"
4780 LOCATE 8,27:PRINT "1. Graficos de Bode"
4790 LOCATE 10,27:PRINT "2. Ganancia vs. Margen de Ganancia y Fase"
4800 LOCATE 12,27:PRINT "3. Grafico Comparativo"
4810 LOCATE 14,27:PRINT "4. Imprimir"
4820 LOCATE 16,27:PRINT "5. Regreso al menu de Analisis"
4830 LOCATE 20,1:INPUT "Introducir Eleccion (1-5)_";SEC%
4840 IF SEC%<1 OR SEC%>5 THEN 4830
4850 IF SEC%=5 THEN 920
4860 ON SEC% GOSUB 4880,5380,5770,5150
4870 GOTO 4770
4880 CLS:INPUT "INGRESE EL INCREMENTO DE FRECUENCIA (se recomien-
     da 0.2) ";INCW
4890 PART=WF/INCW+1:CLS:PRINT "ESPERE POR FAVOR...."
4900 DIM VW(PART),VMA(PART),VFA(PART),VMC(PART),VFC(PART)
4910 P=0
4920 FOR W=WO TO WF STEP INCW
4930 P=P+1
4940 GOSUB 2210
4950 IF MODULO=0 THEN VMC(P)=0:GOTO 4970
4960 VMA(P)=20*LOG(MODULO)/LOG(10)
4970 VFA(P)=FASET-360
4980 GOSUB 2050
4990 IF MODULO=0 THEN VMA(P)=0:VF(P)=0:GOTO 5020
5000 VMC(P)=20*LOG(MODULO)/LOG(10)
5010 VFC(P)=FASET-360
5020 VW(P)=LOG(W)/LOG(10)
5030 NEXT
5040 ACOP=1
5050 OPEN "O",1,"B:ACOP.DAT"
5060 PRINT# 1,ACOP
5070 CLOSE# 1
5080 OPEN "O",2,"b:DIAG.DAT"
5090 FOR X=1 TO P
5100 PRINT# 2,VW(X);VMA(X);VFA(X);VMC(X);VFC(X)
5110 NEXT X
5120 CLOSE #2:ERASE VW,VMA,VFA,VMC,VFC
5130 SHELL "SYMPHONY
5140 RETURN
5150 SHELL "ACCESS
5160 RETURN
5170 '***  SUBRUTINA PARA CALCULO DE SENSIBILIDAD  ***
5180 CLS:INPUT "Escoja: (1) Planta Variable;(2) Funcion de
     Realimentacion Variable ",VA
5190 IF VA<1 OR VA>2 THEN 5180
5200 BP=1:INM=0:GOSUB 3700
5210 BP=0:IF INM=1 THEN 5350
5220 CLS:PRINT "POR FAVOR ESPERE ...."
5230 W=WAB
5240 IF VA=1 THEN 5300
5250 GOSUB 2210
5260 RE(0)=MODULO*COS(FASET*3.141593/180):IM(0)=MODULO*SIN(FASET
     *3.141593/180)
5270 RE(1)=1+RE(0):IM(1)=IM(0)
```

```
5280 GOSUB 2490
5285 IF BR=1 THEN RETURN
5290 GOTO 5320
5300 RE(0)=1:IM(0)=0
5310 GOSUB 2490
5315 IF BR=1 THEN RETURN
5320 CLS:LOCATE 12,27:PRINT "Sensibilidad=" MODULO:PRINT TAB(23)
     "(Presione cualquier tecla para continuar)
5330 IF INKEY$="" THEN 5330
5340 RETURN
5350 CLS:LOCATE 12,27:PRINT "Sensibilidad=indefinida a la frecuecia
     de -3dB":PRINT TAB(23) "(Presione cualquier tecla para continua
5360 IFINKEY$="" THEN 5360
5370 RETURN
5380 '***  SUBRUTINA PARA EL CALCULO DE DATOS DEL GRAFICO DE
     GANANCIA vs. MARGEN DE GANANCIA Y FASE***"
5390 CLS:PRES=.5
5400 W=WO
5410 ITER=0
5420 INM=0
5430 BP=1
5440 P=0
5450 PRINT "Ingrese la Variacion de Ganancia:"
5460 INPUT "DESDE= ",KO
5470 INPUT "HASTA= ",KF
5480 INPUT "EN PASOS DE= ",KP
5490 DIM MG(KF/KO+1),MF(KF/KO+1)
5500 FOR KG=KO TO KF STEP KP
5510 P=P+1
5520 GOSUB 2680
5530 IF INM=1 THEN 5760
5540 MG(P)=MG
5550 ITER=0
5560 GOSUB 3150
5570 IF INM=1 THEN 5760
5580 MF(P)=MF
5590 NEXT
5600 ACOP=2
5610 OPEN "O",1,"B:ACOP.DAT"
5620 PRINT# 1,ACOP
5630 CLOSE# 1
5640 OPEN "O",2,"B:ESTABILI.DAT"
5650 FOR X=1 TO P
5660 PRINT# 2,KO,MG(X)
5670 KO=KO+KP
5680 NEXT
5690 FOR X=P TO 1 STEP -1
5700 PRINT# 2,KF,MF(X)
5710 KF=KF-KP
5720 NEXT
5730 CLOSE #2:ERASE MF,MG
5740 BP=0
5750 SHELL "SYMPHONY
5760 RETURN
5770 '***  SUBRUTINA DE CALCULO DE DIAGRAMAS DE COMPARACION  ***
```

```
5780 CLS:BR=1:BP=1: INPUT "Ingrese el incremento de frecuencia
     (se recomienda .2) ",INCW
5790 P=0:INPUT "Escoja: (1) Planta variable; (2) Funcion de
     Realimentacion variable ",VA
5800 IF VA<1 OR VA>2 THEN 5790
5810 PART= WF/INCW+1
5820 DIM VMC (PART), VFC (PART), VW (PART),VMC1 (PART),
     VFC1 (PART),VSE(PART),VSE1(PART)
5830 CLS: PRINT"Con los siguientes datos se realizaran los calculos:"
5840 PRINT
5850 GOSUB 1610
5860 CLS:INPUT "DESEA CAMBIAR DATOS (S/N) ", Y$
5870 PRINT "ESPERE POR FAVOR...."
5880 IF Y$ = "N" OR Y$="n" THEN 5910
5890 GOSUB 700
5900 CLS: PRINT "ESPERE POR FAVOR...."
5910 FOR W=WO TO WF STEP INCW
5920 P=P+1
5930 GOSUB 2050
5940 IF MODULO=0 THEN VMA(P)=0:VF(P)=0:GOTO 5970
5950 VMC(P)=20*LOG(MODULO)/LOG(10)
5960 VFC (P)= FASET-360
5970 VW(P)=LOG(W)/LOG(10)
5980 GOSUB 5220
5990 VSE(P)=MODULO
6000 NEXT
6005 CLS:PRINT "Escoja el Segundo Sistema"
6010 CLS:GOSUB 700
6020 CLS: PRINT  "ESPERE POR FAVOR...."
6030 P=0
6040 FOR W=WO TO WF STEP INCW
6050 P=P+1
6060 GOSUB 2050
6065 IF MODULO=0 THEN VMA(P)=0:VF(P)=0:GOTO 6090
6070 VMC1(P)=20*LOG(MODULO)/LOG(10)
6080 VFC1(P)= FASET-360
6090 VW(P)=LOG(W)/LOG(10)
6100 GOSUB 5220
6110 VSE1(P)=MODULO
6120 NEXT
6130 ACOP=3
6140 OPEN "O",1,"B:ACOP.DAT"
6150 PRINT# 1,ACOP
6160 CLOSE# 1
6170 OPEN "O",3,"B:COMB.DAT"
6180 FOR X=1 TO P
6190 PRINT# 3,VW(X),VMC(X),VFC(X),VSE(X)
6200 NEXT
6210 FOR X=P TO 1 STEP -1
6220 PRINT# 3,VW(X),VMC1(X),VFC1(X),VSE1(X)
6230 NEXT
6240 CLOSE # 3:ERASE VW,VMC,VFC,VMC1,VFC1,VSE,VSE1
6250 BR=0
6260 SHELL "SYMPHONY"
6270 RETURN
```

```
6280 CLS:PRINT "( Ponga EXIT para regresar a ANREES )"
6290 SHELL
6300 RETURN
6310 SYSTEM
```

IDENTIFICACION.-

ANálisis de REalimentacio de Estados (ANREES), Implementado para la facultad de Ingeniería Eléctrica, área de Control.

Descripción del Problema a Resolverse.-

Análisis de Estabilidad, Velocidad, Exactitud, Sencibilidad, de Sistemas Realimentador por Variables de Estado.

Descripción del Método de Solución.-

Análisis en el dominio de la respuesta de frecuencia con diagramas de Bode.

MODO DE EMPLEO.

A continuación se describen los pasos a seguirse:

1.- Ingrese disco con el sistema operativo para luego prender el computador.

2.- Tipear el comando BASICA .

3.- Presionar tecla [F3] ANREES

4.- Presionar la tecla [F2]

5.- Escojer la opción 1 (uno)

6.- Incresar los datos

7.- El usuario puede seleccionar cualquiera des las opciones

MODO DE UTILIZACION DE GRAFICOS

1.- Disponer de disco para datos .

2.- Disponer del programa SYMPHONY.

3.- Seguir instrucciones dadas por el programa principal.

4.- Presionar tecla [P].

5.- Presione tecla [I].

6.- Seguir instrucciones dadas para escojer el o los gráficos

7.- Presione RETURN para acabar la selección.

8.- Revice que la impresora este lista a imprimir.

9.- Presione tecla [A].

10.- Presione tecla [G] .

11.- Si desea recresar al programa principal presione la tecla [E], por dos ocaciones, caso contrario regrese al paso 5.

```
***  SUBRUTINA GRAF  ***
{GOTO}AV1~{S}FISACOP.DAT~{IF AV1=1}{BRANCH AC4}
{IF AV1=2}{BRANCH AC30}
{IF AV1=3}{BRANCH AC40}
{goto}a1~{S}FISDIAG.DAT~
{M}GINU{right 4}~QPIMLA~Y
INU{RIGHT 2}~QPIFLA~Y
INU{right 5}~QPIMLC~Y
INU{right 3}~QPIFLC~YQ
{getNUMBER "ESCOJA: (1) Cambiar escalas;(2) Rregresar
al Menu de Graficos ",ai1}~
{if AI1=1}{branch AC13}~
{if AI1=2}{branch ac24}~
{BRANCH AC9}~
```

```
{goto}a2~{S}FISDIAG.DAT~
{M}GINU{right 2}~QPIMLA~Y
INU~QPIFLA~Y
INU{right 3}~QPIMLC~Y
INU{right 1}~QPIFLC~YQ
{getNUMBER "ESCOJA: (1) Cambiar escalas;(2) Rregresar
al Menu de Graficos ",ai1}~
{if AI1=1}{branch AC11}~
{if AI1=2}{branch ac22}~
{BRANCH AC7}~
{GETNUMBER "DE:(0) FAS.LA; (1) FAS.LC; (2) MOD.LA
;(3) MOD.LC ",AI5}~
{M}GINU{RIGHT +AI5}~QQ
{getlabel "Desea cambiar el eje X  (S-N)",AI2}~
{if ai2="N"#OR#AI2="n"}{branch ac16}~
{M}G2XTM{?}~{?}~QQQ
{getlabel "Desea cambiar el eje Y  (S-N)",AI3}~
{if aI3="N"#or#ai3="n"}{branch ac19}~
{M}G2YTM{?}~{?}~QQQ
{getnumber "Escoja Lineas: (0)horizontales; (1) Verticales
; (2) Las dos; (3) Ninguna ",aI4}~
{Menu}g2oq{right +ai4}~QQ
{BRANCH AC3}~
{S}EY
```

```
{IFA1 = 2} {BRANCH AC30}
{IFA1 =3} {BRANCH AC40}

{S} FIS ESTABILI.DAT~
{M} GINU {RIGHT 2}  QPIEST~ Y
{S} EY.

{S} FIS COMB.DAT~
{M} GINU {RIGHT 1}  QPC COMB I.~ Y
{S} EY.
```

B I B L I O G R A F I A

- WIBERG DONALD. Espacio de estado y sistemas lineales. Serie Schaum, Mc Graw Hill Inc., 1973.

- CHEN-CHI-TSONG. Introduction to linear systems theory. Holt, Rinchart, Winston, N.Y., 1970.

- RAVEN FRANCIS. Automatic control engineering, Mc Graw Hill. 1978.

- D'AZZO, J; HOUPIS, C. Linear control systems. Analisis and Design. Mc Graw Hill, N.Y., 1975.

- SHINNERS. Modern control systems (theory and applications). Addison - Wesley. 1972.

- GUPTA, HASDORFF. Fundamentals of automatic control, John Wiley &sons Inc., 1970.

- HALE. Introduction to control systems. Analysis and Desion. Prentice Hall Inc. 1973.

- LAYTON. Multivariable control theory. Peter Peregrinus Ltd., 1976.

- ZADEH, DESOER. Linear systems theory. The State Space Approach, Mc Graw Hill, 1963.

- OGATA K. Ingeniería de control moderna, Prentice Hall, 1980.