

JB

ESCUELA POLITECNICA NACIONAL

PROGRAMA PARA EL ESTUDIO DE ESTABILIDAD,
CRITERIO DEL LUGAR GEOMETRICO DE LAS RAICES

TESIS PREVIA A LA OBTENCION DEL TITULO DE
INGENIERO EN LA ESPECIALIZACION DE ELECTRONICA

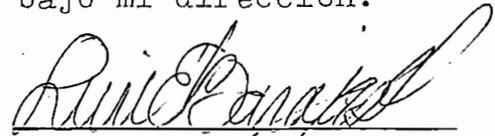
JORGE ANTONIO RAMIRO PAZMIÑO ASTUDILLO

QUITO - DICIEMBRE - 1.981

A mi esposa y
compañera

C E R T I F I C A C I O N:

Certifico que el presente trabajo ha sido realizado por el señor Ramiro Pazmiño, bajo mi dirección.

A handwritten signature in cursive script, appearing to read "Luis E. Barajas", written over a horizontal line.

Ing. Luis E. Barajas.

I N D I C E

	<u>Pág.</u>
INTRODUCCION	1
CAPITULO I. ESTUDIO DEL METODO DEL LUGAR GEOMETRICO DE LAS RAICES	5
1.1 Sistemas de Control	6
1.2 Clasificación de los sistemas de Control	7
1.3 Análisis de sistemas realimentados	11
1.4 Lugar geométrico de las raíces	14
1.4.1 Fundamento teórico	14
- Número de ramas	17
- Asíntotas	17
- Centroide	18
- LGR sobre el eje real	22
- Puntos de separación	24
- Argumentos de raíces complejas para el LGR	27
- Valor crítico de ganancia	28
1.4.2 Ejemplo de aplicación	29
1.5 Análisis en el dominio de la frecuencia	33
1.5.1 Margen de ganancia	33
1.5.2 Margen de fase	34
1.5.3 Ejemplo	34
1.6 Análisis en el dominio del tiempo	35

	<u>Pág.</u>
1.6.1 Sistemas de segundo orden	36
- Sobre nivel porcentual (S.P)	39
- Tiempo pico	39
- Tiempo de estabilización	40
 CAPITULO II. CONSTRUCCION Y DESCRIPCION DEL PROGRAMA	 44
2.1 Características del equipo	45
2.2 Descripción general	47
2.3 Diagrama de bloques	52
2.4 Diagrama de flujo	55
2.4.1 Entrada general de datos	57
2.4.2 Cálculo y evaluación de raíces y puntos de separación	60
2.4.3 Cálculo y grabación de puntos del LGR .	63
2.4.4 Determinación de archivos en diskette .	69
2.4.5 Análisis de estabilidad relativa	70
- Margen de ganancia y de fase	71
- Respuesta a entrada escalón	73
- Razón de amortiguamiento, dado un punto del LGR	73
- Razón de amortiguamiento, dado Ts y una banda	73
2.4.6 Cálculo de la ganancia para un punto ..	74
2.4.7 Graficación del LGR	74
2.4.8 Impresión de datos	75
2.4.9 Cambio de límites	75

	<u>Pág.</u>
2.4.10 Cálculo de puntos para una ganancia ...	76
CAPITULO III. EJEMPLOS DE APLICACION	77
- Ejemplo 3.1 Caso general	78
- Ejemplo 3.2 Variación de más de un parámetro ..	84
- Ejemplo 3.3 Aplicación en compensación	90
- Ejemplo 3.4 Ejercicios especiales	95
CAPITULO IV. CONCLUSICNES Y PERSPECTIVAS	110
4.1 Limitaciones	111
4.2 Conclusiones	112
4.3 Perspectivas	112
APENDICES.	113
APENDICE A. Reglas de construcción del LGR	114
APENDICE B. Simbología para los diagramas de flujo.	116
APENDICE C. Listado del programa	118
- Programa principal LGRPP	118
- Entrada general de datos LGREGD.....	128
- Cálculo y evaluación de las raíces, LGR CER	131
- Grabación, impresión y adicionales, LGR GIE	138
- Listado de variables LGRLV	
APENDICE D.	147
APENDICE E.	153
BIBLICGRAFIA	161

INTRODUCCION

La interdependencia de las cosas en la naturaleza; de los hombres entre sí; de las máquinas; y de los hombres con las máquinas, dan la posibilidad de pensar en sistematizar sus relaciones, y; si fuera del caso, tratar de dominar su comportamiento.

Esta manera de enfocar determinadas situaciones en forma esquemática y científica da origen a la ciencia de los sistemas de control, siendo una de sus principales metas establecer una acción de control sobre un sistema determinado y analizar si este control se hace posible; en qué medida; con qué limitaciones se encontraría; cuál sería su estabilidad en función de los parámetros propios del sistema, etc; lo que lleva inicialmente a intentar expresar los componentes del mismo, y sus relaciones; con operaciones matemáticas lineales que las representen; campo del cual se ocupa la "Teoría de sistemas lineales", que supone una relación de causa-efecto para esos componentes y la construcción de un modelo matemático afín.

La pregunta de si un determinado sistema de control nos va a servir siempre o en algún rango; se contesta a

través del análisis de la estabilidad absoluta y relativa de un sistema; utilizando diversos métodos tanto analíticos como gráficos; contándose entre éstos últimos como el más importante el denominado "Método del lugar geométrico de las raíces" puesto que permite cálculos exactos de la respuesta en el dominio del tiempo; y facilidad de información para la respuesta en el dominio de la frecuencia.

La complejidad de cálculos analíticos que deben realizarse para construir el lugar geométrico de las raíces; crecen en forma geométrica con el número de raíces del sistema; pero, a pesar de complejos, los cálculos, son similares puesto que el único parámetro variable es la ganancia del sistema lo que nos da la pauta para tratar de entregar este repetitivo trabajo a una rutina automática que pueda ser procesada por un computador.

La idea, en sí misma, no es nueva y ya en 1977 el ahora Ing. Diderot Barreto escribió y probó (como tema de su Tesis) rutinas en lenguaje FORTRAN IV que permitían realizar el esbozo del lugar geométrico de las raíces en una impresora IBM 3203 conectada a un computador IBM 370/125, perteneciente al Centro de Cómputo de la Escuela Politécnica Nacional. Evidentemente el gráfico que resulta es aproximado puesto que debe hacerse en forma discreta y con carac

teres de impresión; por esto, al presentarse la factibilidad de construir un gráfico continuo para además procesar y obtener informaciones adicionales para análisis, diseño y compensación; se impulsó decididamente esta idea, especialmente por parte del Ing. Luis Enrique Barajas quien dirigió el presente trabajo.

Esta posibilidad reside en las facilidades de computación que actualmente posee la facultad de Ingeniería Eléctrica, consistentes en:

- Microcomputadora TEKTRONIX 4051 con capacidad de resolución gráfica de 1024 x 780 puntos; pantalla con 35 líneas de 72 caracteres cada una y 32 Kbytes de memoria.
- Grafizador digital interactivo 4662 con posibilidades para gráficos de hasta 10 x 15 pulgadas.
- Unidad de diskettes 4907 con capacidad de 630 Kbytes por diskette.
- Impresora 4641 con posibilidad de 180 caracteres por línea y velocidad de 180 caracteres por segundo.

El lenguaje de programación utilizado es el BASIC extendido que permite procesos en línea (on line), lo que le da un carácter conversacional de ingreso-proceso-ingresode datos.

Al efectuar una objetiva evaluación de las caracterís

ticas mencionadas anteriormente se concluye que para obtener el resultado deseado (gráfico del LGR^{*}); con limitada memoria; construcción de gráfico continuo; posibilidad de entrada / salida de datos al momento de ejecución; cálculos e información adicionales; y; diferente lenguaje; había que retomar el trabajo desde sus comienzos, lo que efectivamente se hizo.

El resolver todos los problemas daría la posibilidad de tener una herramienta de trabajo en el estudio de estabilidad; con ligeras modificaciones posibilitaría también realizar un análisis completo del LGR variando otros parámetros; y para utilizarse en compensación; todo esto especialmente por la información que se obtiene; el ser conversacional y poder tener todos los gráficos en un solo papel.

* LGR es el Lugar Geométrico de las Raíces.

CAPITULO I

ESTUDIO DEL METCDO
DEL LUGAR GEOMETRICO DE LAS RAICES

CAPITULO I

ESTUDIO DEL METODO DEL LUGAR GEOMETRICO DE LAS RAICES

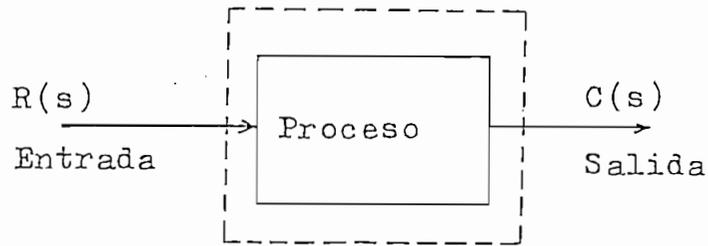
1.1 Sistemas de Control

Un sistema de control puede definirse como: " un arreglo de componentes físicos conectados de tal manera que el arreglo se pueda comandar, dirigir o regular a sí mismo o a otro sistema " (1).

Cuando se toma un sistema del mundo real; su estudio se efectúa a través de las relaciones matemáticas que existen entre sus elementos, lo cual generalmente establece ecuaciones diferenciales no lineales que al analizarse en un determinado rango nos aproxima a un sistema lineal; suponiendo una relación causa-efecto para sus componentes.

En un sistema de control esta relación causa-efecto se puede representar por la relación entrada-salida del proceso, donde se establece la entrada $R(s)$ al sistema como estímulo o excitación que recibe de una fuente externa para obtener una respuesta especificada denominada salida $C(s)$; la relación de la salida hacia la entrada llamaremos función de transferencia $T(s)$; que vendrá a ser una expresión matemática en función del operador de Laplace $s = \sigma + j\omega$ aplicado a los elementos y condiciones del sistema.

En forma esquemática tendríamos:



siendo
$$T(s) = \frac{C(s)}{R(s)} \quad (1-1)$$

1.2 Clasificación de los sistemas de control

De acuerdo a la forma como se establece la acción de control para producir una salida deseada, los sistemas de control pueden clasificarse como:

a) De lazo abierto: En el que la acción de control es independiente de la salida, y se efectúa a través de un regulador o actuador de control, cuya exactitud está directamente relacionada con su calibración. Calibrar en este caso, es establecer la relación de entrada-salida.

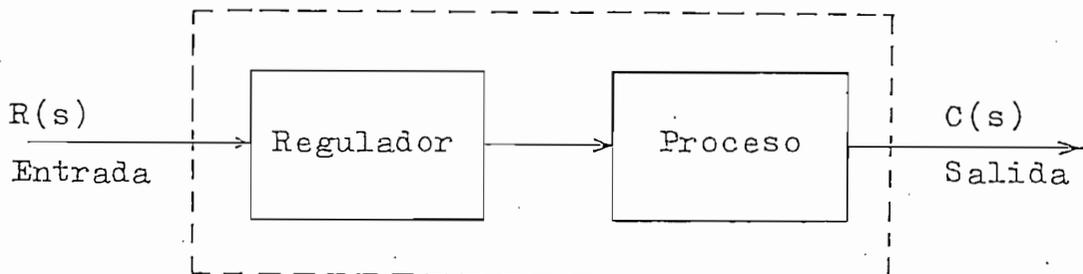


FIG. 1.1 Sistema de control de lazo abierto

b) De lazo cerrado: En el que la acción de control depende de la salida obtenida; al tratar de mantener una relación prescrita utilizando como referencia la señal de entrada (donde generalmente se coloca la salida teórica deseada) y, la señal de salida; la mayor o menor diferencia se toma como medio de control; lo que generalmente se denomina realimentación.

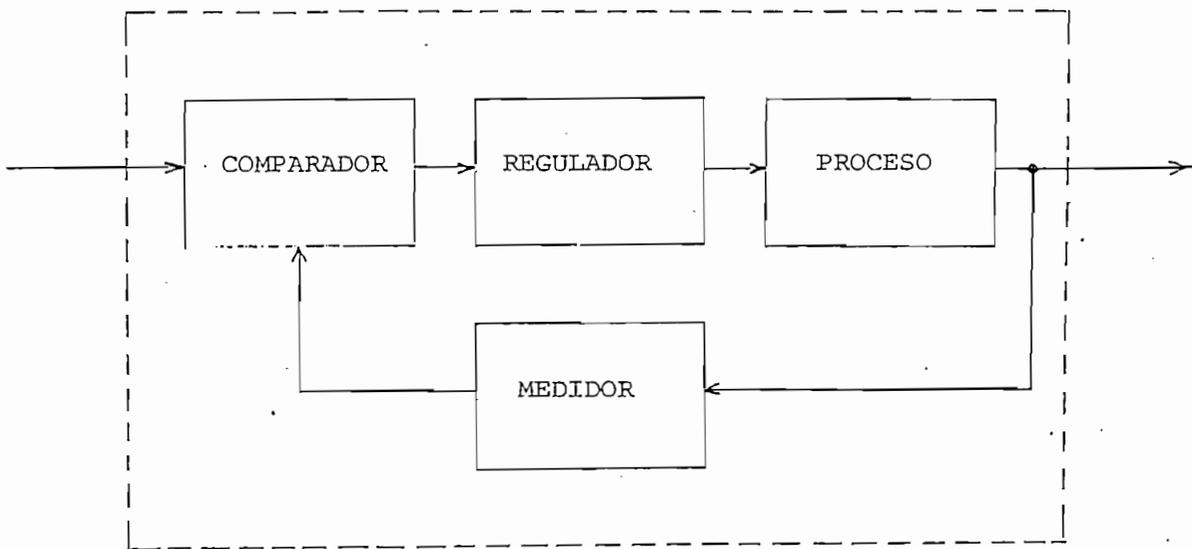


FIG. 1.2 Sistema de control de lazo cerrado

La presencia de realimentación en un sistema, le da ciertas características especiales como:

- Aumento en la exactitud, o sea el grado de semejanza de la salida real a la salida deseada.
- Reducción de la sensibilidad a las variaciones en las características del sistema o sus componentes.
- Reducción de los efectos debidos a no linealidad o distorsión.

- Aumento del rango de frecuencias a la entrada, en las que responde satisfactoriamente el sistema (ancho de banda).
- Por la suma de señales a la entrada, existe tendencia a la oscilación o a la inestabilidad.

Utilizando diagrama de bloques como el de la FIG. 1.3 podemos establecer la forma canónica de un sistema realimentado de la siguiente manera:

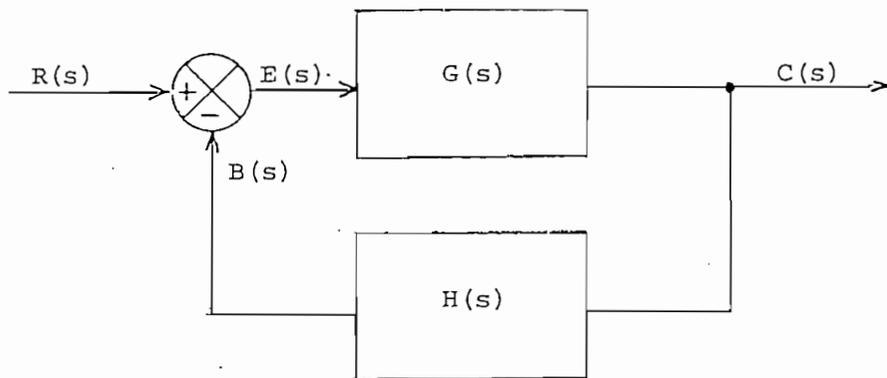


FIG. 1.3 Sistema de control por realimentación

donde:

$R(s)$ = señal de entrada (referencia)

$C(s)$ = señal de salida

$B(s)$ = señal realimentada

$E(s)$ = señal de error

$G(s) = C(s)/E(s)$ = función de transferencia de lazo directo

$T(s) = C(s)/R(s)$ = función de transferencia de lazo cerrado

$H(s)$ = función de transferencia del lazo de realimentación

$G(s)H(s)$ = función de transferencia de lazo abierto

La función de transferencia de lazo cerrado $T(s)$ se puede expresar en función de $G(s)$ y $H(s)$; sabiendo que:

$$C(s) = G(s).E(s) \quad (1-2)$$

$$B(s) = H(s).C(s) \quad (1-3)$$

y la señal de error es:

$$E(s) = R(s) - B(s) \quad (1-4)$$

sustituyendo la ecuación (1-4) en (1-2) tenemos:

$$C(s) = G(s). (R(s) - B(s)) \quad (1-5)$$

y (1-3) en (1-5)

$$C(s) = G(s). (R(s) - H(s).C(s)) \quad (1-6)$$

de donde:

$$C(s) = G(s).R(s) - G(s).H(s).C(s)$$

o sea

$$C(s).(1 + G(s).H(s)) = G(s).R(s)$$

por lo tanto la función de transferencia de lazo cerrado, para realimentación negativa será:

$$T(s) = \frac{C(s)}{R(s)} = \frac{G(s)}{1 + G(s)H(s)} \quad (1-7)$$

es evidente que si la realimentación es positiva, la única diferencia se establece en el comparador (ecuación 1-4)

o sea, el signo del segundo sumando del denominador.

El polinomio característico del denominador igualado a cero, nos da la ecuación característica y los polos del sistema.

1.3 Análisis de sistemas realimentados

Las características principales a determinarse en el análisis de un sistema realimentado son:

- Grado de estabilidad; especialmente, su tendencia a volverse inestable o no; lo que se llama estabilidad relativa.
- Respuesta del sistema en estado estacionario.
- Respuesta del sistema a transitorios.

La estabilidad y las características de los sistemas lineales se puede establecer mediante diversos criterios como:

- La respuesta impulsional, o sea si el valor absoluto de la respuesta a un impulso, $g(t)$ integrada sobre un rango finito; es infinito; lo que es igual a obtener la transformada inversa de Laplace de la función de transferencia del sistema.
- La obtención de la matriz de transición por transformada de Laplace; cuando usamos el método de la variable de es

tado.

- Todos los polos de la función de transferencia deben tener partes reales negativas; ya que la respuesta de salida a una entrada impulso (que debe ser finita) está en función de $e^{\sigma_k t}$, siendo σ_k las raíces de la ecuación característica.

Los criterios mencionados anteriormente, son difíciles de aplicar en la práctica; por lo que los métodos de análisis más comunmente utilizados, son:

- Criterio de Routh-Hurwitz; método algebraico que construye un determinado arreglo con los coeficientes de la ecuación característica; y por el número de cambios de signo, advierte cuántas raíces tienen parte real positiva; este método se usa para determinar la estabilidad absoluta; para estabilidad relativa se deben hacer otras consideraciones.

Y varios métodos gráficos:

- Criterio de Nyquist; en coordenadas polares; indica la diferencia entre el número de polos y de ceros de la función de transferencia en lazo cerrado, situados en la región real positiva del plano s , observando el comportamiento del lugar de Nyquist de la función de transferencia de lazo abierto.

- Diagrama de Bode; similar al anterior; para funciones de transferencia de fase mínima, con dos gráficos en coordenadas rectangulares correspondientes, uno a la magnitud de $GH(j\omega)$ en dB y otro al ángulo de fase $\angle GH(j\omega)$; respecto al valor de ω .
- Carta de Nichols; que trata de brindar las posibilidades del lugar de Nyquist y las facilidades de los diagramas de Bode en un solo gráfico de coordenadas rectangulares, con la representación de $|GH(j\omega)|$ en dB, en función de $\angle GH(j\omega)$.
- Lugar geométrico de las raíces; realiza un mapa de polos y zeros de la función de transferencia de lazo abierto, $GH(s)$ mediante la variación de la ganancia K , lo que en la práctica es encontrar el desplazamiento de los polos de lazo cerrado, que son en definitiva los que dan la medida de la estabilidad del sistema.

De los métodos mencionados anteriormente, los tres primeros pertenecen al dominio de la frecuencia y el último (motivo de este trabajo) es útil en la práctica para poder ajustar parámetros del sistema y obtener raíces que presenten un comportamiento predeterminado; también es útil para realizar compensación mediante la inclusión de redes de adelanto o atraso cuyo efecto es fácilmente detectable en el lugar de las raíces.

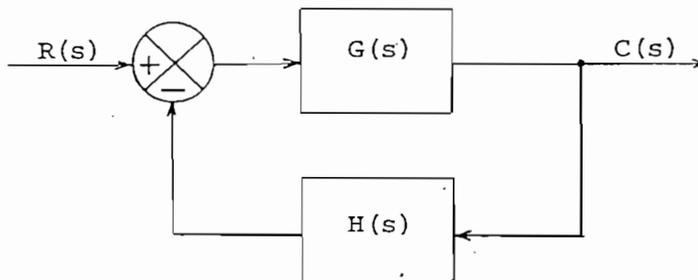
1.4 Lugar Geométrico de las Raíces (LGR)

Este método fue creado por W.R.Evans en 1948 y se ha desarrollado y difundido ampliamente hasta la actualidad.

La técnica del lugar geométrico de las raíces es un método gráfico para dibujar en el plano s , el desplazamiento de las raíces de la ecuación característica a medida que varía un parámetro; con lo que también proporciona una medida de la sensibilidad de las raíces del sistema a la variación de ese parámetro.

1.4.1 Fundamento Teórico

Habíamos visto que en un sistema realimentado, la función de transferencia de lazo cerrado en forma canónica se define como:



$$\frac{C(s)}{R(s)} = \frac{G(s)}{1+G(s)H(s)} \quad (1-7)$$

y la función de transferencia puede escribirse como:

$$G(s)H(s) = K \frac{N(s)}{D(s)} \quad (1-8)$$

de donde resulta:

$$\frac{C(s)}{R(s)} = \frac{G(s)}{1+GH(s)} = \frac{G(s)}{1+K.N(s)/D(s)} \quad (1-9)$$

la función de transferencia de lazo cerrado, quedaría:

$$\frac{C(s)}{R(s)} = \frac{G(s)D(s)}{D(s)+KN(s)}$$

siendo:

$$D(s)+KN(s) = 0 \quad (1-10)$$

la ecuación característica en función del parámetro K.

Si hacemos variar K de 0 a $+\infty$ obtendríamos las raíces de la ecuación característica para cada valor de K; esto es lo que forma el llamado lugar geométrico de las raíces.

Analizando la ecuación (1-10) para diferentes valores de K, tenemos:

- si $K=0$; las raíces corresponderán a los polos de $GH(s)$
- si $K \rightarrow \infty$; las raíces tienden a los ceros de $GH(s)$; o sea - que los lugares de los polos de lazo cerrado, se originan en los polos de lazo abierto y terminan en los ceros de lazo abierto (ceros finitos o infinitos).

De la función de transferencia de lazo cerrado (1-7) tenemos que la ecuación característica es:

$$1+GH(s)=0 \quad (1-11)$$

que es igual a:

$$GH(s)=-1$$

de donde:

$$|GH(s)| = 1 \quad (1-12)$$

y

$$\angle GH(s) = 180^\circ(2q+1) \quad \text{siendo: } q=0,1,2,\dots \quad (1-13)$$

si

$$N(s)=s^m + a_{m-1}s^{m-1} + \dots + a_0$$

ó

$$N(s)=\prod_{i=1}^m (s+z_i) \quad (1-14)$$

y

$$D(s)=s^n + b_{n-1}s^{n-1} + \dots + b_0$$

ó

$$D(s)=\prod_{j=1}^n (s+p_j) \quad (1-15)$$

siendo:

$m \neq n$ en la mayoría de los sistemas

z_i los ceros de lazo abierto

p_j los polos de lazo abierto

reemplazando (1-14) y (1-15) en (1-8) tendríamos:

$$GH(s) = \frac{K \prod_{i=1}^m (s-z_i)}{\prod_{j=1}^n (s-p_j)} \quad (1-16)$$

entonces:

$$\frac{|K| \prod_{i=1}^m (s-z_i)}{\prod_{j=1}^n (s-p_j)} = 1 \quad (1-17)$$

$$y \quad \sum_{i=1}^m \angle s-z_i - \sum_{j=1}^n \angle s-p_j = 180^\circ(2q+1) \quad (1-18)$$

De donde podemos concluir que "todo punto s que pertenece al LGR, debe cumplir con las ecuaciones (1-17) y (1-18)"

Número de ramas

Hemos establecido que el LGR, se origina en los polos y termina en los ceros de lazo abierto; con lo que el número de ramas independientes (N_i), es igual al número de polos (P). Si el número de ceros es menor que el de polos existirá N ramas que tiendan al infinito.

- ramas independientes $N_i = P$
- ramas al infinito $N = P - Z$

donde:

- P número de polos finitos de $GH(s)$
- Z número de ceros finitos de $GH(s)$

Asíntotas

Si tomamos un punto remoto que pertenezca al LGR; éste deberá cumplir con la ecuación (1-18) y por lo alejado del punto la contribución angular ϕ de todos los polos y ceros será esencialmente igual, por lo que el ángulo total será: $\phi (Z-P)$

entonces: $\phi (Z-P) = \pm 180^\circ (2q+1)$ (1-19)

o sea $\phi = \frac{2q+1}{P-Z} 180^\circ$ para $q=0,1,2,\dots,(P-Z-1)$

porque existen $N=P-Z$ ramas que tienden al infinito.

Centroide

Estamos analizando $GH(s)$ como un polinomio racional - (coeficientes reales); lo que origina raíces reales o pa res de raíces conjugadas dando como resultado que el LGR debe ser simétrico respecto del eje real.

Si analizamos la ecuación característica (1-11); escribiéndola como:

$$\frac{D(s)}{N(s)} + K = 0 \quad (1-20)$$

donde

$$-K = \frac{D(s)}{N(s)}$$

reemplazando

$$(1-14), (1-16): -K = \frac{s^n + b_{n-1}s^{n-1} + \dots + b_0}{s^m + a_{m-1}s^{m-1} + \dots + a_0} \quad (1-21)$$

si hacemos $N = n-m$, el resultado sería:

$$-K = s^N + (b_{n-1} - a_{m-1})s^{N-1} + \dots + R(s)/N(s)$$

considerando valores muy altos de s (lugares remotos); resultan despreciables el polinomio residuo $R(s)$ y desde el tercer término en adelante del cociente; quedando:

$$-K \simeq S^N + (b_{n-1} - a_{m-1}) S^{N-1} \quad (1-22)$$

$$\delta \quad -K \simeq S^N \left(1 + \frac{b_{n-1} - a_{m-1}}{S} \right)$$

extrayendo la raíz N

$$(-K)^{1/N} \simeq S \left(1 + \frac{b_{n-1} - a_{m-1}}{S} \right)^{1/N}$$

desarrollando por binomio de Newton

$$(-K)^{1/N} \simeq S \left(1 + \frac{1}{N} \frac{(b_{n-1} - a_{m-1})}{S} + \frac{1}{N \cdot N} \frac{(1-1)}{2!} \frac{(b_{n-1} - a_{m-1})^2}{S^2} + \dots \right) \quad (1-23)$$

donde los dos primeros términos son los más significativos quedando:

$$(-K)^{1/N} \simeq S \left(1 + \frac{b_{n-1} - a_{m-1}}{NS} \right) \quad (1-24)$$

o sea

$$(-K)^{1/N} \simeq S + \frac{b_{n-1} - a_{m-1}}{N}$$

tomando en cuenta que:

$$S = \sigma + j\omega \quad (1-25)$$

y haciendo

$$\sigma_c = \frac{b_{n-1} - a_{m-1}}{N} \quad (1-26)$$

tendríamos

$$(-K)^{1/N} \simeq \sigma + j\omega - \sigma_c \quad (1-27)$$

$$\delta \quad (-K + 0j)^{1/N} \simeq (\sigma - \sigma_c) + j\omega$$

también

$$(K(\cos \pi + j \operatorname{sen} \pi))^{1/N} \approx \sigma - \sigma_c + jw$$

usando la fórmula de Moivre, queda:

$$K^{1/N} \left(\cos \frac{\pi + 2\pi q}{N} + j \operatorname{sen} \frac{\pi + 2\pi q}{N} \right) \approx (\sigma - \sigma_c) + jw \quad (1-28)$$

donde $q = 0, 1, 2, \dots, N-1$

resolviendo:

$$K^{1/N} \cos \frac{2q + 1}{N} \pi + j K^{1/N} \operatorname{sen} \frac{2q + 1}{N} \pi \approx (\sigma - \sigma_c) + jw$$

igualando las partes real e imaginaria:

$$K^{1/N} \cos \frac{2q + 1}{N} \pi \approx \sigma - \sigma_c \quad (1-29)$$

$$K^{1/N} \operatorname{sen} \frac{2q + 1}{N} \pi \approx w \quad (1-30)$$

despejando $K^{1/N}$ de la ecuación (1-29) y reemplazando en (1-30):

$$\frac{\sigma - \sigma_c}{\cos \frac{2q+1}{N} \pi} \cdot \operatorname{sen} \frac{2q+1}{N} \pi = w$$

resultando

$$w = (\sigma - \sigma_c) \operatorname{tg} \frac{2q+1}{N} \pi \quad (1-31)$$

que es la ecuación de un haz de rectas en el plano S , con centro en el punto $\sigma_c + j0$ y pendientes de acuerdo a $\operatorname{tg} \frac{2q+1}{N} \pi$

El punto en el eje real $\sigma = \sigma_c$, es el centroide del LGR, donde se cortan las asíntotas levantadas con ángulo

$$\phi = \operatorname{arctg} \left(\operatorname{tg} \frac{2q+1}{N} \pi \right), \quad q = 0, 1, 2, \dots, N-1$$

Un polinomio racional $P(x)$, de grado n , se puede expresar en función de sus raíces como:

$$P(x) = x^n + (-\sum r_i)x^{n-1} + (\sum r_i r_j)x^{n-2} + (-\sum r_i r_j r_k)x^{n-3} + \dots \quad (1-32)$$

donde:

- el primer coeficiente es 1
- el segundo coeficiente es, menos la suma de las n raíces
- el tercer coeficiente es, la suma de los productos de las raíces de dos en dos
- etc.

Sabemos por la ecuación (1-26) que:

$$\sigma_c = \frac{-b_{n-1} + a_{m-1}}{N}$$

de acuerdo con (1-32), tendríamos que

$$b_{n-1} = -\sum_{i=1}^m p_i \quad (1-33)$$

$$a_{m-1} = -\sum_{j=1}^n z_j \quad (1-34)$$

siendo p_i y z_j los polos y ceros en lazo abierto;

además $N = n - m$

o sea $N = P - Z$

siendo P y Z el número de polos y ceros en lazo abierto, - reemplazando, el centroide del LGR se puede expresar como:

$$\sigma_c = \frac{\sum_{i=1}^n p_i - \sum_{j=1}^m z_j}{P - Z} \quad (1-35)$$

LGR sobre el eje real

Las contribuciones de los polos y ceros finitos al argumento de $GH(s)$ para puntos en el eje real se pueden analizar para:

a) Raíces complejas:

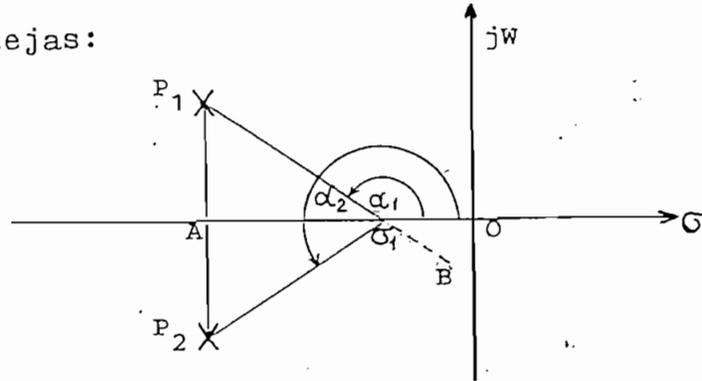


FIG. 1.4 Contribución angular de raíces complejas

Supongamos los polos conjugados P_1 y P_2 ; y un punto σ_1 en el eje real como en la FIG 1.4

$$\angle GH(s) = \alpha_1 + \alpha_2 \quad (1-36)$$

$$\alpha_1 = \angle A\sigma_1 B \quad (\text{opuestos por el vértice}) \quad (1-37)$$

$$\angle A\sigma_1 P_2 = \angle A\sigma_1 P_1 \quad (\text{bisectados por } A\sigma_1) \quad (1-38)$$

$$\angle A\sigma_1 P_1 = \angle B\sigma_1 O \quad (\text{opuestos por el vértice}) \quad (1-39)$$

$$\text{o sea: } \angle A\sigma_1 P_2 = \angle B\sigma_1 O \quad (1-40)$$

$$\angle A\sigma_1 B = \angle A\sigma_1 P_2 + \angle P_2\sigma_1 B \quad (1-41)$$

reemplazando (1-37) $\angle GH(s) = \widehat{A\sigma_1 B} + \alpha_2$

reemplazando (1-41) $\angle GH(s) = \widehat{A\sigma_1 P_2} + \widehat{P_2\sigma_1 B} + \alpha_2$

reemplazando (1-40) $\angle GH(s) = \widehat{B\sigma_1 O} + \widehat{P_2\sigma_1 B} + \alpha_2$

por lo tanto $\angle GH(s) = 2\pi \quad \delta \quad \angle GH(s) = 0^\circ$

Lo cual quiere decir que un ángulo para una raíz compleja se anula al sumarse con el ángulo de su conjugada; en definitiva, que las raíces complejas no contribuyen al argumento de $GH(s)$ para puntos sobre el eje real.

b) Raíces reales:

La contribución al argumento de $GH(s)$; de parte de polos reales y de ceros es de acuerdo a la posición que tienen respecto al punto σ_1 en el eje real, como se aprecia en la FIG 1.5.

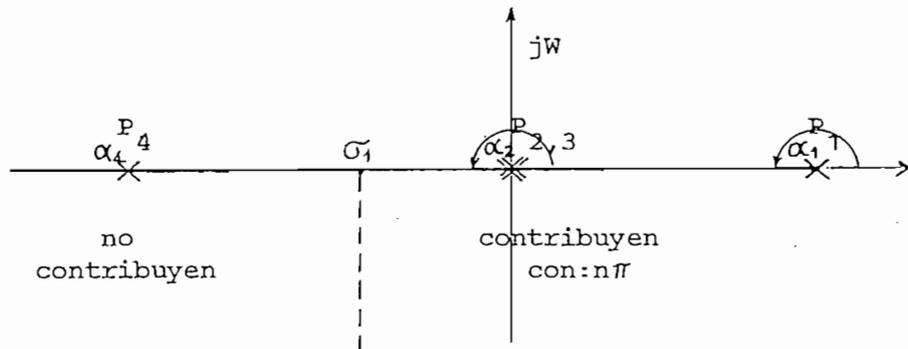


FIG. 1.5. Contribución angular de raíces reales

$$\alpha_1 = \pi$$

$$\alpha_2 = \alpha_3 = \pi$$

$$\alpha_4 = 0^\circ$$

$$\angle GH(s) = \alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3 + \alpha_4$$

$$\angle GH(s) = 3\pi$$

Para que σ_1 sea punto del LGR debe cumplir con la ecuación (1-18) o sea:

$$\angle GH(s) = (2q + 1)\pi \quad 0 < K < \infty$$

y de la figura 1.5 se establece que las únicas raíces que contribuyen; son las que se encuentran a la derecha del punto σ_1 , y cada una con π , entonces:

$$n\pi = (2q + 1)\pi$$

$$\text{o sea que } n = 2q + 1 \quad (q = 0, 1, 2, \dots)$$

lo que significa que n debe ser impar.

En definitiva; para que un punto sobre el eje real, sea punto del LGR (para K positivo) es condición necesaria y suficiente que se encuentre a la izquierda de un número impar de polos y/o ceros reales.

Puntos de separación

Si existen dos o más ramas del LGR que se encuentran en un punto, como en la FIG. 1.6, estas ramas se bifurcan simétricamente y a este punto se denomina punto de separación. Los valores que toma K en la FIG. 1.6 a, a medida que las ramas sobre el eje real se acercan al punto de separación s_1 es siempre mayor; mientras en la FIG. 1.6 b, es lo contrario; de donde deducimos que en un punto de separación s_1 el valor de K será máximo o mínimo, dependiendo de si llegan o parten las ramas del eje real.

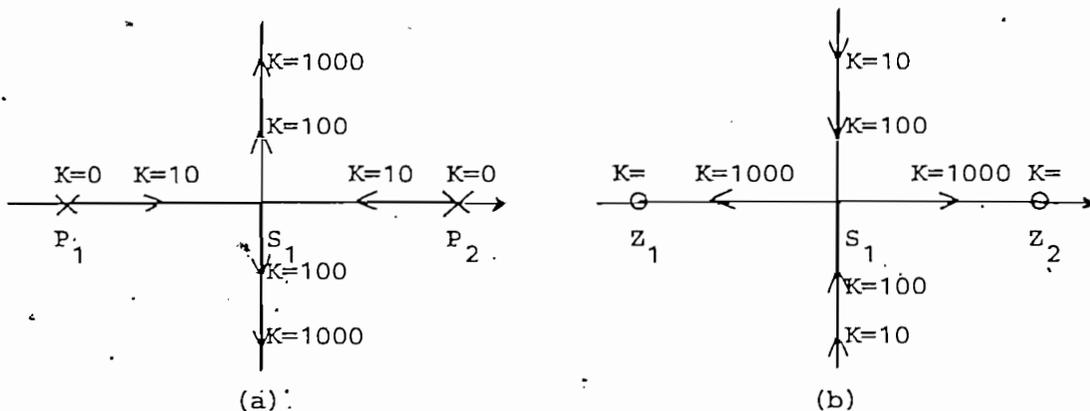


FIG. 1.6 Puntos de separación en el eje real. (a) Para ramas que llegan (K máximo). (b) Para ramas que parten (K mínimo)

Si tomamos la ecuación (1-10) y despejamos el valor de K , tendremos:

$$K = \frac{-D(s)}{N(s)} \quad (1-42)$$

derivando ambos miembros respecto a s :

$$\frac{dK}{ds} = - \frac{N(s)dD(s) - D(s)dN(s)}{(N(s))^2} \quad (1-43)$$

para hallar los puntos en el plano s , en los que K sea máximo o mínimo, igualamos (1-43) a cero, obteniendo:

$$N(s)dD(s) - D(s)dN(s) = 0 \quad (1-44)$$

que será una ecuación de orden $n + m - 1$; cuyas raíces cumplen una condición necesaria, aunque no suficiente, para ser puntos de separación. Para que una raíz de la ecuación (1-44), se pueda considerar como punto de separación, debe confirmarse que este punto sea del LGR ($-\infty < K < \infty$); o sea que cumpla con la ecuación característica.

Es importante además mencionar que el número de ramas

que llegan a un punto de separación es igual al número de ramas que salen, y este número es proporcional a la multiplicidad de puntos de separación. Cuando estos puntos se encuentran sobre raíces múltiples, solamente se aprecian las ramas que entran o que salen.

Debido a la simetría del LGR los ángulos de desplazamiento entre estas ramas es constante, a pesar que puede cambiar su valor por la influencia de otras raíces como se puede apreciar en el resumen para casos prácticos de la FIG. 1.7.*

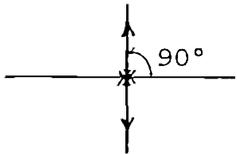
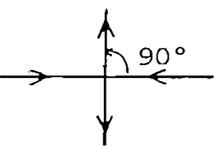
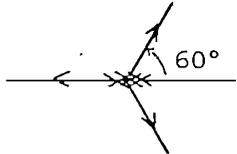
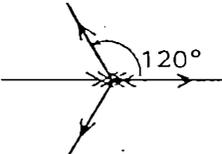
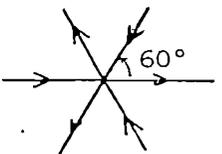
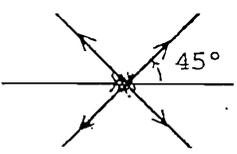
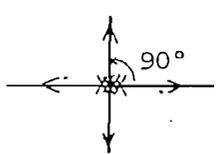
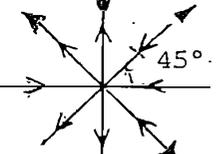
Puntos de separación	Sobre raíces múltiples	Con LGR a la derecha	No sobre raíces
1			
2			
3			

FIG. 1.7 Distribución de ramas en puntos de separación múltiples

*Existe un método práctico para hallar todos los puntos de separación, desarrollado en el libro de Benjamin Kuo.

Argumentos de raíces complejas para el LGR

Sabemos que todo punto del LGR debe cumplir con la ecuación de los argumentos (1-18); por lo que si tomamos un punto del LGR muy cercano a la raíz compleja en estudio; - como se aprecia en la FIG. 1.8, se pueden calcular las contribuciones angulares de cada una de las demás raíces y - por simple diferencia con $\pm (2q + 1)\pi$ hallar el ángulo con el que debería contribuir dicha raíz. Analíticamente tendríamos que siendo P_1, P_2, P_4 , y Z_1 los polos y ceros; y Q un punto del LGR muy cercano a Q debería cumplirse que:

$$\angle Z_1 - (\angle P_1 + \angle P_2 + \angle P_4) = \pm (2q + 1)\pi$$

o sea:

$$\theta_3 - (\theta_1 + \theta_2 + \theta_x) = \pm (2q + 1)\pi$$

por lo tanto

$$\theta_x = \theta_3 - (\theta_1 + \theta_2) - (\pm (2q + 1)\pi)$$

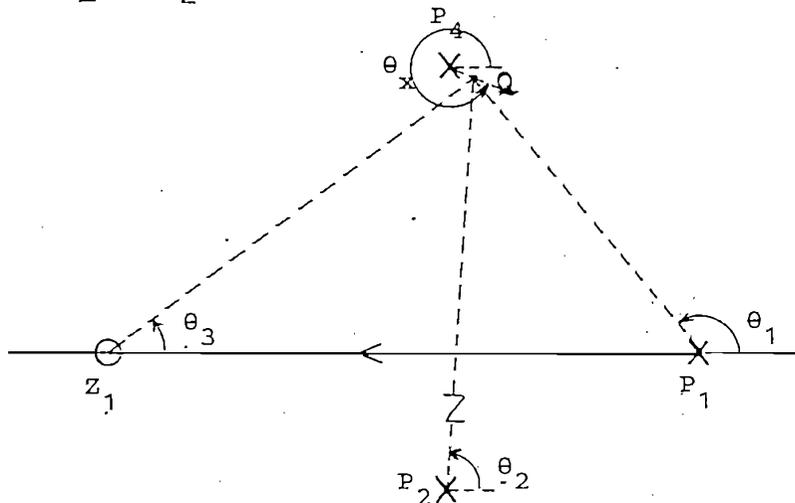


FIG. 1.8 Contribuciones angulares para un punto Q del LGR muy cercano a una raíz compleja

En este caso θ_x es el ángulo de salida puesto que P_4 es un polo; si fuese un cero sería el ángulo de llegada, ya que el LGR parte de los polos y llega a los ceros a medida que K varía de 0 a ∞ ; sin embargo el cálculo se efectuará según el mismo principio.

Generalizando, podríamos decir que el ángulo de llegada a un cero complejo será:

$$\theta_c = 180^\circ - \angle GH'(s) \quad (1-45)$$

y el ángulo de salida desde un polo complejo:

$$\theta_p = 180^\circ + \angle GH'(s) \quad (1-46)$$

donde $\angle GH'(s)$ es el ángulo de fase $GH(s)$ calculado en la raíz compleja, sin tomar en cuenta la contribución de esa raíz.

Valor de ganancia crítico

Es el valor máximo de ganancia para que el sistema no sea inestable, o sea que los polos del sistema no se encuentren en el semiplano derecho. Gráficamente sería, la ganancia en el punto de cruce del LGR con el eje imaginario; analíticamente se puede encontrar este valor por el método de Routh-Hurwitz.

Con todo el análisis expuesto hasta el momento, ya se podría tener una idea del desplazamiento de los polos del sistema (LGR); puesto que sabemos: donde comienza; donde termina; donde se encuentran o alejan varias ramas; los ángulos de salida o llegada a raíces complejas y la tendencia de los ramales hacia el infinito. Los puntos del LGR intermedios deben cumplir con la ecuación de los argumentos (1-18), esto, gráficamente se hace mediante un dispositivo mecánico desarrollado por el mismo Evans, llamado espirula que mediante la rotación de dos escalas graduadas efectúa la suma algebraica de los argumentos de cada polo o cero sobre un punto s_0 ; e inclusive con escalas adicionales puede hallar el módulo de $N(s_0)/D(s_0)$; sin embargo sigue siendo un tanteo para buscar puntos posibles del LGR.

1.4.2 Ejemplo 1-1

Dado el sistema de control de la FIG. 1.9, dibujar el LGR al variar K de 0 a ∞ .

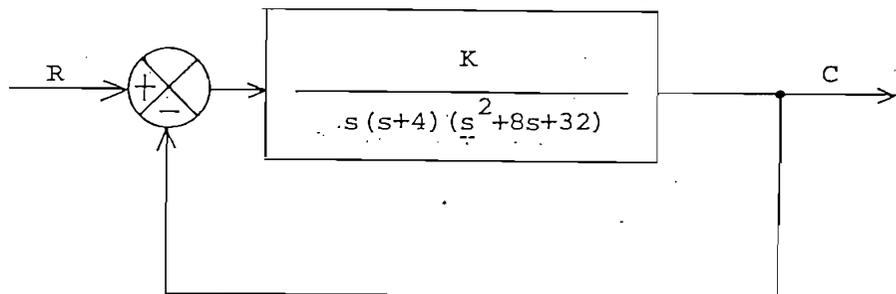


FIG. 1.9 Sistema realimentado para el ejemplo 1-1

La función de transferencia de lazo abierto será:

$$GH(s) = \frac{K}{s(s+4)(s^2+8s+32)}$$

existen dos polos en el eje real: $s_1=0$ y $s_2=-4$

y un par de polos conjugados en: $s_3, s_4 = -4 \pm j4$

ramas independientes: $N_i = P$ $N_i = 4$

ramas al infinito: $N = P-Z$ $N = 4$

-asíntotas: $\phi = \frac{2q+1}{P-Z} 180^\circ$ para $q = 0, 1, 2, \dots, (P-Z-1)$

$$q=0 \quad \phi = 45^\circ$$

$$q=1 \quad \phi = 135^\circ$$

$$\phi = \frac{2q+1}{4} 180^\circ \quad q=2 \quad \phi = 225^\circ$$

$$q=3 \quad \phi = 315^\circ$$

-Centroide:
$$\sigma_c = \frac{\sum_{i=1}^n P_i - \sum_{j=1}^m Z_j}{P-Z} = \frac{\sum_{i=1}^4 P_i}{4}$$

o sea
$$\sigma_c = \frac{0 + (-4) + (-4+j4) + (-4-j4)}{4} \quad \sigma_c = -3$$

LGR sobre eje real: existe desde $s_1 = 0$ hasta $s_2 = -4$

-Puntos de separación:

$$-K = s(s+4)(s^2+8s+32)$$

derivando respecto a s :

$$\frac{dK}{ds} = -(4s^3 + 36s^2 + 128s + 128) = 0$$

$$\text{entonces } s^3 + 9s^2 + 32s + 32 = 0$$

$$\text{cuyas raíces son: } s_1 = -1.6 \quad \text{y } s_2, s_3 = -3.7 \pm j2.5$$

el único punto de separación válido estará en $s_p = -1.6$ y dejará el eje real con ángulos de 90° y 270° ,

-ángulo de salida desde $-4 + j4$:

$$\theta_p = 180^\circ + \angle GH'(s)$$

como:

$$\angle GH'(s) = -(\theta_1 + \theta_2 + \theta_4)$$

$$\text{y } \theta_1 = 135^\circ, \theta_2 = 90^\circ \text{ y } \theta_4 = 90^\circ$$

entonces:

$$\angle GH'(s) = -315^\circ$$

por lo tanto

$$\theta_p = 180^\circ - 315^\circ \qquad \theta_p = -135^\circ$$

por simetría el ángulo de salida desde $-4-j4$ será: $\theta_p = 135^\circ$

-valor de ganancia crítico:

utilizando el método de Routh-Hurwitz con la ecuación característica del sistema,

$$s^4 + 12s^3 + 64s^2 + 128s + K = 0$$

la tabla de Routh sería:

s^4	1	64	K
s^3	12	128	0
s^2	$160/3$	K	
s^1	$5120-9K$	0	
s^0	40		
	K		

para que en la primera columna no aparezca un cambio de signo debe cumplirse:

$$K > 0 \quad \text{y} \quad \frac{5120 - 9K}{40} > 0$$

de donde $0 < K < 569$

y $K = 569$ sería la ganancia crítica,

reemplazando en la ecuación característica tendríamos

$$s^4 + 12s^3 + 64s^2 + 128s + 569 = 0$$

cuyas raíces serían: $s_1, s_2 = \pm 2.53 + j0$

$$s_3, s_4 = 0 \pm j 3.25$$

Con todos los datos obtenidos hasta el momento podríamos hacer un esbozo bastante aproximado del LGR, como se presenta en la FIG. 1.10

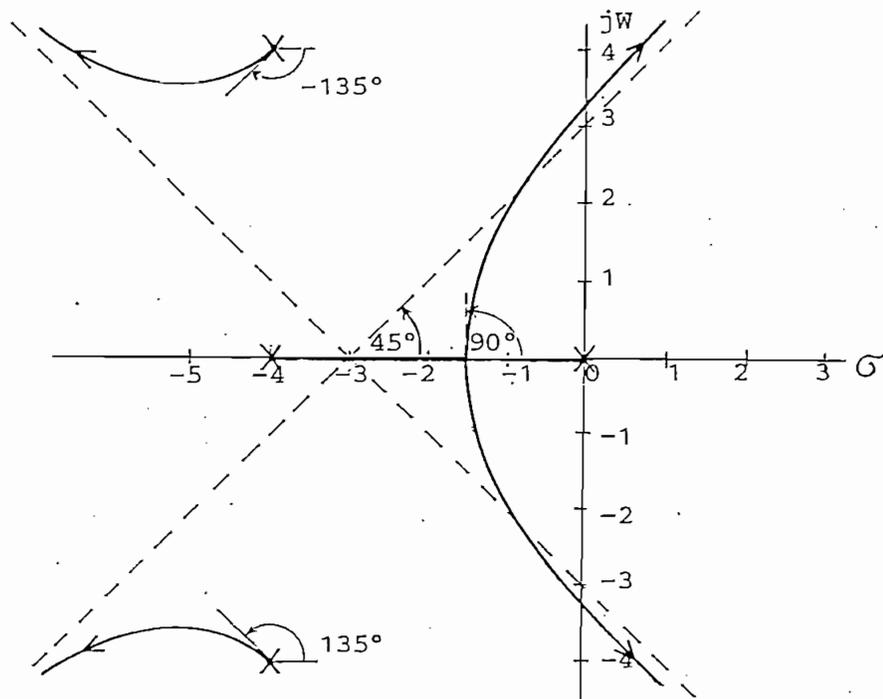


FIG. 1.10. LGR para el ejemplo 1-1

1.5 Análisis en el dominio de la frecuencia

Se establece al estudiar la respuesta de $|GH(j\omega)|$ y $\angle GH(j\omega)$ en función de ω como se indica en la figura 1.11, aplicándolo al LGR.

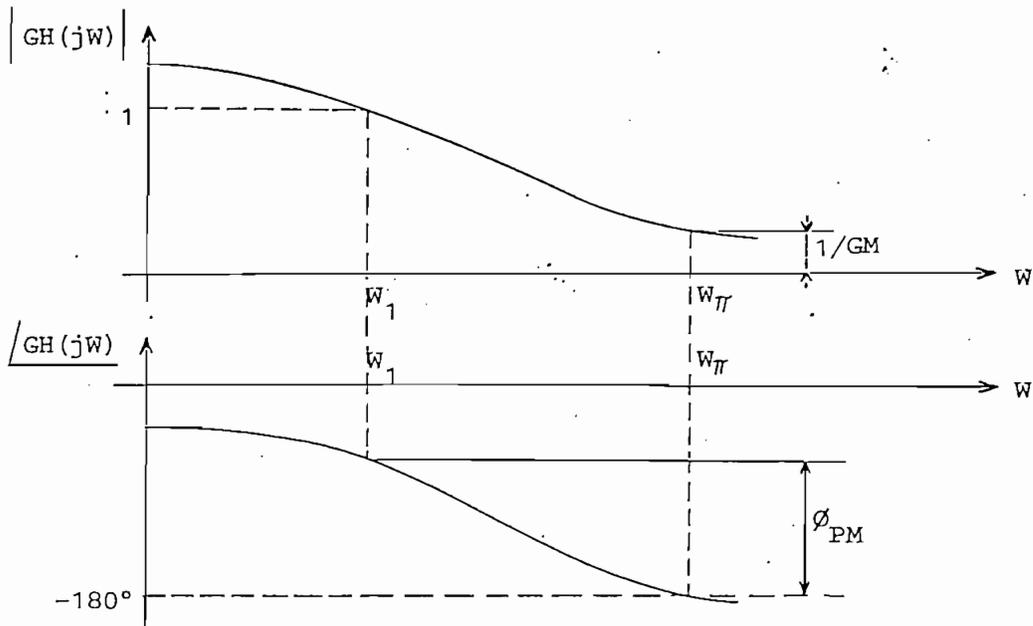


FIG. 1.11 Respuestas típicas de un sistema realimentado en el dominio de la frecuencia.

1.5.1 Margen de ganancia (GM)

Se encuentra en el punto de margen de fase nulo $j\omega_\pi$; de corte del LGR con el eje imaginario, donde ω_π es la frecuencia del cruce de fase. Se define como:

$$GM = \frac{1}{|GH(j\omega_\pi)|} \quad (1-47) \quad \text{y} \quad \angle GH(j\omega_\pi) = -180^\circ \quad (1-48)$$

en la práctica será:

$$GM = \frac{K \text{ crítico (en cruce con } j\omega)}{K_o \text{ (ganancia estática)}} \quad (1-49)$$

o sea, GM es el factor por el que puede multiplicarse K_o , antes de que el sistema de lazo cerrado se vuelva inestable.

1.5.2 Margen de fase (ϕ_{PM})

Se encuentra en el punto $j\omega_1$ donde $|GH(j\omega_1)| = 1$ para el valor de ganancia estática K_o , siendo ω_1 la frecuencia del cruce de ganancia. Se define como:

$$\phi_{PM} = 180^\circ + \angle GH(j\omega_1)$$

de (1-20) sabemos que

$$-K = \frac{D(s)}{N(s)}$$

y además $K = K_o K_a$ (1-50)

entonces $\left| \frac{D(j\omega_1)}{N(j\omega_1)} \right| = K_o$ (1-51)

que en la práctica se encuentra efectuando tanteos en el LGR sobre el eje imaginario hasta hallar que:

$$\left| GH(j\omega_1) \right| = 1/K_o \quad (1-52)$$

1.5.3 Ejemplo 1-2

En el sistema cuyo diagrama de bloques y LGR se indi-

can en la FIG. 1.12, encontrar a) el margen de ganancia y
b) el margen de fase.

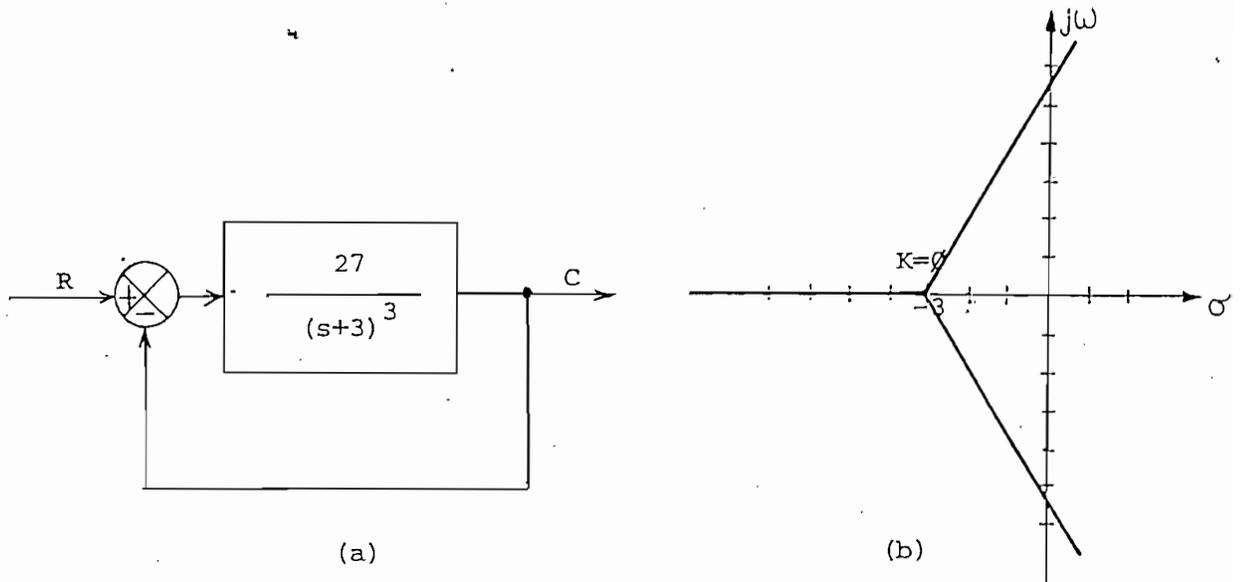


FIG. 1.12 a) Diagrama de bloques y b) LGR del ejemplo 1-2

a) $K_{\text{crítico}} (\text{corte con } j\omega) = 216$

$K_0 (\text{ganancia estática}) = 27$

$$GM = \frac{K_{\text{crítico}}}{K_0} = 8$$

$$GM = 8$$

b) $\left| GH(j\omega_1) \right| = \left| \frac{27}{(j\omega_1 + 3)^3} \right| = 1$

para: $\omega_1 = 0$

$$\angle GH(j\omega_1) = \angle GH(0) = 0^\circ$$

$$\begin{aligned} \phi_{PM} &= 180^\circ + \angle GH(j\omega_1) \\ &= 180^\circ + 0^\circ \end{aligned}$$

$$\phi_{PM} = 180^\circ$$

1.6 Análisis en el dominio del tiempo.

Las especificaciones se definen en términos de las res

puestas a las funciones escalón (paso), rampa y parábola; las medidas standar de funcionamiento se han generalizado a respuestas de un sistema de segundo orden para una entrada escalón. En sistemas de orden superior la aproximación se realiza tomando un par de raíces dominantes.

1.6.1 Sistemas de segundo orden

Consideremos el sistema de segundo orden cuya función de transferencia de lazo abierto es:

$$GH(s) = \frac{K}{s^2 + 2\delta\omega_n s + \omega_n^2}$$

la ecuación característica sería

$$s^2 + 2\delta\omega_n s + \omega_n^2 = 0$$

sus dos raíces:

$$s_1, s_2 = -\delta\omega_n \pm j\omega_n \sqrt{1-\delta^2} = -\alpha \pm j\omega_d$$

donde:

$$\delta = \cos\theta = \text{razón de amortiguamiento}$$

$$\omega_n = \quad = \text{frecuencia natural no amortiguada}$$

$$\omega_d = \omega_n \sqrt{1-\delta^2} = \text{frecuencia natural amortiguada}$$

$$\alpha = \delta\omega_n = \text{constante de amortiguamiento o factor de atenuación de los transitorios.}$$

analizando el sistema de segundo orden al variar δ de 0 a ∞ con ω_n constante, tendríamos:

$$GH(s) = 2\omega_n \frac{\delta s}{s^2 + \omega_n^2}$$

y el lugar geométrico de las raíces sería:

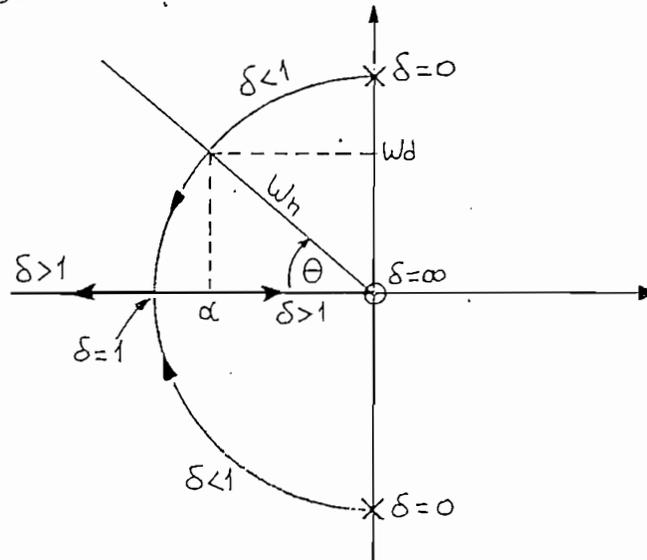


FIG. 1.13 LGR de un sistema de segundo orden al variar de 0 a ∞ con ω_n constante

En la FIG. 1.14 podemos observar la relación entre las raíces en el plano s y la razón de amortiguamiento, que da lugar a los diferentes tipos de sistemas en que puede clasificarse un sistema de segundo orden con una entrada escalón.

La constante de tiempo se define como:

$$\tau = \frac{1}{\alpha} \quad (1-52)$$

o sea

$$\tau = 1/\delta \omega_n \quad (1-53)$$

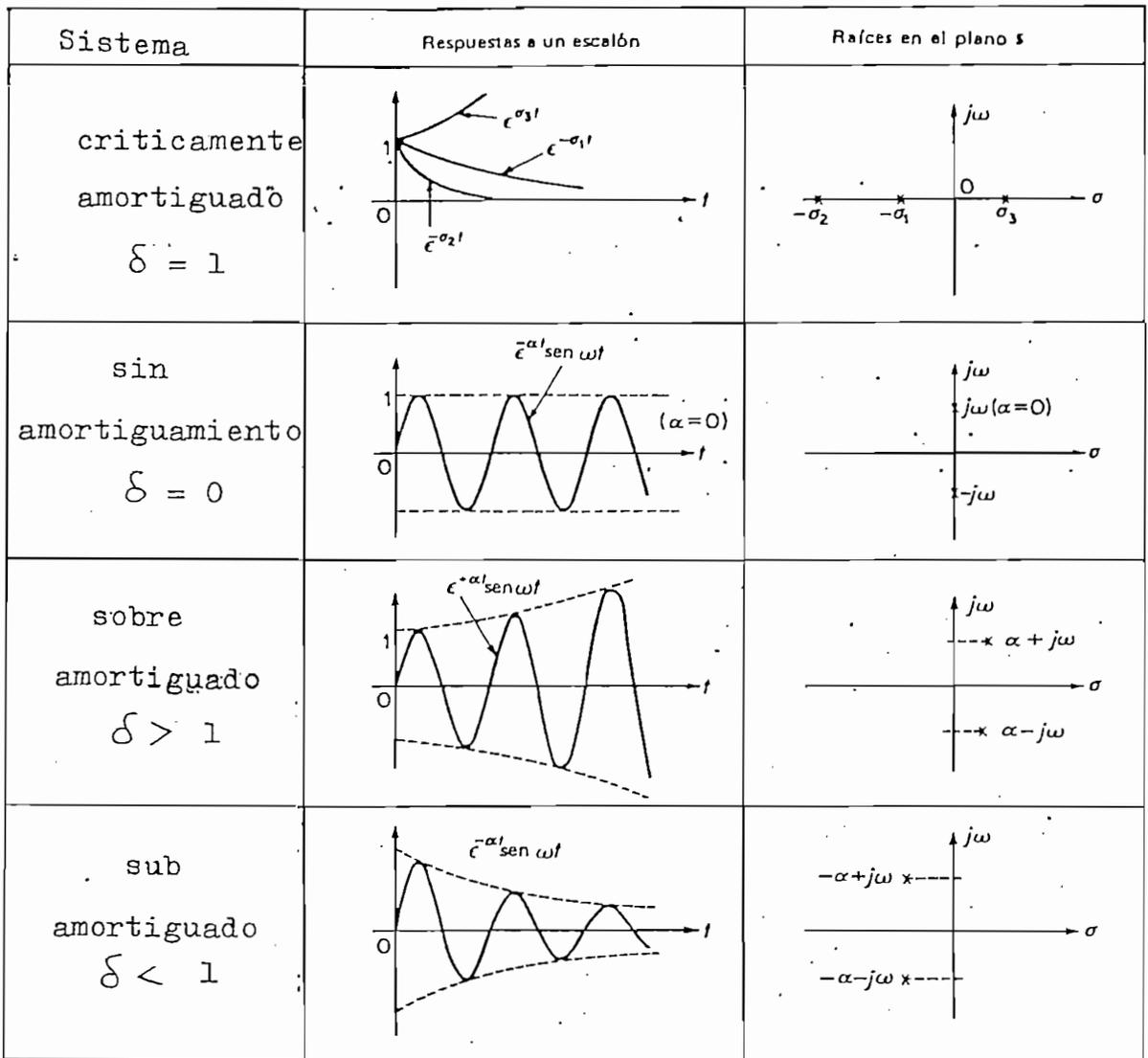


FIG. 1.14 Comparación de respuestas para distintas situaciones de las raíces en el plano s.

La respuesta en el dominio del tiempo a una entrada -escalón unitario $u(t) = 1$ para $t > 0$ sería la sinusoides amortiguada representada en la FIG. 1.15 cuya ecuación es:

$$c(t) = 1 + \frac{e^{-\delta \omega_n t}}{\sqrt{1-\delta^2}} \text{sen} \left(\sqrt{1-\delta^2} \omega_n t - \text{tg}^{-1} \frac{\sqrt{1-\delta^2}}{\delta} \right) \quad (1-54)$$

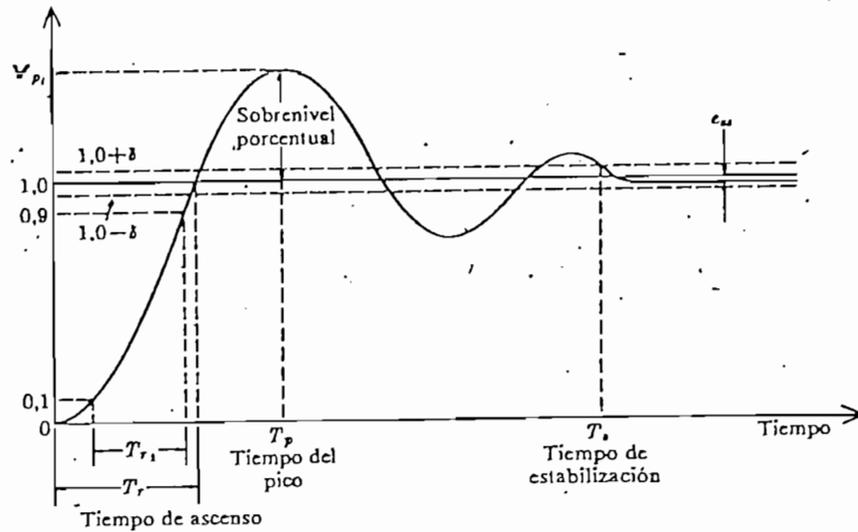


FIG. 1.15 Respuesta de escalón de un sistema de control

Sobrenivel Porcentual (S.P.)

Es la máxima diferencia entre las soluciones a transitorios y en estado estacionario.

Tiempo pico (T_p)

Es el tiempo al que sucede el valor pico y donde se mide el sobrenivel.

Para obtener los máximos y mínimos de la ecuación 1-54 igualamos su derivada a cero, obteniendo:

$$\frac{dc(t)}{dt} = \frac{w_n}{\sqrt{1-\delta^2}} e^{-\delta w_n t} \text{ sen } w_n \sqrt{1-\delta^2} t \quad (1-55)$$

para que $dc(t)/dt = 0$ debe cumplirse

$$w_n \sqrt{1-\delta^2} t = n\pi \quad (n = 0, 1, 2, \dots)$$

o sea
$$t = \frac{n \pi}{w_n \sqrt{1-\delta^2}} \quad (1-56)$$

para valores de $n = 0, 2, 4, \dots$ obtendremos los mínimos; y con $n = 1, 3, 5, \dots$ los máximos; el primer máximo ($n=1$) nos dará el tiempo pico:

$$T_p = \frac{\pi}{w_n \sqrt{1-\delta^2}} \quad (1-57)$$

el valor pico V_p se obtiene reemplazando (1-57) en (1-54),

$$V_p = 1 + e^{-\frac{\pi \delta}{\sqrt{1-\delta^2}}} \quad (1-58)$$

de donde el sobrenivel porcentual será:

$$S.P. = \frac{V_p - 1}{1} \cdot 100\% \quad (1-59)$$

y reemplazando (1-58)

$$S.P. = 100 e^{-\frac{\pi \delta}{\sqrt{1-\delta^2}}} \quad (\%) \quad (1-60)$$

que solamente se encuentra en función de la razón de amortiguamiento δ .

Tiempo de estabilización (T_s)

Es el tiempo al que la respuesta del sistema $c(t)$ se encuentra dentro de una banda de $\pm \gamma \%$.

Si de la ecuación (1-54) analizamos solamente para la envolvente exponencial tendríamos:

$$\frac{e^{-\delta \omega_n t}}{\sqrt{1-\delta^2}} = \frac{\gamma}{100} \quad (1-61)$$

de donde:

$$\omega_n T_s = \frac{1}{\delta} \ln \frac{1}{\frac{\gamma}{100} \sqrt{1-\delta^2}} \quad (1-62)$$

cuya variación se puede apreciar en la FIG. 1.16 para diferentes valores de δ .

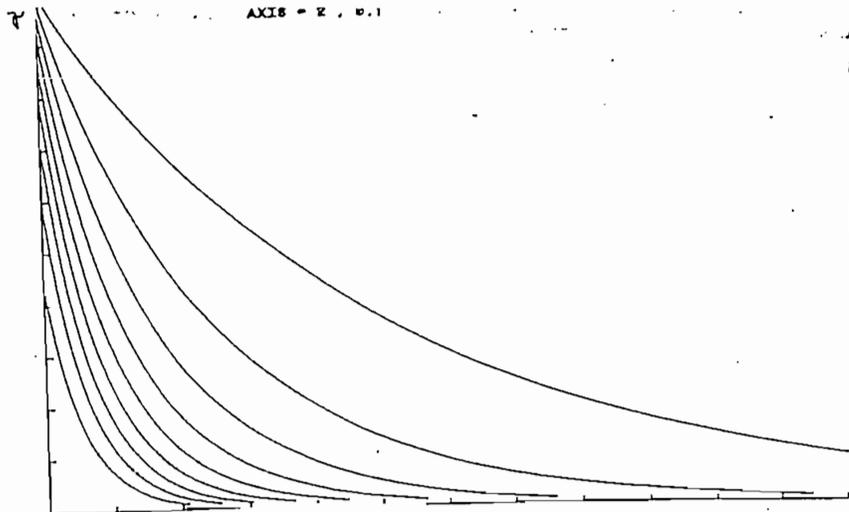


FIG. 1.16 Variación del tiempo de estabilización, con ω_n constante para bandas γ de respuesta con diferentes valores de δ .

Resumiendo, podemos decir que a través del sobrenivel porcentual y el tiempo de estabilización se tiene una completa idea de la semejanza de la respuesta real del sistema a la entrada, como se puede observar en la FIG. 1.17, para diferentes valores de la razón de amortiguamiento δ .

CAPITULO II

CONSTRUCCION Y DESCRIPCION DEL PROGRAMA

CAPITULO II

CONSTRUCCION Y DESCRIPCION DEL PROGRAMA

2.1 Características del equipo

La unidad básica es el microcomputador TEKTRONIX 4051 con capacidad de memoria para programas y datos de 30.5K bytes de 8 bits cada uno. En la parte superior izquierda del Keyboard se ubican 10 teclas definibles numeradas del 1 al 20, que al presionarse provocan una transferencia inmediata de la ejecución del programa a instrucciones numeradas con múltiplos de cuatro, en caso de existir esa instrucción.

Para indicar el estado de operación, existen señales luminosas a la derecha de la pantalla tales como:

BUSY se encuentra ejecutando el programa

BREAK se ha suspendido la ejecución

I/O está esperando o entregando un dato

POWER existe alimentación de energía

El lenguaje que se utiliza es BASIC extendido, dirigido a este equipo. Maneja dos tipos de variables: numéricas (A1.....Z9) y literales (A\$.....Z\$), que se pueden eliminar o crear de acuerdo a las necesidades de memoria; los datos se ingresan o modifican en cualquier instante del -

proceso; ya sea a través de la instrucción INPUT; o, luego de provocar una interrupción con la instrucción STOP o la tecla BREAK."

Las subrutinas tienen un sentido diferente del que se usa en FORTRAN, COBOL o ASSEMBLER, puesto que las variables del programa principal y de la subrutina no son independientes. En general la instrucción GOSUB ayuda a realizar programación estructurada y trabaja similarmente al PERFORM de COBOL, o al BALR del ASSEMBLER.

Para permitir procesar programas que exceden la capacidad del equipo, es posible segmentar el programa y superponer paquetes de instrucciones (almacenadas en algún dispositivo externo), optimizando de este modo, el uso de la memoria disponible.

Las unidades de diskettes 4907 almacenan información en archivos de tipo secuencial o directo; y además se usan como respaldo de programas o segmentos de programas.

La unidad digital de gráficos 4662 puede emplearse como unidad de entrada/salida, o sea que podemos dibujar o "leer" un dibujo; lo mismo que en la pantalla del operador (en el equipo disponible no tenemos el JOYSTICK para entrada por pantalla).

2.2 Descripción General

La construcción del programa se ha realizado usando técnicas de programación modular y de aprovechamiento de memoria, por lo que se ha dividido en un programa principal residente en memoria y cuatro segmentos auxiliares, los cuales son cargados a medida que se los necesite, como se ilustra en la FIG. 2.1.

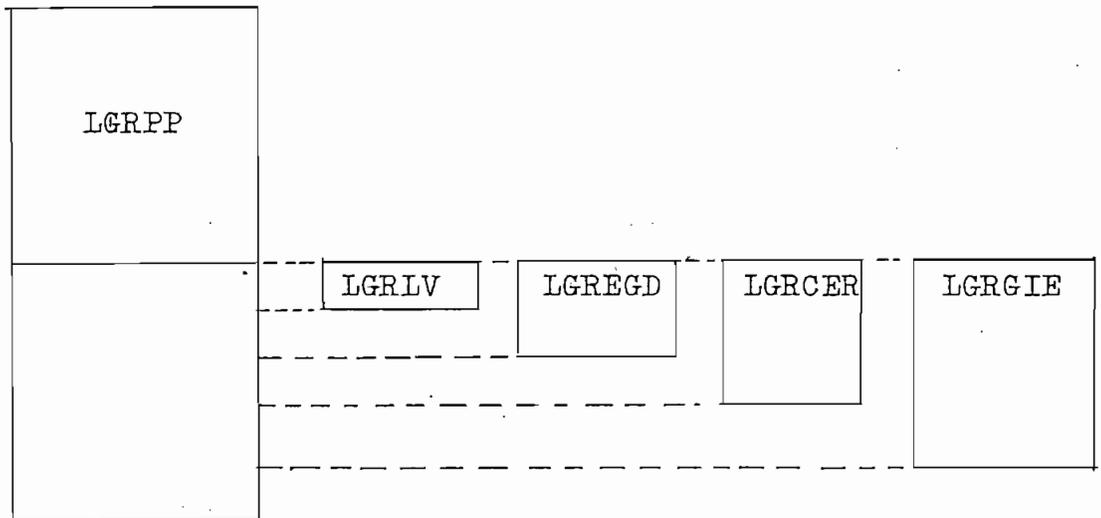


FIG. 2.1 Uso y distribución de memoria

En el programa se identifican dos grandes procesos:
 a) Cálculo del LGR; y b) uso y estudio del LGR; procesos que pueden realizarse independientemente o en una sola sesión; se especifican claramente en la pantalla del operador los pasos a seguirse en cada oportunidad; los datos re

queridos en ciertas situaciones; y los errores que pueden producirse ya sea por equivocaciones en el ingreso de datos o por limitaciones del programa; sin embargo para mayor información se puede recurrir al manual de uso (apéndice D) y/o al manual de errores (apéndice E).

a) Cálculo del LGR

La función de transferencia de lazo abierto $GH(s)$ se puede establecer como una relación de polinomios racionales (1-14) y (1-15), o como una relación de factores (1-16); - debido a esto el programa acepta el ingreso de datos por - coeficientes de cada polinomio; o por raíces de los factores (polos y ceros de $GH(s)$), inclusive generando las raíces conjugadas. Previamente analiza que los grados del numera dor y denominador, no excedan a siete y que éste último no sea mayor al del numerador, lo que es suficiente para la - mayoría de casos prácticos.

Debido a que en el proceso es necesario, tanto los co eficientes de los polinomios; como las raíces de éstos; -- siempre se calculará los datos faltantes.

Al analizar los polos y ce ros de $GH(s)$ se identifica los que se repiten, los que se cancelan, o si hay o no raí ces complejas; similarmente se hace con los puntos de sepa

ración obtenidos al resolver la ecuación $dK(s)/ds = 0$.

Luego se analiza conjuntamente raíces y puntos de separación para definir cuales de éstos son válidos para el LGR y con qué ángulos abandonarían el eje real.

Para respaldo y/o el posterior proceso, se crean dos archivos en diskette: uno de acceso directo para los datos generales con prefijo "RL/"; y otro de acceso secuencial - para todos los puntos del LGR calculados.

Desde los puntos de separación válidos y/o raíces complejas se inicia el cálculo de los puntos pertenecientes a el LGR (en el semiplano superior), que deben cumplir la ecuación (1-18) con un error menor a $\pm 1^{\circ}$, realizándose una corrección dinámica del desplazamiento de acuerdo a este error. Terminan los cálculos cuando los puntos llegan a los límites del plano de datos.

Finalizando este primer proceso o con los archivos de respaldo mencionados anteriormente se puede continuar con el siguiente proceso:

b) Uso y estudio del LGR

En el capítulo anterior se resaltó la importancia y utilidad de dibujar el LGR. Con este proceso se ha logrado construir una poderosa herramienta para el análisis de un sistema realimentado; puesto que puede proporcionar datos como: margen de ganancia y margen de fase; la ganancia de un determinado punto del LGR; o los puntos del LGR que corresponden a una misma ganancia; además evaluar si el caso lo permite, la respuesta del sistema a una entrada escalón unitario, dando la razón de amortiguamiento, un punto del LGR o el tiempo de estabilización.

También es posible alterar los límites del plano de datos para ampliar determinado sector o apreciar la tendencia del LGR fuera de los límites originales; inclusive con esta facilidad da lugar a utilizarse este programa para - variaciones de más de un parámetro o ilustrar el cambio - del LGR de un sistema al añadirse redes de compensación.

Está por demás decir que se puede obtener el dibujo - del LGR en la pantalla o el grafizador, y el correspondiente listado de datos en la impresora.

Detallando el contenido de cada uno de los segmentos en la FIG. 2.1; en el programa principal se puede apreciar

la secuencia de trabajo a realizarse; maneja todas las opciones posibles a través de las teclas definibles; se encuentra el cálculo y grabación de los puntos pertenecientes al LGR; y la rutina para encontrar las raíces reales o imaginarias de un polinomio racional de cualquier grado, adaptada de las rutinas matemáticas adquiridas con el computador; siendo por todo esto el más importante.

Con "LGRLV" se proporciona un listado de las variables utilizadas y su significado; para permitir corregir, actualizar u optimizar el programa con mayor facilidad.

Con "LGREGD" se efectúa el ingreso/verificación de los datos iniciales de acuerdo al caso que se va a procesar.

Con "LGR CER" se realiza el cálculo y evaluación tanto de las raíces de lazo abierto como de los puntos de separación, analizando su multiplicidad, validez y plano de datos en que se graficará.

Con "LGRGIE" además de permitir el gráfico del LGR y la impresión de sus datos, da facilidades para analizar y estudiar el LGR que se ha calculado, como se mencionó anteriormente.

2.3 Diagrama de bloques

La simbología que se utilizará en este y los siguientes diagramas se encuentran detallados en el apéndice B.

Debido a su carácter interactivo, el programa, inicia determinados procedimientos al presionar las teclas definibles de las posibilidades que aparecen en la pantalla del operador y que se reproducen en la FIG. 2.2.

El diagrama de bloques de la FIG. 2.3 puede ofrecer una clara idea del flujo de la información al ejecutarse el programa.

```

LUGAR GEOMETRICO DE LAS RAICES
=====

POSIBILIDADES:

TECLA 1 ==> REINICIAR EL PROGRAMA (RUN)
TECLA 2 ==> DATOS COMO COEFICIENTES
TECLA 3 ==> DATOS COMO FACTORES (RAICES)
TECLA 9 ==> LISTADO DE VARIABLES EN USO
TECLA 20 ==> ENTRADA DE VALORES POR DISKETTE

      Escoge TECLA
      -----
  
```

FIG. 2.2 Alternativas de trabajo que aparecen en la pantalla del operador. a) Posibilidades iniciales.

LUGAR GEOMETRICO DE LAS RAICES

=====

POSIBILIDADES:

- TECLA 1 ==> REINICIAR EL PROGRAMA (RUN)
- TECLA 4 ==> DADO UN PUNTO, OBTENER SU GANANCIA
- TECLA 5 ==> ANALISIS DE ESTABILIDAD RELATIVA
- TECLA 6 ==> GRAFICACION DEL LGR
- TECLA 7 ==> IMPRESION DE DATOS DEL LGR
- TECLA 8 ==> CAMBIO EN LIMITES DEL PLANO
- TECLA 10 ==> DADA K, OBTENER LOS PUNTOS EN LGR
- TECLA 11 ==> MENU DE ESTAS ALTERNATIVAS

Escoja TECLA

FIG.2.2 Alternativas de trabajo que aparecen en la pantalla del operador. b) Posibilidades luego de calculado el LGR.

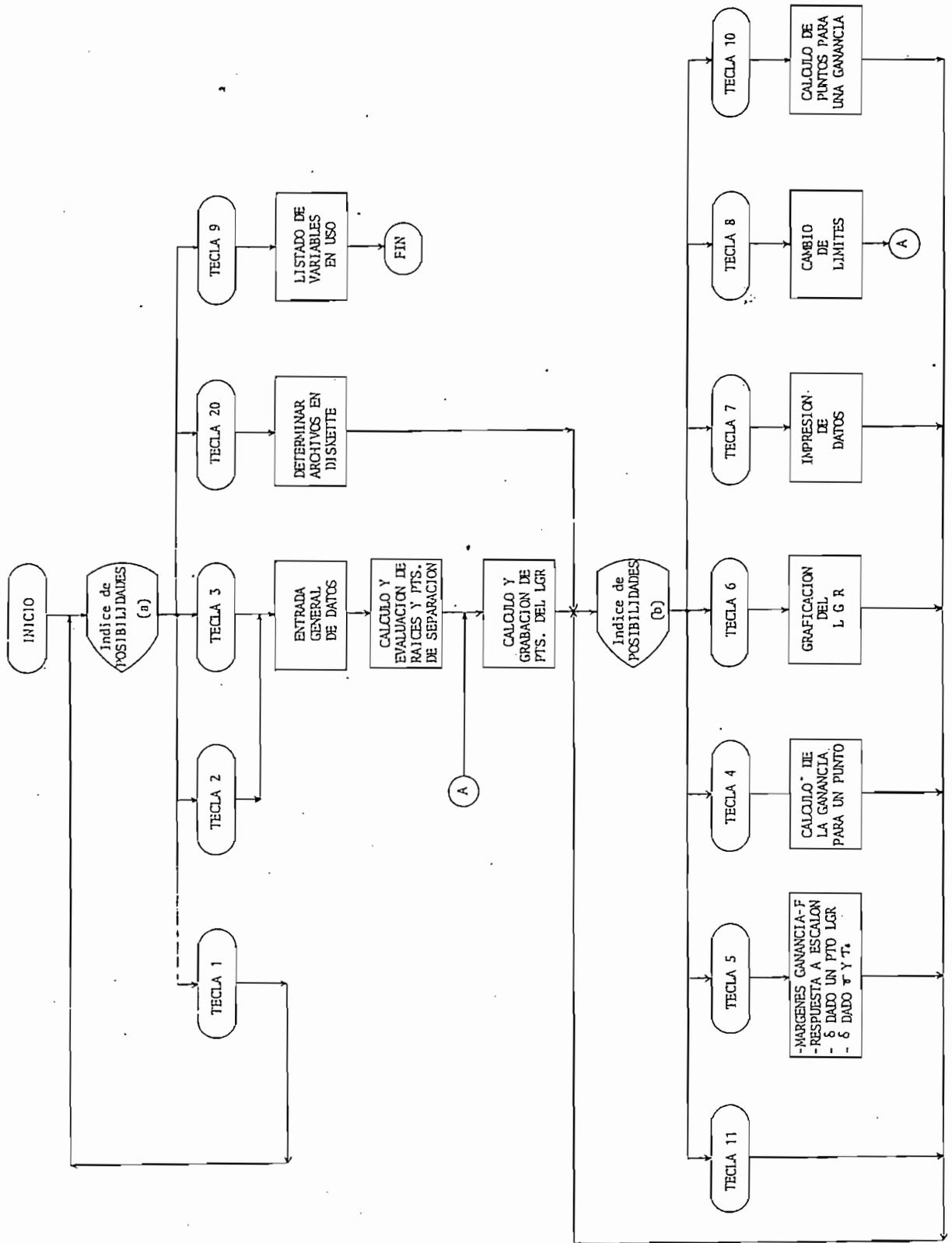


FIG. 2.3 Diagrama general de bloques.

2.4 Diagrama de flujo

El programa principal, para el momento de ejecución, debe formar un solo programa en memoria, con cada uno de los segmentos, debiendo mantener consistencia entre todas sus variables e instrucciones, por lo que los diagramas de flujo se detallarán tomando en consideración cada uno de los bloques especificados en la FIG. 2.3; de acuerdo a la secuencia lógica establecida en la FIG. 2.2; y utilizando las variables como se indica a continuación:

```

VARIABLES EN USO
ARREGLOS :
F    -- N1+D1 raíces del sistema (polos y ceros)
      Nivel 1  Parte real
      Nivel 2  Parte imasinaría
      Nivel 3  Indicativo de polo o cero
      Nivel 4  Numero de veces
      Nivel 5  Validez (0=no, 1=si, 2=cancelado)
S    -- N puntos de separación en eje real
      Nivel 1  Parte real
      Nivel 2  Parte imasinaría
      Nivel 3  Numero de veces
      Nivel 4  Validez
C0   -- Coeficientes del numerador (zeros) en orden
      descendente de potencias.
C1   -- Coeficientes del denominador (polos)
C2   -- coeficientes de la ecuación de los puntos
      de separación.
C3   -- Coeficientes de la derivada del numerador
C4   -- Coeficientes de derivada del denominador
T    -- Valores transitorios de trabajo
X    -- Puntos en eje real o pto. por curva
INTERRUPTORES :
S0   -- De entrada de datos, calculo y final.
S1   -- Para clasificaciones y LGR desde complejas
S2   -- De existir polos o zeros complejos
S3   -- De existir LGR solo en eje real
B4   -- De tipo de entrada y pto triple de sep.
INDICES : I, I1, I2
VARIABLES NUMERICAS (Primer carácter) : A, E, K, T, X, Y
VARIABLES ALFANUMERICAS : F$, L$, Q$, R$, T$, X$, Y$, Z$
=====

```

Relacionando la Fig. 2.3 con la Fig. 2.1, se establece los bloques que pertenecen al programa principal y a cada uno de los segmentos, de la siguiente manera:

PROGRAMA	BLOQUES
PRINCIPAL "LGRPP"	<ul style="list-style-type: none"> - Indice de POSIBILIDADES (a) y (b) - CALCULO Y GRABACION DE PTCS DEL LGR - DETERMINACION DE ARCHIVOS EN DISKETTE - CAMBIO DE LIMITES
"LGREGD"	<ul style="list-style-type: none"> - ENTRADA GENERAL DE DATOS
"LGR CER"	<ul style="list-style-type: none"> - CALCULO Y EVALUACION DE RAICES Y PUN- TOS DE SEPARACION
"LGRGIE"	<ul style="list-style-type: none"> - CALCULO DE LA GANANCIA PARA UN PUNTO - ANALISIS DE ESTABILIDAD RELATIVA - GRAFICACION DEL LGR - IMPRESION DE DATOS - CAMBIO DE LIMITES - CALCULO DE PUNTOS PARA UNA GANANCIA
"LGR LV"	<ul style="list-style-type: none"> - LISTADO DE VARIABLES EN USO

FIG.2.4 Contenido del programa principal y de cada uno de los segmentos

2.4.1 Entrada general de datos

Se ejecuta para todo caso que va a ser procesado por primera vez, por lo que siendo éste el bloque de ingreso de datos, es el que analiza y advierte cualquier tipo de inconsistencia, ya sea para entrada por coeficientes (presionando la TECLA 2) o, para entrada por factores (presionando la TECLA 3).

Primeramente se establece el ϵ que concuerde con las magnitudes del caso, luego recibe los grados del numerador y denominador analizando que no sean negativos o excedan a siete y que el grado del denominador no sea menor al del numerador.

Se verifica que no ingresen más datos que los permitidos por los respectivos grados y que el valor de la ganancia estática total cumpla con ser menor a 10000 y mayor a cero.

En la entrada como coeficientes, también se busca las raíces de cada polinomio; y en la entrada como factores se generan las conjugadas para cada raíz compleja.

que también puede ingresarse al cálculo y con el nombre de TESIS21.

Al concluirse el primer caso, se grafica y guarda los valores para los ejes; se calcula el segundo caso y se realiza cambio de límites para que coincidan con los del anterior, permitiéndolo la superposición de los dos LGR.

En uno u otro caso se pide las respuestas para una razón de amortiguamiento específica. Colocada la mirilla del cursor en la curva a (en rojo), en el cruce con la curva b, los resultados para TECLA4 (ganancia en un punto) son:

$$\text{ganancia } a = 1.9933$$

$$\text{diferencia en suma de argumentos} = 1.072^{\circ}$$

en el caso contrario, al establecerse el mismo punto para la curva b (en negro), los resultados para TECLA4 son:

$$\text{ganancia } K = 4.033$$

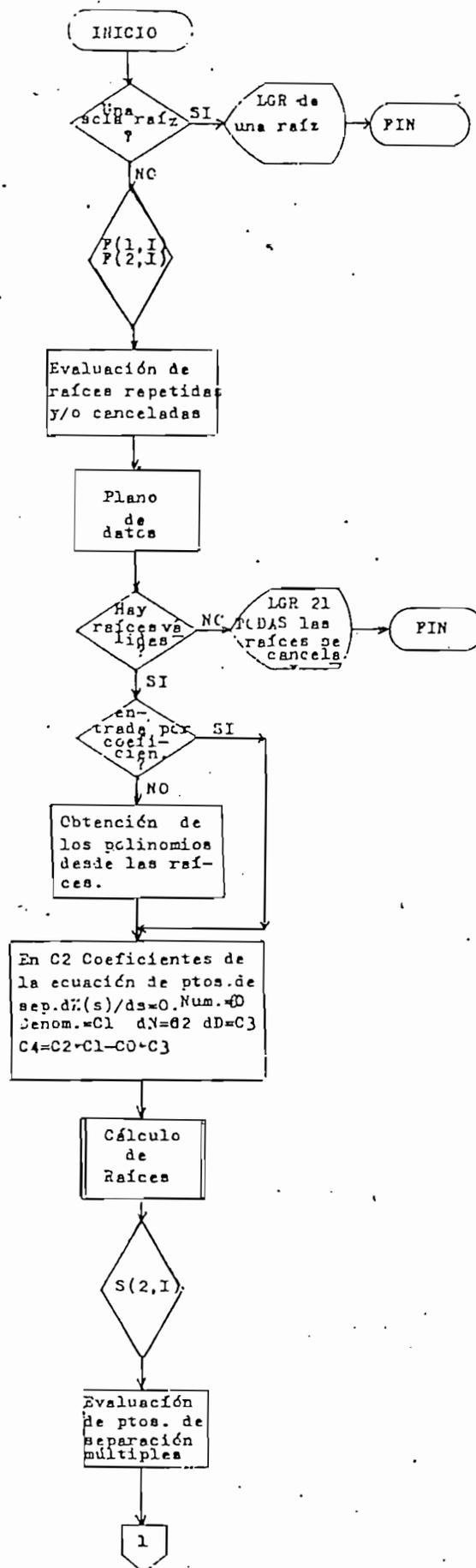
$$\text{diferencia en suma de argumentos} = 0.704^{\circ}$$

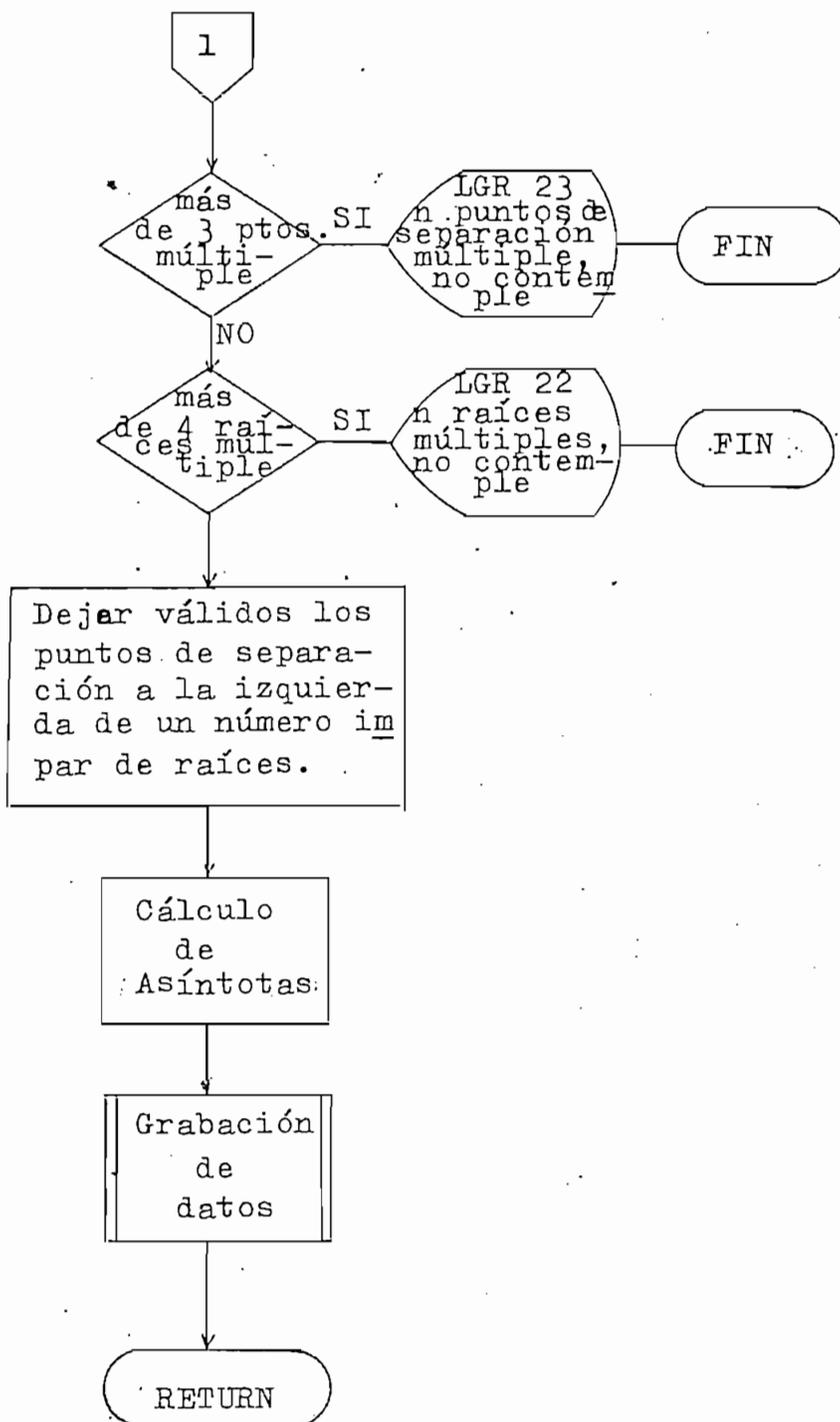
y los cálculos de razón de amortiguamiento para este punto, también se adjuntan.

2.4.2 Cálculo y evaluación de raíces y puntos de separación

Como los polos y ceros de $GH(s)$ se almacenan en la matriz F , la que además contiene subniveles para raíces repetidas, canceladas o que no se usan; en este bloque se realiza este análisis e inclusive se las clasifica en orden descendente. También se calculan los coeficientes de la ecuación $dK(s)/ds = 0$ y sus raíces, que serán los puntos de separación desde donde se generarán, posteriormente los puntos del LGR.

Con estas informaciones se identifican los puntos de separación, sobre el eje real, válidos para valores de ganancia entre 0 y ∞ ; y en el subnivel que indica la multiplicidad, se almacena el valor adecuado que permita cumplir las posibilidades planteadas en la FIG. 1.7 (para los ángulos de salida). El programa no procesa casos que originen cinco o más polos o ceros múltiples; o más de tres puntos de separación múltiples, por considerarlos casos poco comunes y que pueden provocar errores en el discernimiento de los puntos que pertenecen al LGR.





2.4.3 Cálculo y grabación de puntos del LGR

Para que un punto sea del LGR, debe cumplir con la ecuación de los módulos (1-17) y con la ecuación de los argumentos (1-18). Estas condiciones se pueden establecer gráficamente y analíticamente con la ayuda de la Geometría Analítica cuando se estudia la pendiente de una recta que pasa por dos puntos dados, y la distancia que media entre ellos; aplicado - en este caso al plano de s como se deduce de la FIG. 2.5 - donde Z_i y P_j simbolizan ceros y polos de un sistema realimentado; mientras que s_1 es un punto cualquiera del plano.

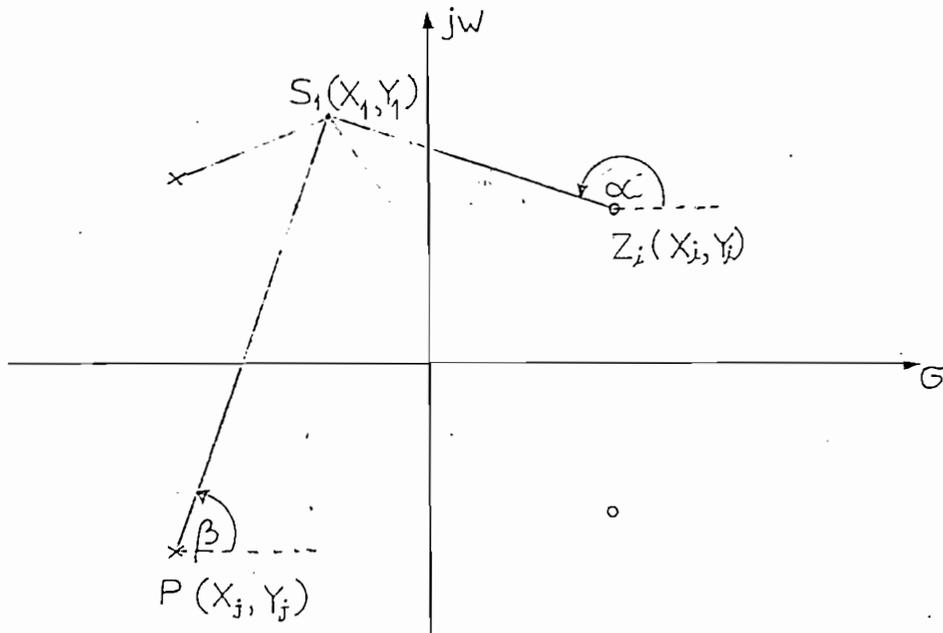


FIG. 2.5 Evaluación de un punto en el plano de s .

La pendiente m_1 de la recta $Z_i S_1$ será:

$$m_1 = \frac{y_1 - y_i}{x_1 - x_i} \quad (2-1)$$

como:

$$m_1 = \operatorname{tg} \alpha \quad (2-2)$$

entonces

$$\alpha = \operatorname{arctg} \frac{y_1 - y_i}{x_1 - x_i} \quad (2-3)$$

de igual manera tendríamos que:

$$\beta = \operatorname{arctg} \frac{y_1 - y_j}{x_1 - x_j} \quad (2-4)$$

como:

$$\alpha = \angle S_1 + Z_i \quad \text{y} \quad \beta = \angle S_1 + P_j$$

entonces:

$$\angle S_1 + Z_i = \operatorname{arctg} \frac{y_1 - y_i}{x_1 - x_i} \quad (2-5)$$

$$\text{y} \quad \angle S_1 + P_j = \operatorname{arctg} \frac{y_1 - y_j}{x_1 - x_j} \quad (2-6)$$

la ecuación de los argumentos quedaría:

$$\sum_{i=1}^{N_1} \operatorname{arctg} \frac{y_1 - y_i}{x_1 - x_i} - \sum_{j=1}^{D_1} \operatorname{arctg} \frac{y_1 - y_j}{x_1 - x_j} = (2q + 1)180^\circ \quad (2-7)$$

sabiendo que:

$$|\angle S_1 + Z_i| = \sqrt{(x_1 - x_i)^2 + (y_1 - y_i)^2} \quad (2-8)$$

y

$$|S_1 + P_j| = \sqrt{(x_1 - x_j)^2 + (y_1 - y_j)^2} \quad (2-9)$$

la ecuación de los módulos quedaría:

$$K \prod_{i=1}^{N1} \sqrt{(x_1 - x_i)^2 + (y_1 - y_i)^2} \prod_{j=1}^{D1} \sqrt{(x_1 - x_j)^2 + (y_1 - y_j)^2} = 1 \quad (2-10)$$

en la práctica el programa analiza que se cumpla la ecuación (2-7) con un error menor a 1^0 para luego calcular la ganancia K en ese punto, con la ecuación (2-10); para esto toma en cuenta que el nivel 4 de la matriz F indica la multiplicidad y el nivel 3 indica con un 1 si es polo, o con un \emptyset si es cero y usándolo como potencia de -1, tendríamos un valor positivo para un cero, y negativo para un polo usando:

$$T\emptyset = F(4,n) * (-1)^{F(3,n)} \quad (2-11)$$

si hacemos que:

$$T1 = X_1 - X_n$$

$$y \quad T2 = Y_1 - Y_n$$

la ecuación (2-7) podría expresarse como:

$$A2 = \sum_{n=1}^{N1+D1} T\emptyset * \text{ATN}(T2/T1) \quad (2-12)$$

donde se buscará que A2 sea muy cercano a $\pm 180^0$, con lo que podrá obtenerse la ganancia K, la cual de la ecuación (2-10) podría expresarse como:

$$K = \prod_{n=1}^{N1+D1} (T1^2 + T2^2) - T\phi / 2 \quad (2-13)$$

La búsqueda de puntos pertenecientes al LGR se efectúa desde los puntos válidos de separación sobre el eje real - con un ángulo de salida de acuerdo al valor en el nivel de multiplicidad y/o desde las raíces complejas, en caso de existir.

Para efectuar el tanteo de posibles puntos del LGR, podemos referirnos al esquema de la FIG. 2.6; donde se ubican cinco puntos en abanico (a,b,c,d y e), dos a cada lado del punto c, que es el que sigue la trayectoria del punto inmediatamente anterior.

El ángulo $A1$ entre estos puntos es constante al momento de ejecución (el valor por defecto es $A1 = 7^\circ$); el radio del abanico $E2$ aumenta o disminuye dinámicamente con la tendencia del cumplimiento de la ecuación (2-7) para el punto más aproximado (el valor promedio de $E2$ es $1/140$ de la longitud del eje real). El número de puntos rastreados y la abertura entre ellos es susceptible de alterarse fácilmente en el programa, a pesar de que los valores utilizados se han tomado de la práctica.

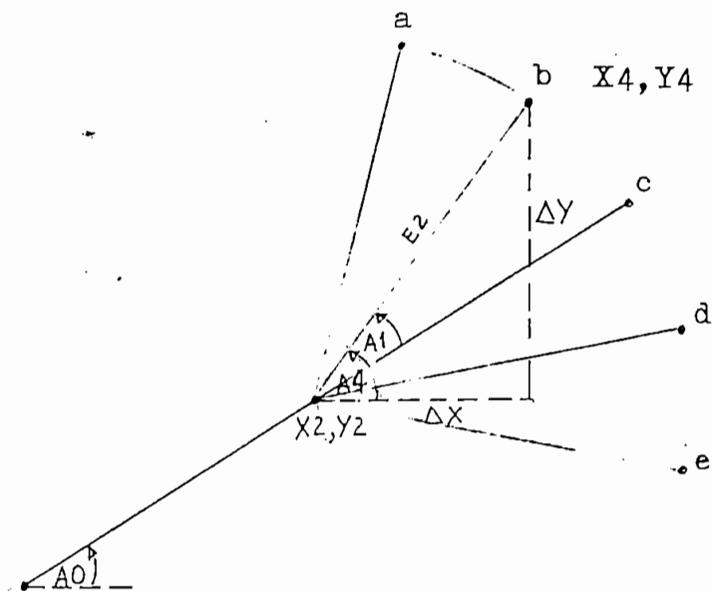


FIG.2.6 Evaluación de cinco posibles puntos del LGR, en abanico desde el punto c, que mantiene la trayectoria anterior.

De la FIG. 2.6 tenemos:

$$A4 = A0 + A1$$

(2-14)

$$X4 = X2 + \Delta X$$

y
$$Y4 = Y2 + \Delta Y$$

como:

$$\Delta X = E2 * \cos A4$$

y
$$\Delta Y = E2 * \sen A4$$

entonces será:

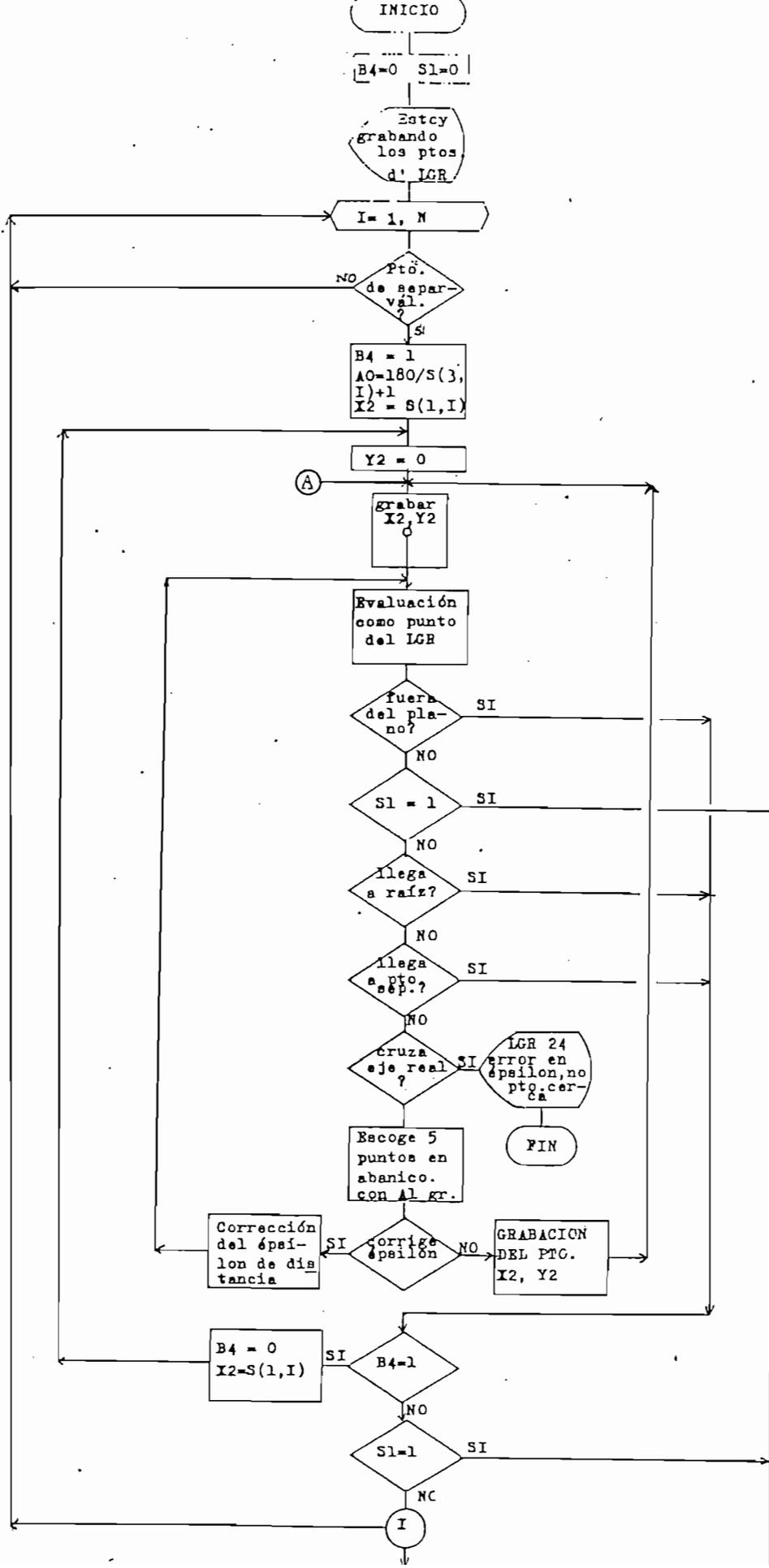
$$X4 = X2 + E2 * \cos A4$$

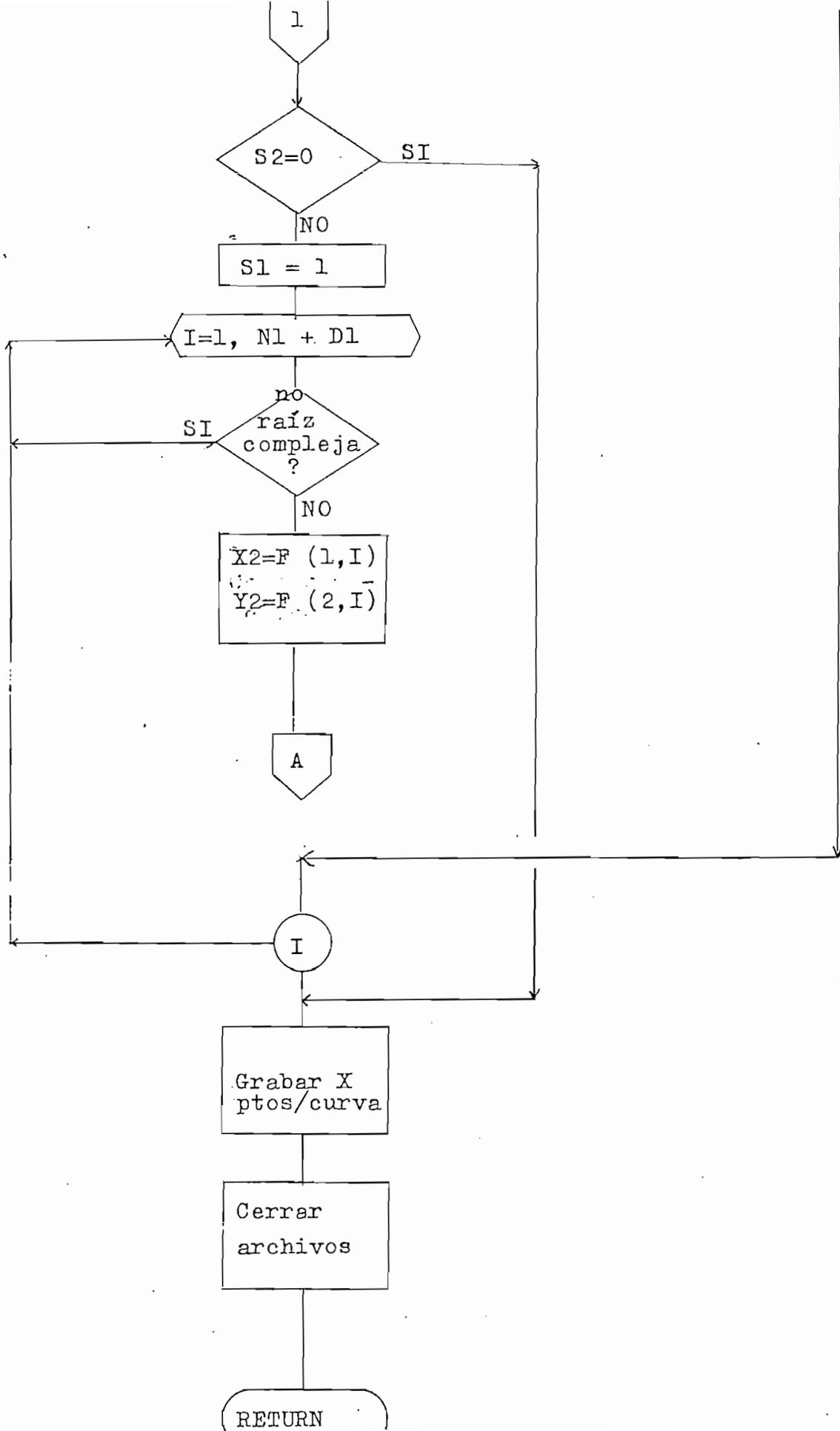
y
$$Y4 = Y2 + E2 * \sen A4$$

Cuando se haya establecido un punto como candidato del LGR se analizará si es o no necesario variar E2 para obtener un mejor resultado, y cuando se defina que un punto es del LGR; este punto se grabará en el respectivo archivo y el ángulo A4 se transformará en el nuevo A0; los valores X4, Y4 en los nuevos X2, Y2; continuando este proceso hasta rebasar los límites del plano, llegar a una raíz compleja o a otro punto de separación.

Una vez concluido el cálculo desde los puntos de separación, se verifica si existen raíces complejas; en este caso se encuentra el ángulo de salida desde esas raíces, repitiéndose el ciclo de búsqueda de puntos del LGR.

Es importante además mencionar que el número de puntos por cada ramal independiente se almacena en el arreglo X ; para facilitar posteriormente la lectura y graficación de los puntos pertenecientes al LGR.



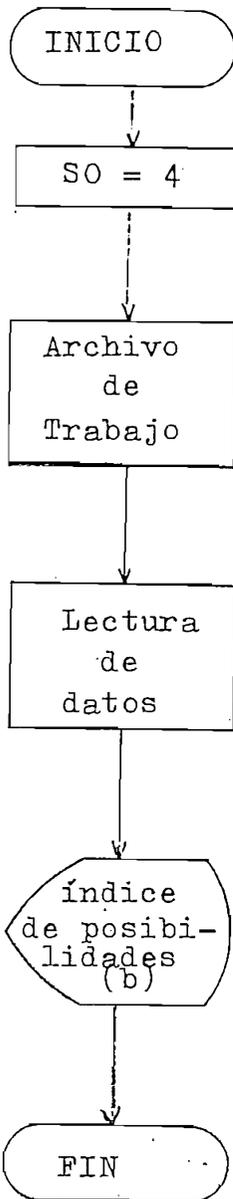


2.4.4 Determinación de archivos en diskette

Cuando se ha obtenido completamente el LGR de un caso particular, los datos y puntos calculados son grabados en diskette para respaldo o posteriores procesos.

En el caso de tener este respaldo, se puede iniciar la ejecución de los siguientes procesos, presionando la TECLA 20; con la que aparecerán los requerimientos respecto a archivos en la pantalla del operador, Se contempla la posibilidad de que un archivo especificado como de entrada, no contenga en la realidad resultados de algún caso ejecutado; apareciendo el respectivo mensaje en la pantalla.

Luego de haber validado la información entregada, en caso de ser correcta, permite realizar las operaciones del índice de posibilidades (b); que también podrán accesarse al concluir el cálculo y grabación de los puntos de un LGR recientemente procesado.



2.4.5 Análisis de estabilidad relativa

En este acápite se hará referencia a las opciones que aparecen en la pantalla del operador, al presionar la TECLA 5, y que se indican a continuación:

Para obtener:

- 1 Margen de ganancia y margen de fase
- 2 Sobrenivel, T_p , T_s , W_n , W_d , K_{te} de T
Razon de amortiguamiento:
- 3 Dado un punto del LGR
- 4 Dado T de estabilizacion y banda (%)
- 5 Terminar

NOTA: Opciones 2, 3 y 4 son para respuestas como sistema de segundo orden a entrada escalón

Disite el número correspondiente =

FIG. 2.7 Posibilidades que aparecen en la pantalla, para análisis de estabilidad relativa (TECLA 5).

Cabe mencionar, como especifica la nota, que este análisis se basa en considerar que existen un par de raíces dominantes, las que se establecen si cualquier otra raíz tiene su parte real, mínimo cinco veces (hacia la izquierda) la

parte real del par de raíces dominantes.

La notación y resultados entregados concuerdan con la teoría desarrollada en 1.6.1; y es responsabilidad del operador interpretar y validar correctamente estos resultados, de acuerdo con el caso procesado.

Margen de ganancia y de fase

Como el margen de ganancia se establece en los puntos de corte del LGR, con el eje imaginario; llamados por esto puntos de ganancia crítica; y en vista de que nuestro LGR no es la representación de una función específica, sino una combinación de puntos; se evalúan los puntos grabados, como se ilustra en la FIG.2.8, y al detectar un cambio de signo en la parte real (lo cual significa que ha cruzado el eje - imaginario) se calcula el punto de corte de la recta trazada entre los dos últimos puntos.

Si X_4, Y_4 es el punto en que se ha detectado el cambio de signo y X_2, Y_2 el punto inmediatamente anterior; el punto de corte X_4, Y_4 será:

$$X_4 = 0$$

$$y \quad Y_4 = (X_2 * Y_4 - X_4 * Y_2) / (X_2 - X_4)$$

con estos valores se calcula el margen de ganancia de ese

punto.

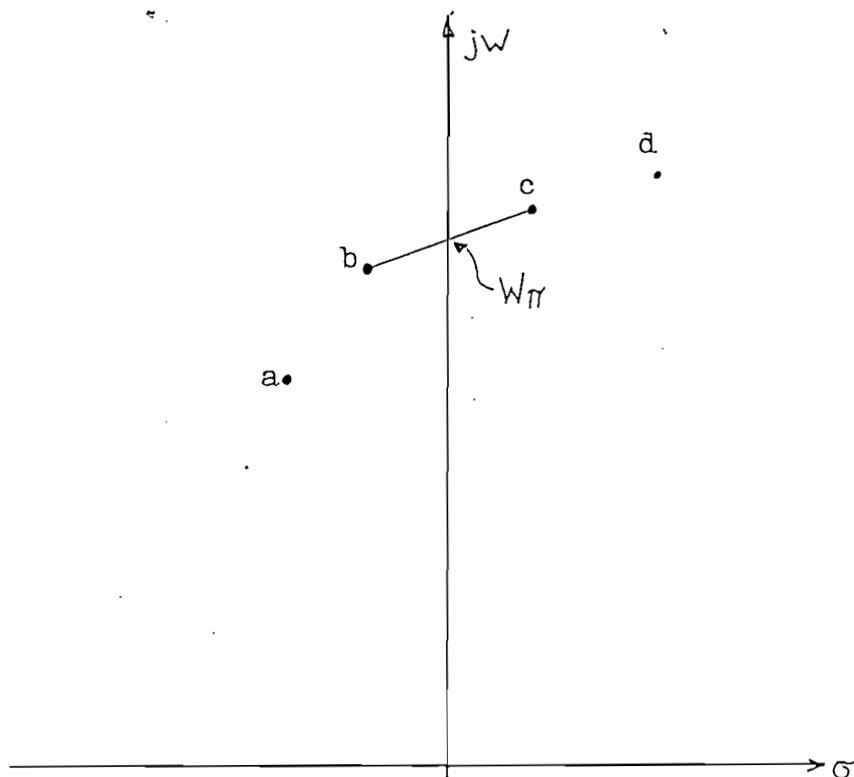


FIG. 2.8 Cálculo del punto $W\pi$ de cruce de fase.
(con escala muy ampliada)

El punto de cruce de ganancia (para margen de fase) se busca evaluando $|GH(j\omega)|$, barriendo el eje imaginario desde cero hasta el límite del plano tratando de encontrar cuando

$$K_1 \approx K_o K_o$$

puesto que $K_1 = K_o K_a$

y necesitamos que $K_a = K_o$

para luego obtener $\phi_{PM} = 180^\circ + \angle GH(j\omega_1)$.

Respuesta a entrada escalón

Para una razón de amortiguamiento especificada entrega los valores de:

- Sobrenivel porcentual SP
- Angulo desde el eje real
- Ganancia en el punto de corte con el LGR
- Frecuencia no amortiguada ω_n
- Frecuencia amortiguada ω_d
- Constante de amortiguamiento
- Constante de tiempo
- Tiempo pico T_p
- Tiempo de estabilización T_s , para banda del 5% u otras -
bandas.

Razón de amortiguamiento, dado un punto del LGR

Se recibe el punto propuesto, se calcula la razón de a mortiguamiento δ para este caso si $0 < \delta < 1$, entonces se entrega la información que se listó para el caso anterior.

Razón de amortiguamiento, dado T_s y una banda

El tiempo de estabilización, en este caso, es normalizado o sea $\omega_n T_s$; para poder reemplazar en la ecuación (1-54)

y buscar con qué razón de amortiguamiento δ se encuentra la respuesta dentro de la banda de porcentaje especificada.

2.4.6 Cálculo de la ganancia para un punto

El ingreso del punto se puede realizar dando los valores por la consola o ubicar la mirilla del plotter sobre el punto en el gráfico y tomar esos valores.

El mencionado punto, no necesariamente pertenecerá al LGR, por lo que se entrega; además de la ganancia, la diferencia para cumplir la ecuación de los argumentos o sea con $\pm 180^\circ(2q+1)$. Si esta diferencia es muy baja el punto podrá considerarse como perteneciente al LGR (en el cálculo del LGR se los acepta con diferencias menores a 1°)

Es importante advertir que se puede provocar overflow en la ganancia, si el punto a evaluarse es un cero, puesto que ahí la ganancia debe tender a infinito.

2.4.7 Graficación del LGR

Se efectúa en la pantalla o el plotter; se enmarca el gráfico y se dibuja primero el semiplano inferior, luego el superior y finalmente se ponen las marcas de "X" para polos "" para ceros e información adicional como: escala del -

gráfico, fecha de realización y nombre del archivo de datos.

Si la escala automática calculada, no es satisfactoria se puede alterar cambiando el valor de la variable E8, sin que afecte a los resultados.

2.4.8 Impresión de datos

Sirve como simple referencia del ejercicio, consta aquí la fecha de realización y el nombre del archivo de datos para referenciar con otros resultados del mismo caso.

Se lista la ganancia estática, los coeficientes de numerador y denominador; los polos y ceros; y los puntos de separación sobre el eje real obtenidos, con una indicación de su uso.

2.4.9 Cambio de límites

Sirve para cuando se desea que calcule el LGR, fuera de los límites originales, o la ampliación de un sector determinado.

Hay que tomar en cuenta que al cambiar cualquiera de los dos ejes; el eje imaginario será siempre simétrico.

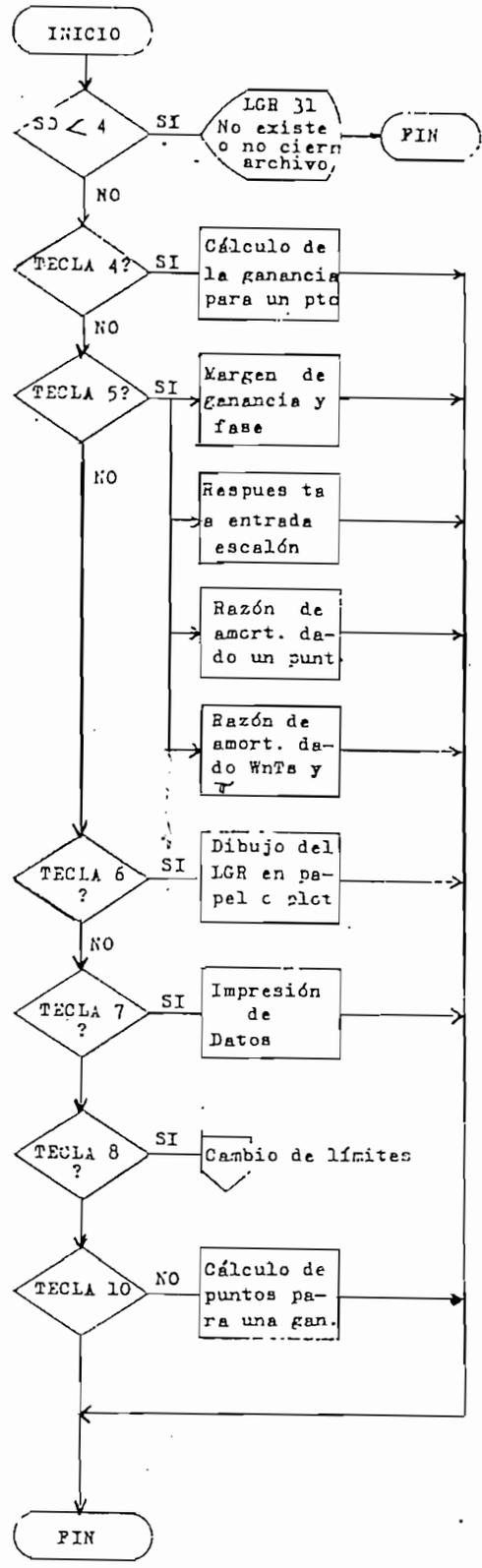
Debido a que los puntos que se calcularon para el LGR están en función del plano de datos, al cambiar sus límites se repite el cálculo y grabación de los puntos del LGR, pudiéndose almacenar en ~~el~~ archivo con diferente nombre, -- manteniéndose así también el original.

2.4.10 Cálculo de puntos para una ganancia

Para cuando se desea saber con una determinada ganancia cual sería la ubicación de los polos de lazo cerrado; se encuentra resolviendo la ecuación característica en función de la ganancia.

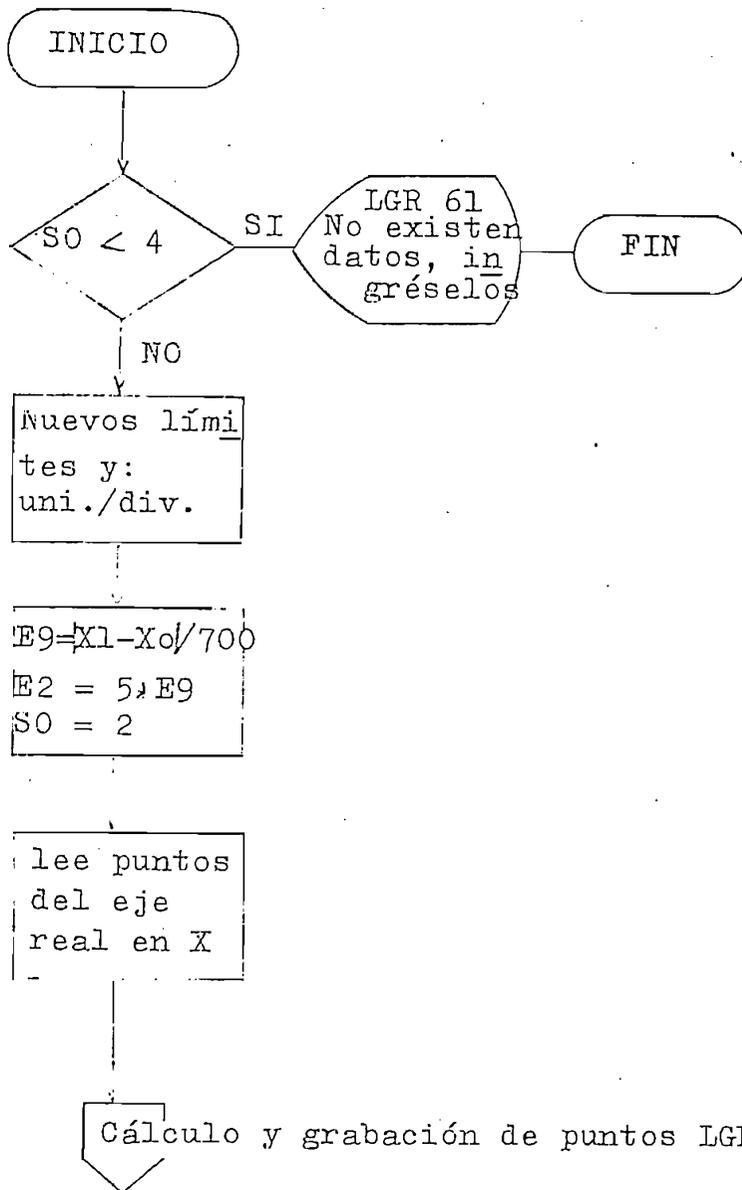
$$D(s) + K*N(s) = 0$$

En la mayoría de las opciones de la segunda parte (índice de posibilidades (b)) se pueden obtener los resultados en la impresora con la fecha, nombre del archivo y el tipo de cálculo; para estudio o documentación del caso procesado.



Cambio de límites

78



CAPITULO III

EJEMPLOS DE APLICACION

CAPITULO III

Ejemplos de aplicación

En este capítulo se intenta resumir algunas de las varias posibilidades de trabajo que permite realizar el presente programa; como son: cálculo, graficación y estudio de un LGR; variaciones de más de un parámetro en la función de transferencia de lazo abierto; evaluación práctica del efecto que resulta al añadir redes de compensación.

Ejemplo 3.1 Dibujar el LGR desarrollado como ejemplo 1-1, cuyo diagrama de bloques se encuentra en la FIG. 3.1, hallar el margen de ganancia; la respuesta para una razón de amortiguamiento igual a 0.7 en una banda menor al 2%; ubicación de los polos de igual ganancia y la razón de amortiguamiento para que se establezca con $W_n T_s < 4$ seg. en una banda del 5%.

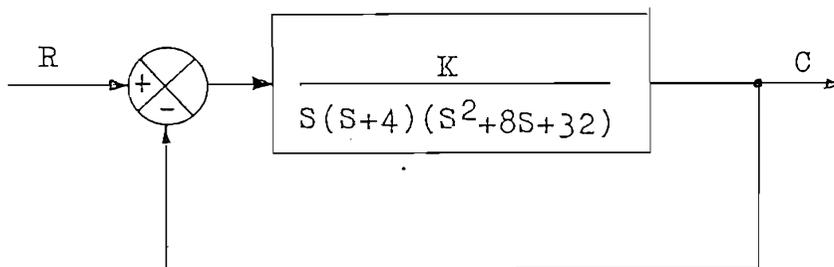


FIG. 3.1 Diagrama de bloques del ejemplo 3.1

En este caso tendremos que:

$$GH(s) = \frac{K}{S(S+4)(S^2+8S+32)}$$

para ingresar estos datos existen dos alternativas: factorar la expresión $S^2+8S+32$; o multiplicar todos los factores con lo que resultaría:

$$GH(s) = \frac{K}{S^4+12S^3+64S^2+128S}$$

Los parámetros que debemos tener en cuenta para utilizar el programa son:

épsilon de trabajo = normal

grado del numerador = 0

grado del denominador = 4

ganancia del numerador = 1

coeficientes del denominador:

$$S^4 = 1$$

$$S^3 = 12$$

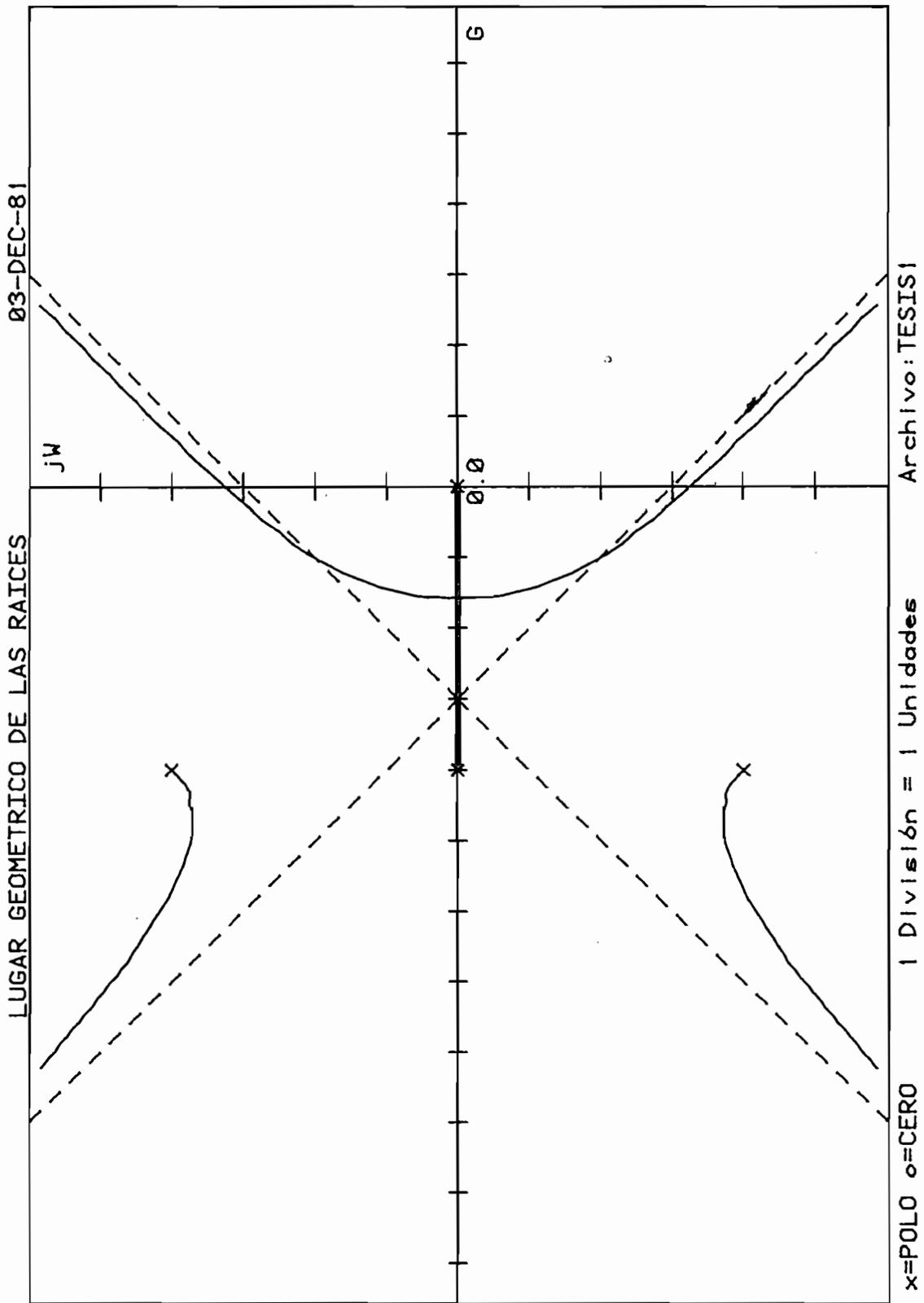
$$S^2 = 64$$

$$S^1 = 128$$

$$S^0 = 0$$

archivo de resultados = TESIS1

Ingresados y procesados estos datos, se encuentran a continuación sus resultados.



ESCUELA POLITECNICA NACIONAL
FACULTAD DE INGENIERIA ELECTRICA
SISTEMAS DE CONTROL

FECHA : 02-DEC-81 18:07:06

LUGAR GEOMETRICO DE LAS RAICES

Archivo ; TESIS1

FUNCION DE TRANSFERENCIA DE LAZO ABIERTO GH(s)

Ganancia estática 1
Grado del numerador 0
Grado del denominador 4

Coefficientes del denominador :

s**4	s**3	s**2	s**1	s**0
1.00	12.00	64.00	128.00	0.00

Polos y ceros de lazo abierto:

Parte real	Parte imag,	Tipo	Observaciones
0.00	0.00	POLO	
-4.00	0.00	POLO	
-4.00	-4.00	POLO	Conjugado
-4.00	4.00	POLO	Conjugado

Puntos de separación en el eje real :

#	Valor	Validez
1	-1.58	SI

ESCUELA POLITECNICA NACIONAL
FACULTAD DE INGENIERIA ELECTRICA
SISTEMAS DE CONTROL

FECHA : 02-DEC-81 19:42:05

LUGAR GEOMETRICO DE LAS RAICES

Archivo : TESIS1

MARGEN DE GANANCIA Y MARGEN DE FASE

Ganancia estática 1
Ganancia crítica 566.168061574
Margen de ganancia 566.168061574
Punto de cruce de fase 0 +/- J3.25620393064

RESPUESTA COMO SISTEMA DE SEGUNDO ORDEN A UNA ENTRADA ESCALON

-Razon de amortiguamiento 0.7
Sobrenivel porcentual 4.60 %
Angulo desde eje real 45.5729959992 grados
Ganancia en corte con LGR 114.767589235
Frecuencia no amortiguada ω_n 1.8188247364 1/seg
Frecuencia amortiguada ω_d 1.15433894008 1/seg
Constante de amortiguamiento -1.40556929148
Constante de tiempo 0.711455497828
Tiempo Pico T_p 2.72155130916 seg
T de estabilizacion (banda<5%) 2.37085753822 seg
T de estabilizacion (banda<2%) 3.02275761702 seg

ESCUELA POLITECNICA NACIONAL
FACULTAD DE INGENIERIA ELECTRICA
SISTEMAS DE CONTROL

FECHA : 02-DEC-81 19:18:34

LUGAR GEOMETRICO DE LAS RAICES

Archivo : TESIS1

MARGEN DE GANANCIA Y MARGEN DE FASE

Ganancia estatica	1
Ganancia critica	566,168061574
Margen de ganancia	566,168061574
Punto de cruce de fase	0 +/- J3,25620393064

RAZON DE AMORTIGUAMIENTO CON ω_n CONSTANTE

-T de estabilizacion menor a	4	%
-Banda de respuesta menor a	5	%
Razon de amortiguamiento mayor a	0,8	

Ejemplo 3.2 Dada la función de transferencia:

$$\frac{C(s)}{R(s)} = \frac{K}{s^2 + as + k}$$

- a) Dibujar el LGR para $K=4$ y determinar la variación de a para razón de amortiguamiento $\delta > 0.5$;
- b) Dibujar el LGR para $a=2$ y determinar el rango de K si la razón de amortiguamiento es $0.4 \leq \delta \leq 0.7$
- c) Determinar la razón de amortiguamiento y los valores de K y a en el punto de cruce de los dos LGR.

- a) Para buscar la variación de a , la ecuación característica se debe escribir como:

$$1 + \frac{aS}{s^2 + k} = 0$$

para que $K = 4$, entonces

$$GH(s) = \frac{aS}{s^2 + 4}$$

que puede ingresarse para el cálculo como TESIS2.

- b) Para buscar la variación de K ; la ecuación característica se puede escribir como:

$$1 + \frac{K}{s^2 + aS} = 0$$

para $a = 2$, entonces

$$GH(s) = \frac{K}{s^2 + 2S}$$

ESCUELA POLITECNICA NACIONAL
FACULTAD DE INGENIERIA ELECTRICA
SISTEMAS DE CONTROL

FECHA : 03-DEC-81 02:40:45

LUGAR GEOMETRICO DE LAS RAICES

Archivo : TESIS21

FUNCION DE TRANSFERENCIA DE LAZO ABIERTO GH(s)

Manancia estática 1
Grado del numerador 0
Grado del denominador 2

Coefficientes del denominador :

***2 ***1 ***0
1.00 2.00 0.00

Polos y ceros de lazo abierto:

Parte real	Parte imas.	Tipo	Observaciones
0.00	0.00	POLO	
-2.00	0.00	POLO	

Puntos de separación en el eje real :

#	Valor	Validez
1	-1.00	SI

ESCUELA POLITECNICA NACIONAL
FACULTAD DE INGENIERIA ELECTRICA
SISTEMAS DE CONTROL

FECHA : 03-DEC-81 02:49:28

LUGAR GEOMETRICO DE LAS RAICES

Archivo : TESIS2

RAZON DE AMORTIGUAMIENTO

-Desde el punto	--0.985768085106 + j(1.71555957447)
-Razon de amortiguamiento	0.4982133255
Sobrenivel porcentual	16.44 %
Angulo desde eje real	60.1181352026 grados
Ganancia en corte con LGR	1.99331755433
Frecuencia no amortiguada ω_n	1.97860642149 1/ses
Frecuencia amortiguada ω_d	1.71555957447 1/ses
Constante de amortiguamiento	--0.985768085106
Constante de tiempo	1.01443738655
Tiempo Pico T_p	1.83123495118 ses
T de estabilizacion (banda<5%)	3.18369582101 ses

ESCUELA POLITECNICA NACIONAL
FACULTAD DE INGENIERIA ELECTRICA
SISTEMAS DE CONTROL

FECHA : 03-DEC-81 02:36:04

LUGAR GEOMETRICO DE LAS RAICES

Archivo : TESIS21

RAZON DE AMORTIGUAMIENTO

-Desde el punto	-0.985768085106 + j(1.74155744681)
-Razon de amortiguamiento	0.492590972952
Sobrenivel porcentual	16.89 %
Angulo desde eje real	60.4889785616 grados
Ganancia en corte con LGR	4.03312444726
Frecuencia no amortiguada ω_n	2.00118991057 1/seg
Frecuencia-amortiguada ω_d	1.74155744681 1/seg
Constante de amortiguamiento	-0.985768085106
Constante de tiempo	1.01443738655
Tiempo pico T_p	1.80389837806 ses
T de estabilizacion (banda<5%)	3.17995123051 ses

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL
FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA
SISTEMAS DE CONTROL

FECHA : 03-DEC-81 02:51:09

LUGAR GEOMÉTRICO DE LAS RAÍCES

Archivo : TESIS2

RESOLUCIÓN DE $D(s) + K * N(s) = 0$

Ganancia estática 1
Ganancia dinámica 2
--Ganancia total 2

RAÍZ	PARTE REAL	PARTE IMAG.
1	-1.00	-1.73
2	-1.00	1.73

ESCUELA POLITECNICA NACIONAL
FACULTAD DE INGENIERIA ELECTRICA
SISTEMAS DE CONTROL.

FECHA : 03-DEC-81 02:39:39

LUGAR GEOMETRICO DE LAS RAICES

Archivo : TESIS21

RESOLUCION DE $D(s) + K * N(s) = 0$

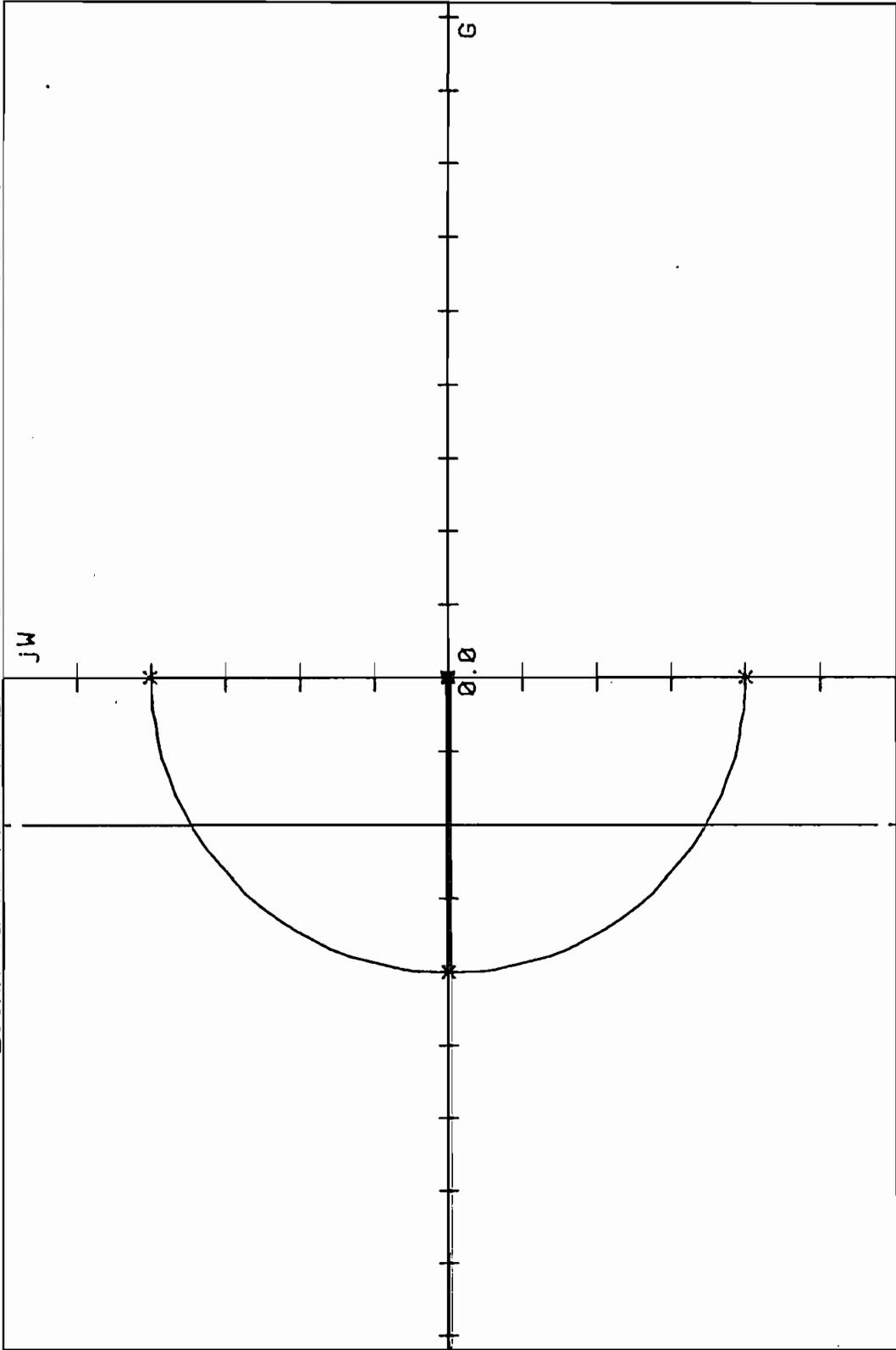
Ganancia estática 1

Ganancia dinámica 4

-Ganancia total 4

RAIZ	PARTE REAL	PARTE IMAG.
1	-1.00	-1.73
2	-1.00	1.73

LUGAR GEOMETRICO DE LAS RAICES 03-DEC-81



x=POLO o=CERO 1 División = 0.5 Unidades Archivo:TESIS21

Ejercicio 3.3 Como se había mencionado que las facilidades que presta este programa, podrían utilizarse en compensación se adjunta el presente ejercicio; desarrollado en el libro de Richard Dorf(3) pp: 349-350; a pesar de que el fundamento teórico no se lo haya desarrollado; advirtiéndose en este caso, que el programa puede usarse como una simple herramienta.

Dada la función de transferencia no compensada de red abierta:

$$GH(s) = \frac{K}{S(S+2)}$$

se necesita que la razón de amortiguamiento de las raíces complejas dominantes sea 0.45 y se obtenga una constante de velocidad del sistema igual a 20.

Para $\zeta=0.45$ el punto del LGR (negro) es $s = -1+j2$ y ganancia $K=5$, por lo que la constante de velocidad es:

$$K_v = \frac{K}{2} = 5/2 = 2.5$$

Por lo que la relación del cero (z) al polo (p) del compensador es:

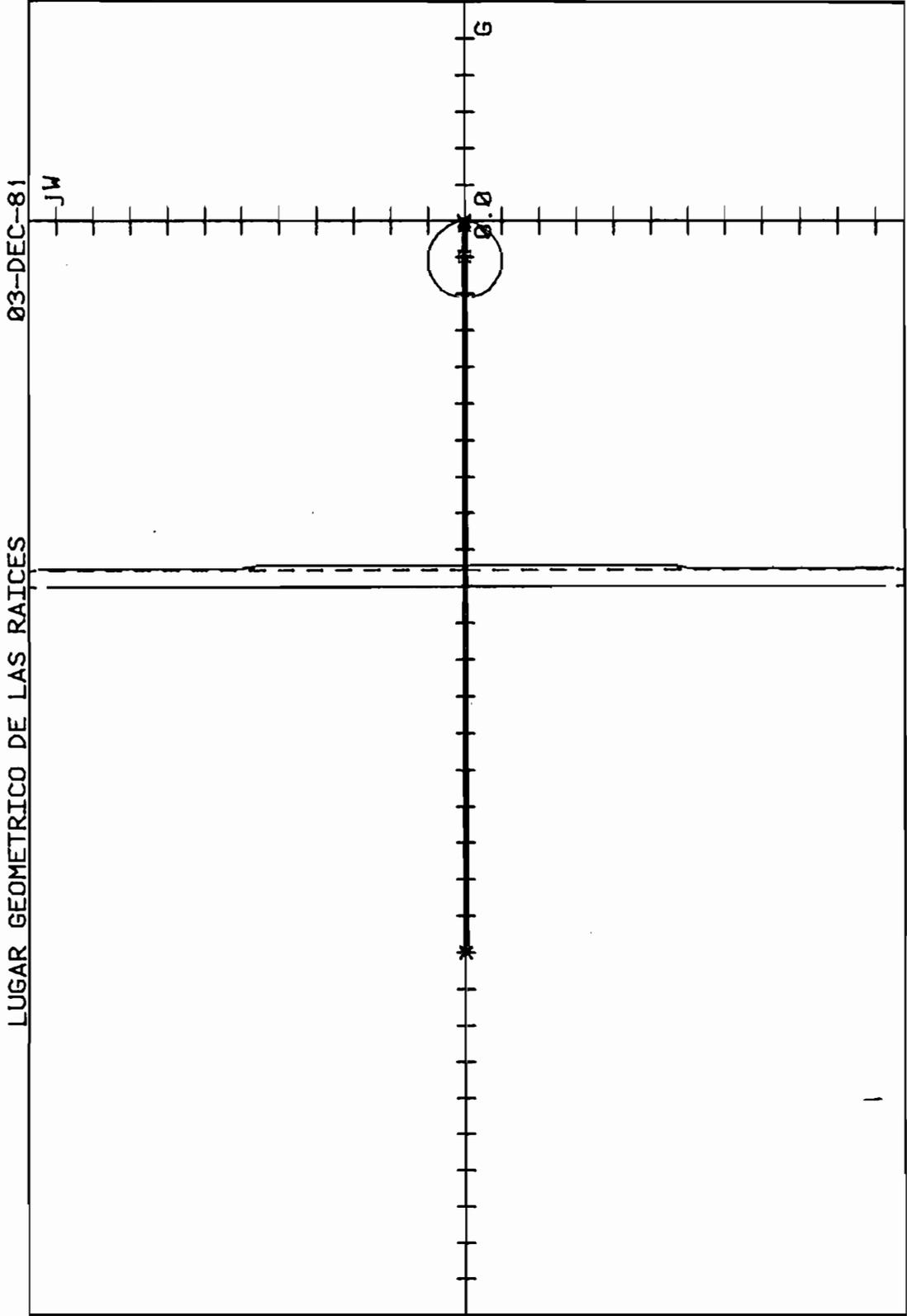
$$\frac{z}{p} = \frac{K_v \text{ (comp.)}}{K_v \text{ (no c.)}} = \frac{20}{2.5} = 8$$

al examinar un esbozo del sistema compensado (como el LGR en rojo) se puede colocar un cero en -0.1 y entonces el polo estará en $-0.1/8$, con esto la variación de las raíces domi-

antes es imperceptible, y por tanto la función de transferencia directa del sistema compensado será:

$$GH(S) = \frac{5(S+0.1)}{S(S+2)(S+0.0125)}$$

Los LGR respectivos obtenidos en el equipo se muestran en la siguiente página.



ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL
FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA
SISTEMAS DE CONTROL

FECHA : 03-DEC-81 05:40:21

LUGAR GEOMÉTRICO DE LAS RAÍCES

Archivo : TESIS3

FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA DE LAZO ABIERTO GH(s)

Gainancia estática 1
Grado del numerador 0
Grado del denominador 2

Coefficientes del denominador :

s**2 s**1 s**0
1.00 2.00 0.00

Polos y ceros de lazo abierto:

Parte real	Parte imag	Tipo	Observaciones
0.00	0.00	POLO	
-2.00	0.00	POLO	

Puntos de separación en el eje real :

#	Valor	Validez
1	-1.00	SI

ESCUELA POLITECNICA NACIONAL
 FACULTAD DE INGENIERIA ELECTRICA
 SISTEMAS DE CONTROL

FECHA : 03-DEC-81 05:43:01

LUGAR GEOMETRICO DE LAS RAICES

Archivo : TESIS31

FUNCION DE TRANSFERENCIA DE LAZO ABIERTO GH(s)

Ganancia estática 5
 Grado del numerador 1
 Grado del denominador 3

Coefficientes del numerador :

s**1 s**0
 1.00 0.10

Coefficientes del denominador :

s**3 s**2 s**1 s**0
 1.00 2.01 0.03 0.00

Polos y ceros de lazo abierto:

Parte real	Parte imag.	Tipo	Observaciones
0,00	0,00	POLO	
-0,01	0,00	POLO	
-0,10	0,00	CERO	
-2,00	0,00	POLO	

Puntos de separación en el eje real :

#	Valor	Validez
1	-0,01	SI
2	-0,21	SI
3	-0,94	SI

Ejercicio 3.4

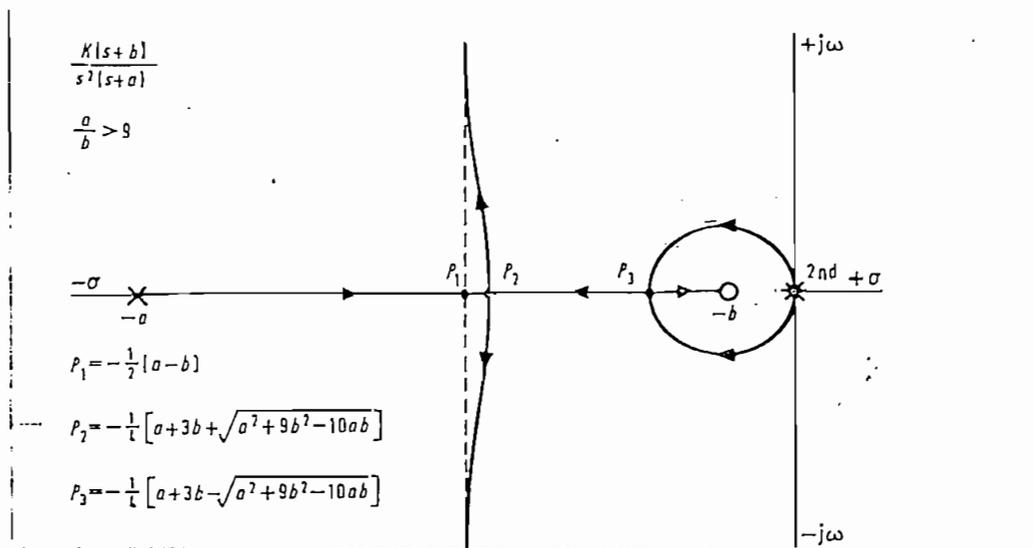
A continuación se presentan varios ejercicios especiales; con el caso general y el dibujo obtenido utilizando el programa para un caso específico.

Se puede notar la exactitud de ciertos puntos importantes reemplazando los valores en las ecuaciones del caso general.

Además se incluyen gráficos que visualizan la modificación del LGR, cuando se añade uno o varios ceros, a la función de transferencia de lazo abierto, y uno o varios polos.

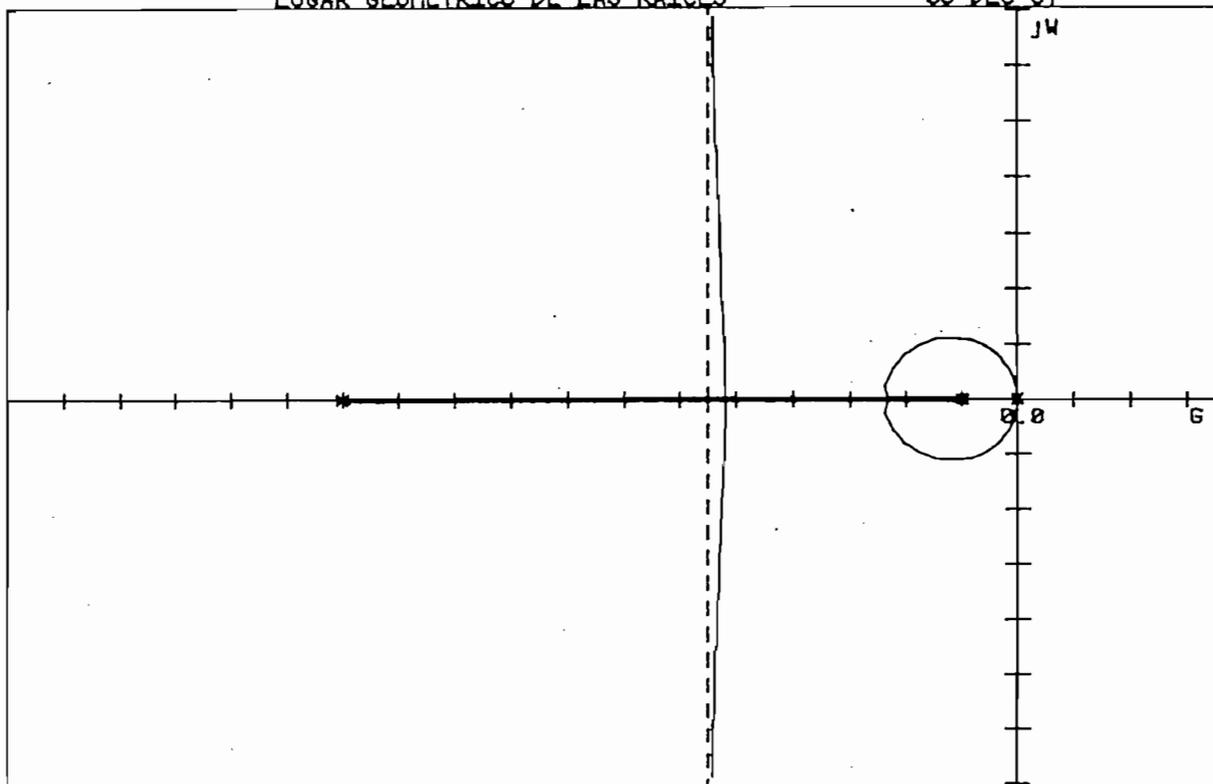
Los gráficos correspondientes son:

- Archivo TESIS \emptyset LGR original 1.
- Archivo TESIS $\emptyset\emptyset$ añadido 1 polo
- Archivo TESIS $\emptyset\emptyset\emptyset$ añadido 2 polos
- Archivo TESIS P LGR original 2.
- Archivo TESIS PP añadido 1 cero
- Archivo TESIS PPP añadido 2 ceros



LUGAR GEOMETRICO DE LAS RAICES

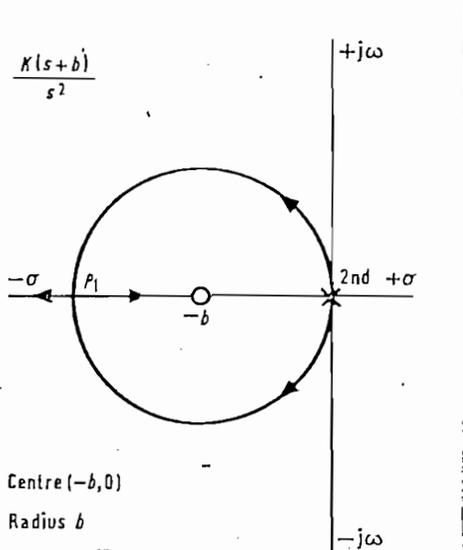
03-DEC-81



x=POLO o=CERO

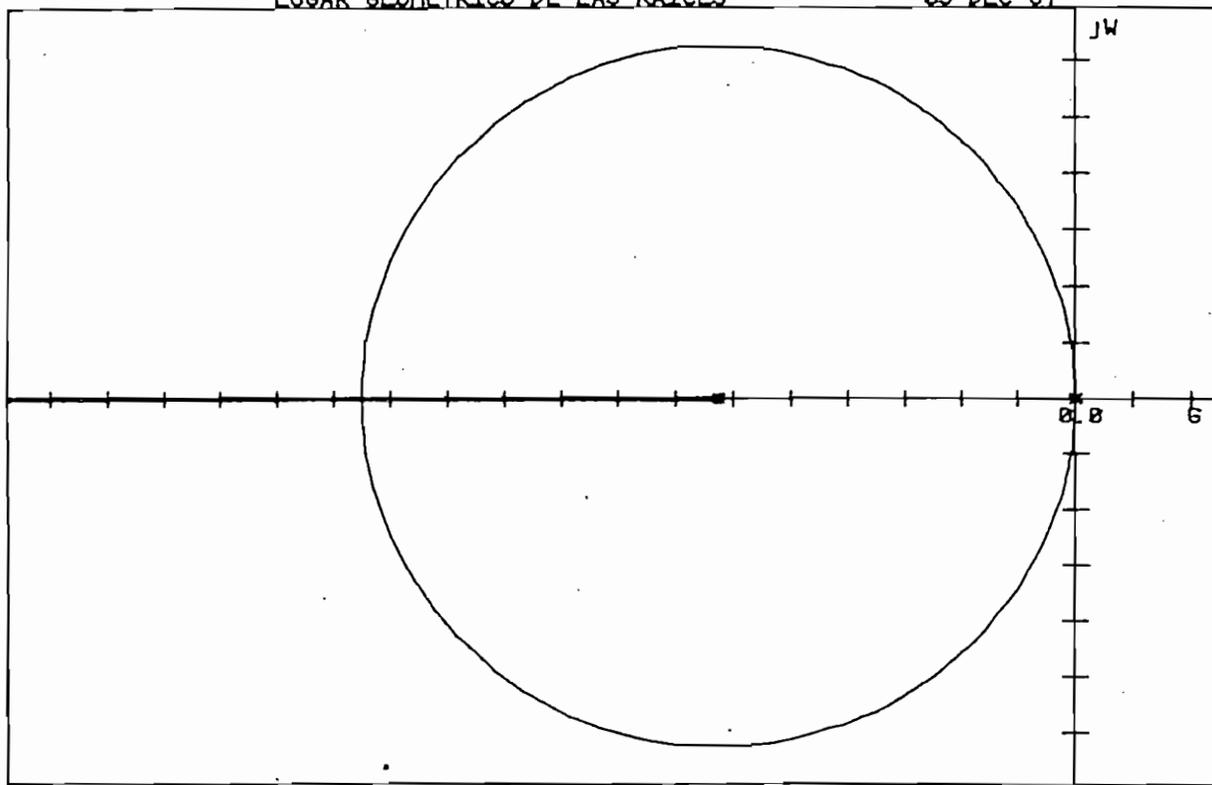
1 División = 1 Unidades

Archivo:TESIS41



LUGAR GEOMETRICO DE LAS RAICES

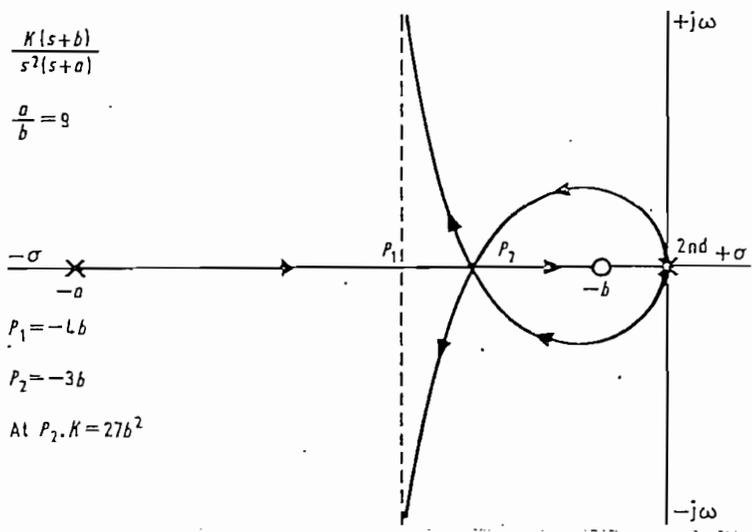
03-DEC-81



x=POLO o=CERO

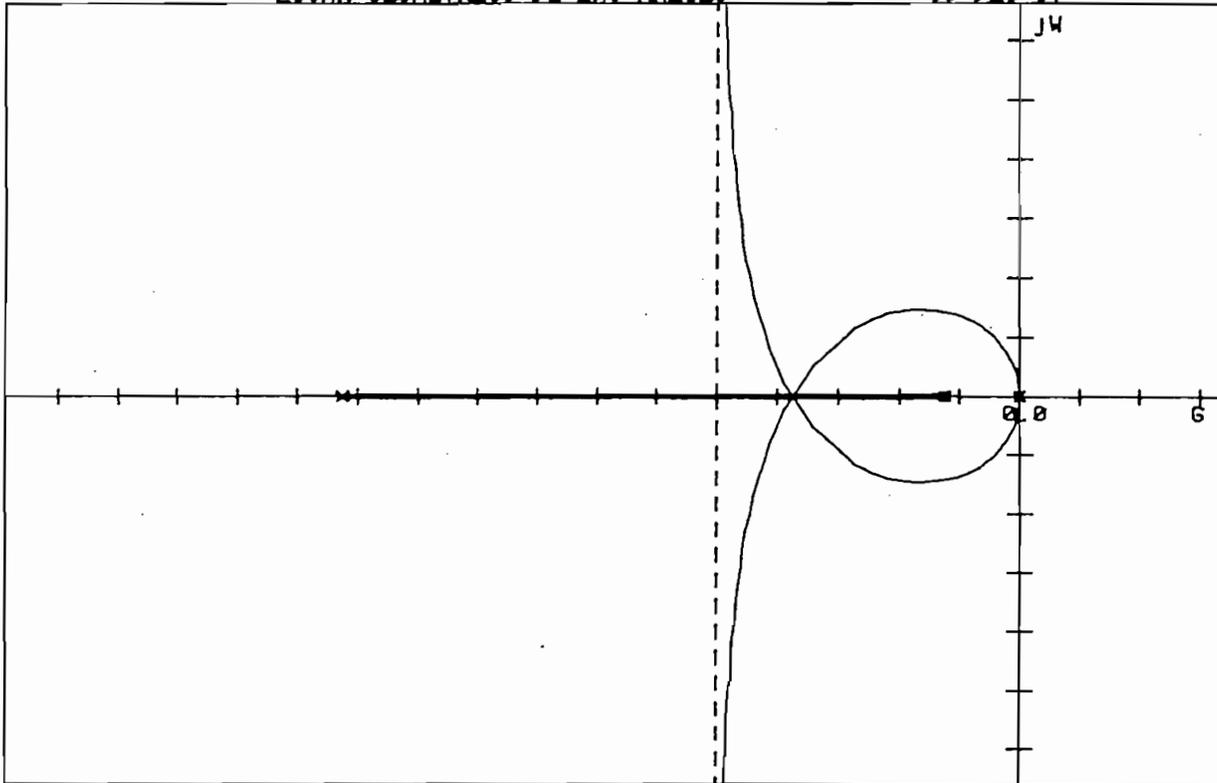
1 División = 0.8 Unidades

Archivo:TESIS42



LUGAR GEOMETRICO DE LAS RAICES

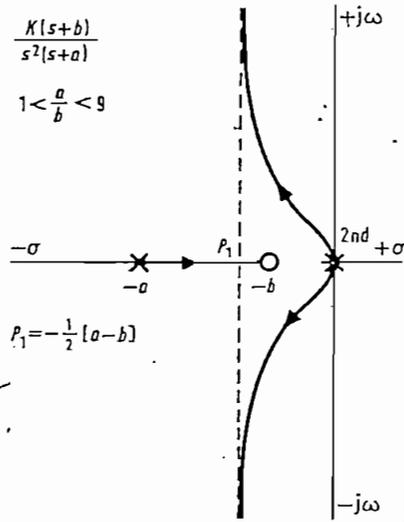
03-DEC-81



x=POLO o=CERO

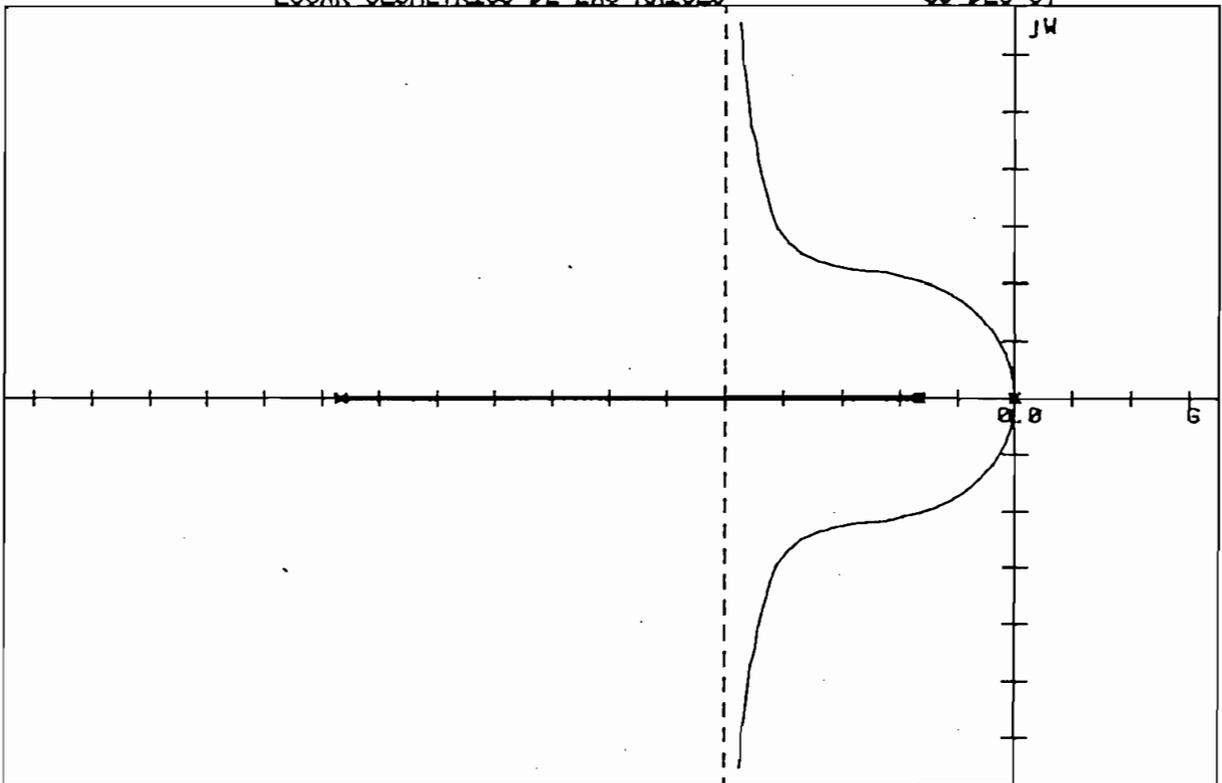
1 División = 0.8 Unidades

Archivo:TESIS43



LUGAR GEOMETRICO DE LAS RAICES

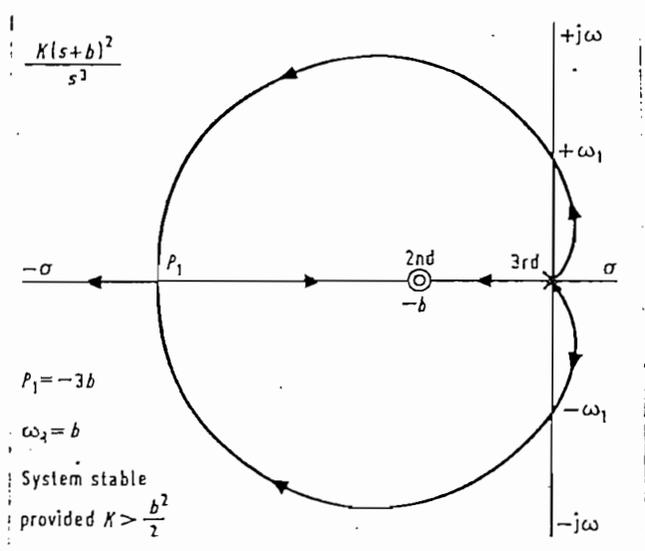
03-DEC-81



x=POLO o=CERO

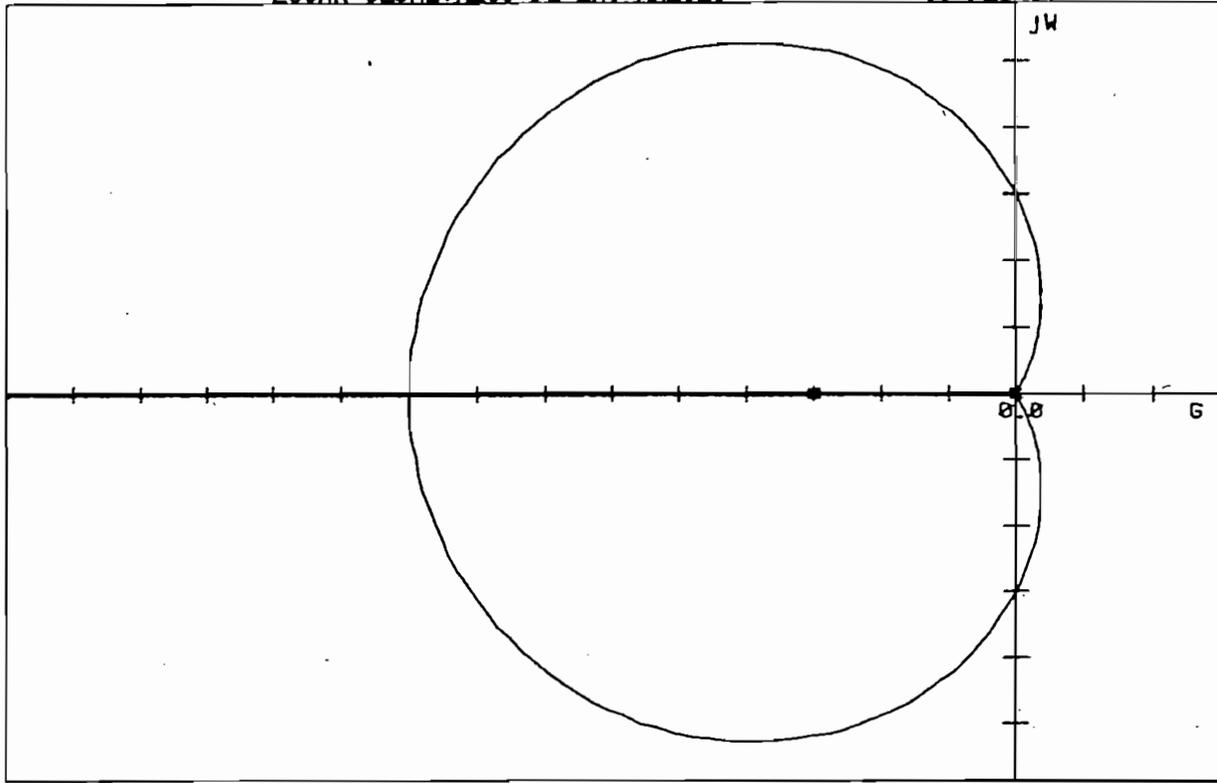
1 División = 0.8 Unidades

Archivo:TESIS44



LUGAR GEOMETRICO DE LAS RAICES

03-DEC-81



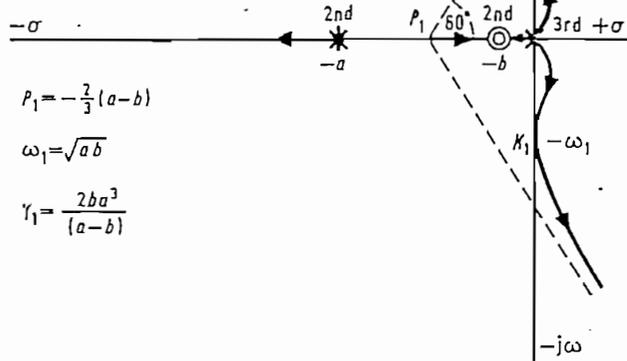
x=POLO o=CERO

1 División = 1 Unidades

Archivo:TESIS46

$$\frac{K(s+b)^2}{s^3(s+a)^2}$$

$$a = (3 + 2\sqrt{2})b$$



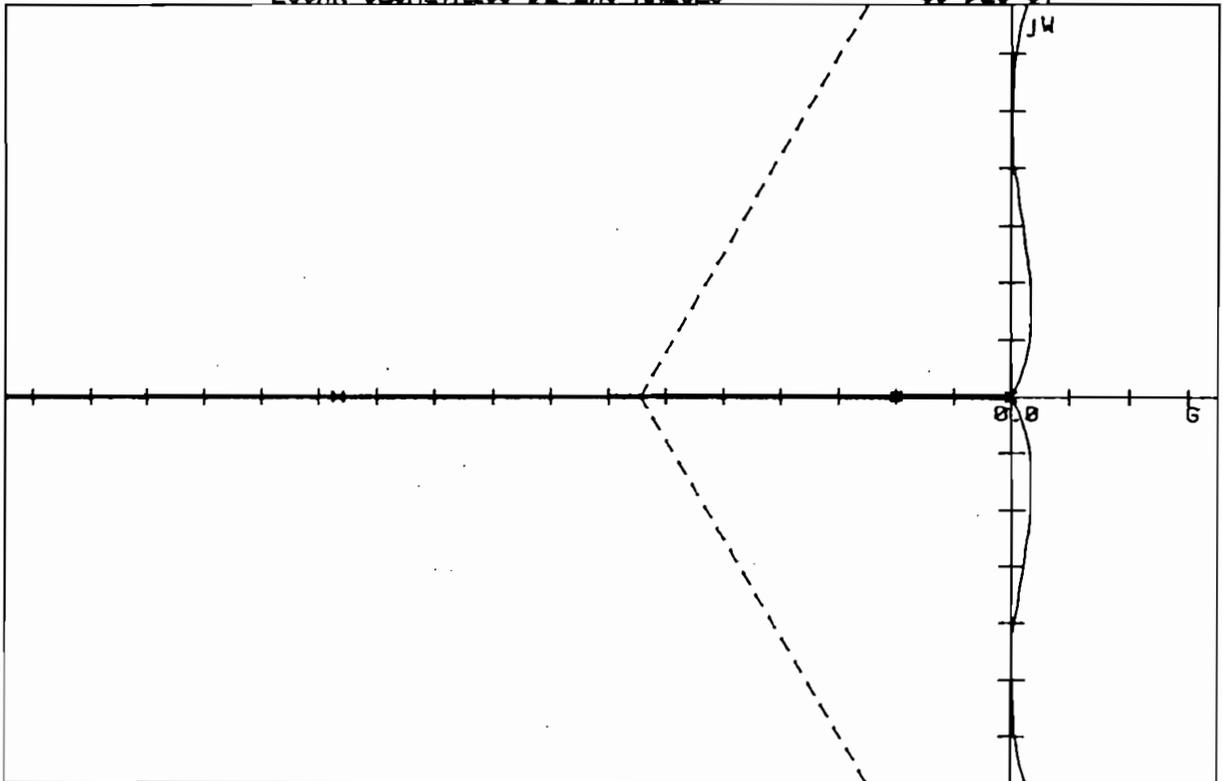
$$P_1 = -\frac{2}{3}(a-b)$$

$$\omega_1 = \sqrt{ab}$$

$$\gamma_1 = \frac{2ba^3}{(a-b)}$$

LUGAR GEOMETRICO DE LAS RAICES

03-DEC-81



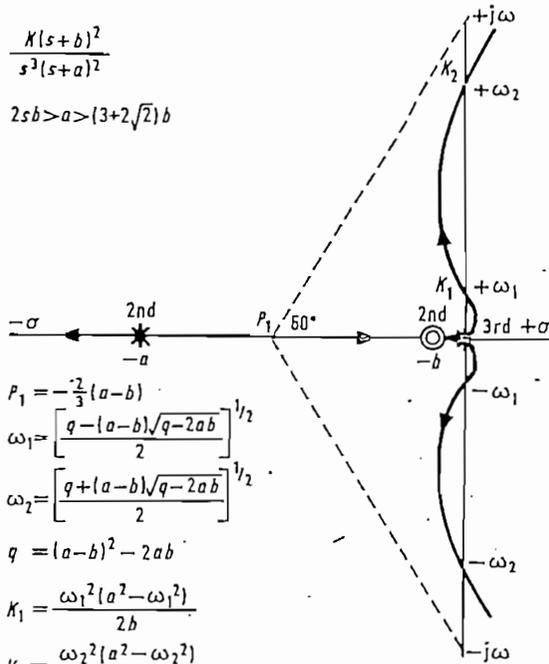
x=POLO o=CERO

1 División = 1 Unidades

Archivo:TESIS47

$$\frac{K(s+b)^2}{s^3(s+a)^2}$$

$$2sb > a > (3+2\sqrt{2})b$$



$$P_1 = -\frac{2}{3}(a-b)$$

$$\omega_1 = \left[\frac{q - (a-b)\sqrt{q-2ab}}{2} \right]^{1/2}$$

$$\omega_2 = \left[\frac{q + (a-b)\sqrt{q-2ab}}{2} \right]^{1/2}$$

$$q = (a-b)^2 - 2ab$$

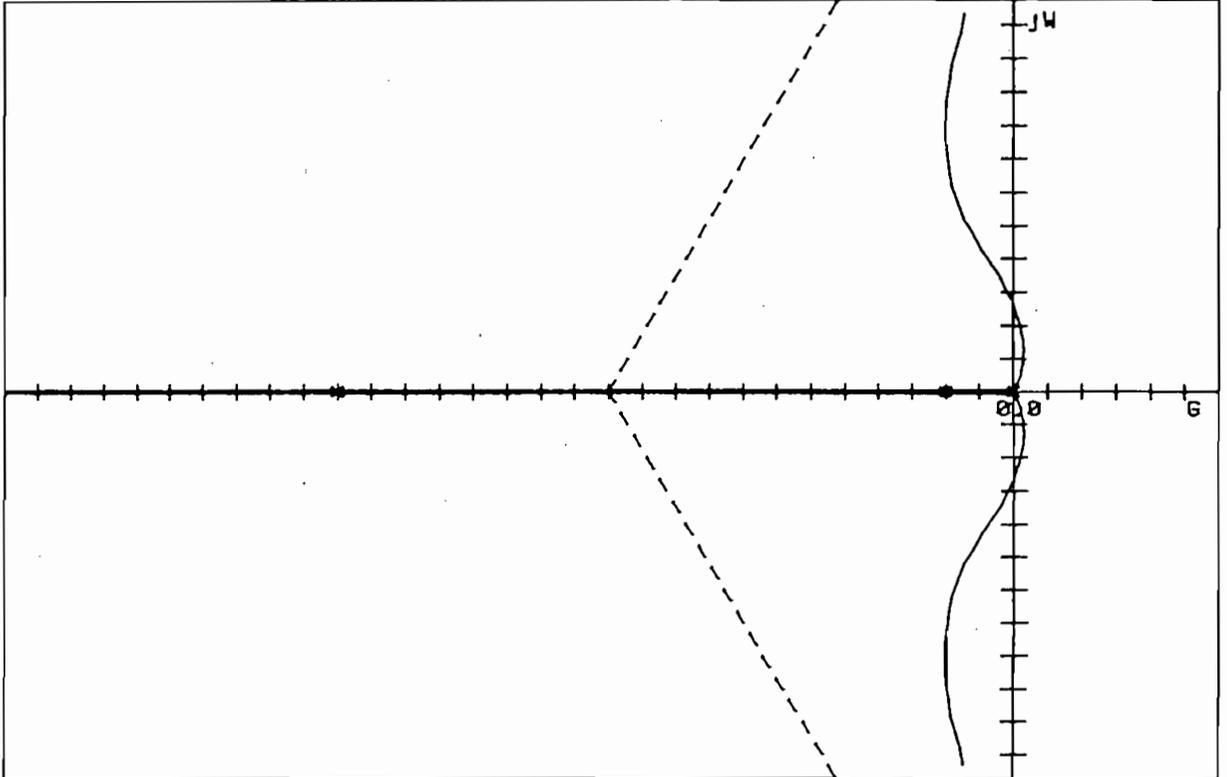
$$K_1 = \frac{\omega_1^2(a^2 - \omega_1^2)}{2b}$$

$$K_2 = \frac{\omega_2^2(a^2 - \omega_2^2)}{2b}$$

System stable provided
 $K_2 > K > K_1$

LUGAR GEOMETRICO DE LAS RAICES

03-DEC-81



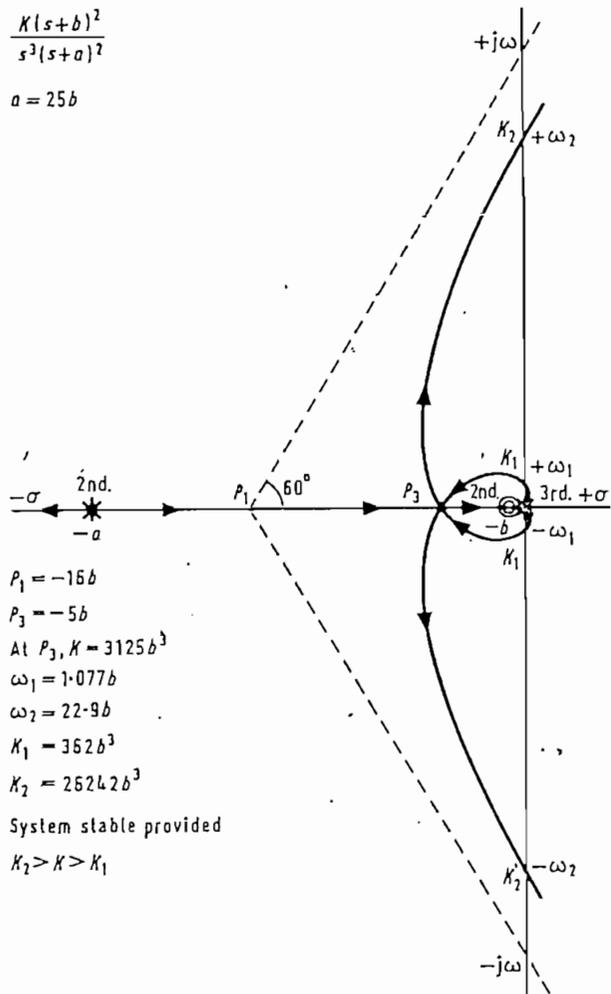
x=POLO o=CERO

1 División = 1 Unidades

Archivo:TESIS48

$$\frac{K(s+b)^2}{s^3(s+a)^2}$$

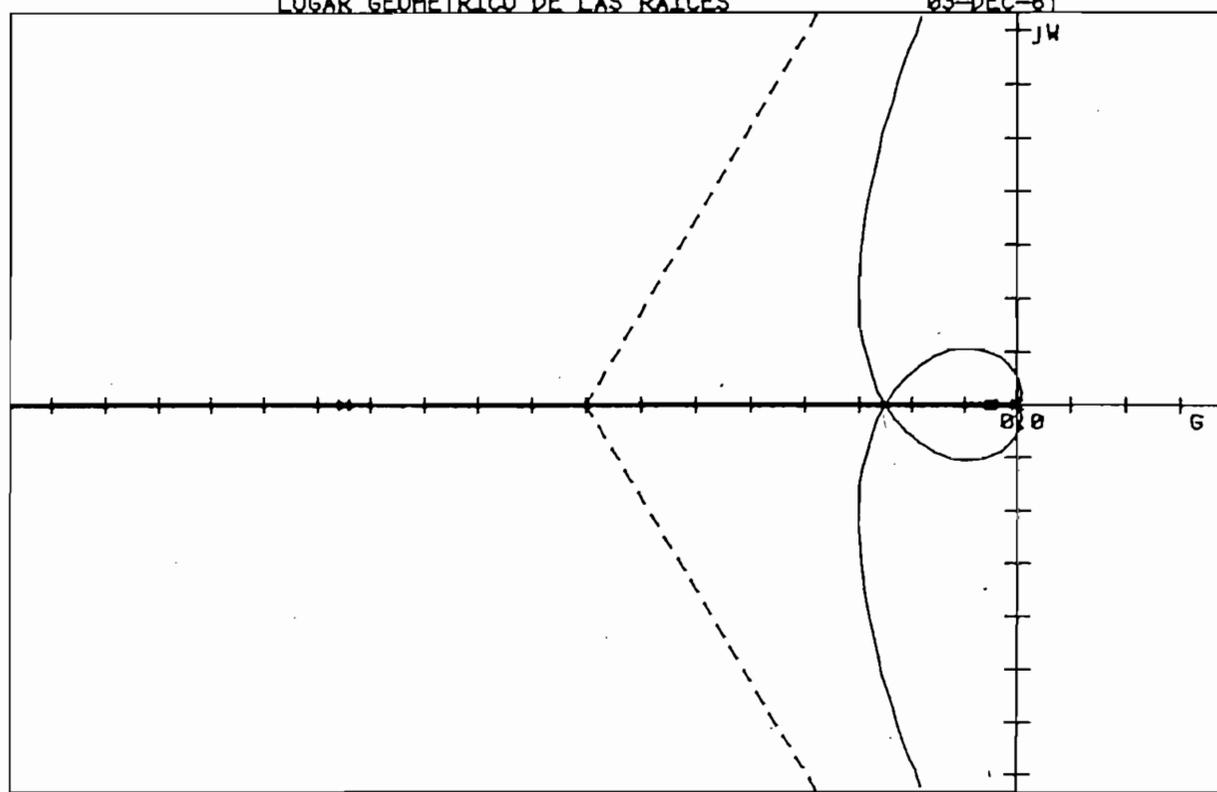
$$a = 25b$$



$P_1 = -16b$
 $P_3 = -5b$
 At $P_3, K = 3125b^3$
 $\omega_1 = 1.077b$
 $\omega_2 = 22.9b$
 $K_1 = 352b^3$
 $K_2 = 2526.2b^3$
 System stable provided
 $K_2 > K > K_1$

LUGAR GEOMETRICO DE LAS RAICES

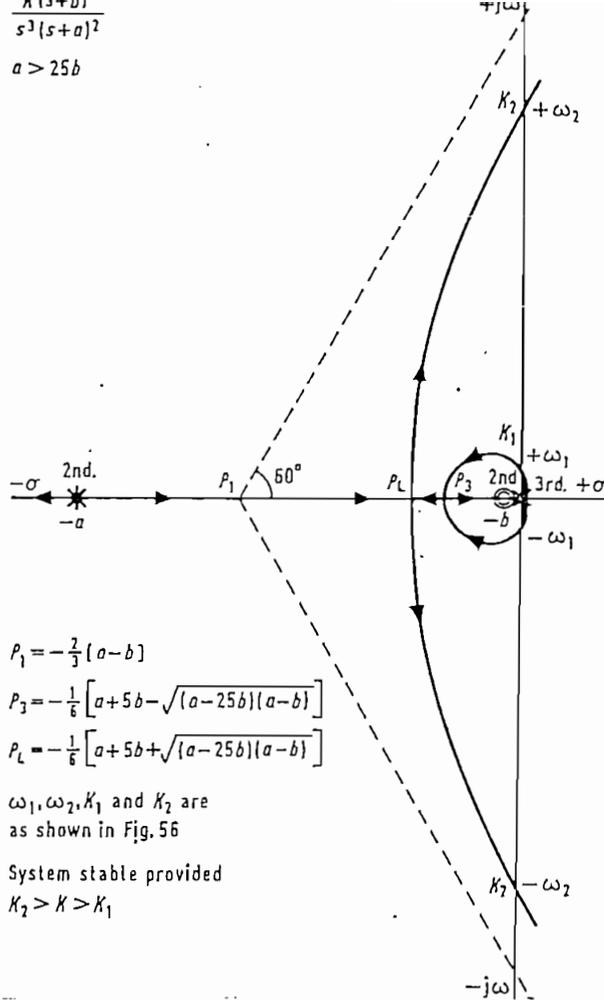
03-DEC-81



x=POLO o=CERO

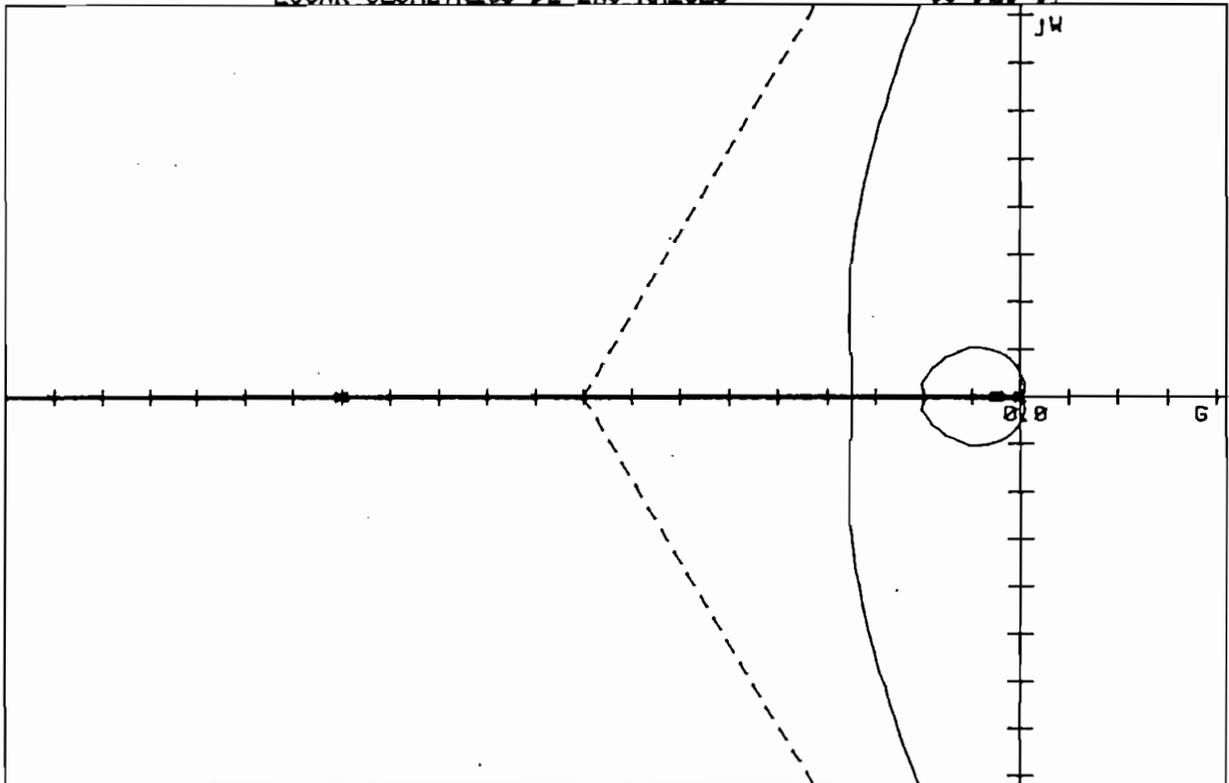
1 División = 2 Unidades

Archivo:TESIS49



LUGAR GEOMETRICO DE LAS RAICES

03-DEC-81



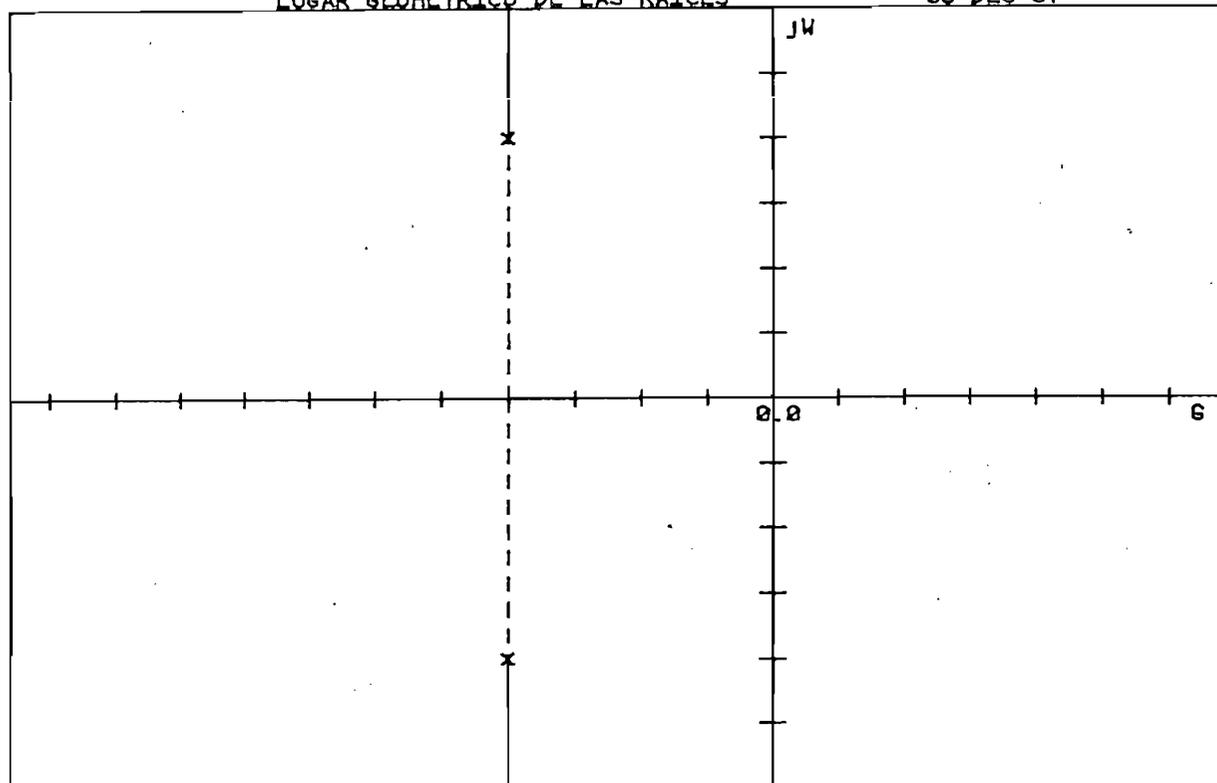
x=POLO o=CERO

1 División = 2 Unidades

Archivo:TESIS410

LUGAR GEOMETRICO DE LAS RAICES

03-DEC-81



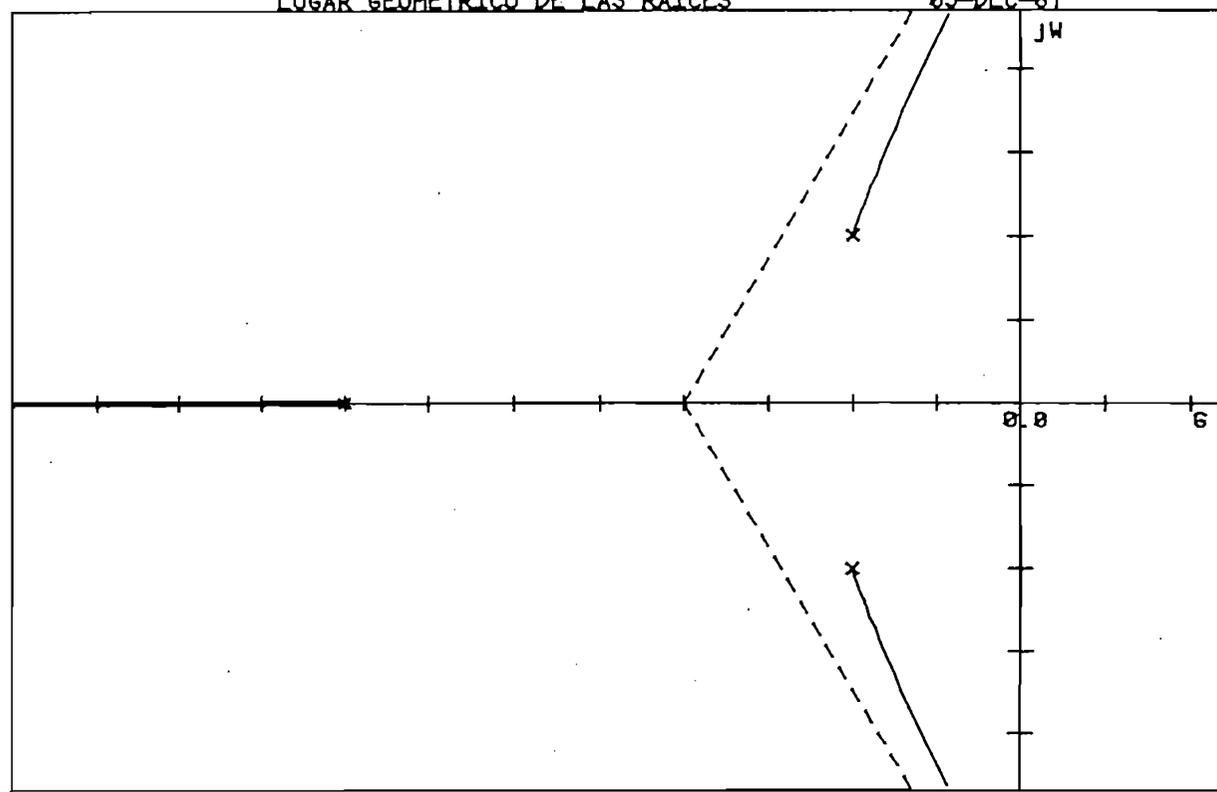
x=POLO o=CERO

1 División = 0.5 Unidades

Archivo:TESIS00

LUGAR GEOMETRICO DE LAS RAICES

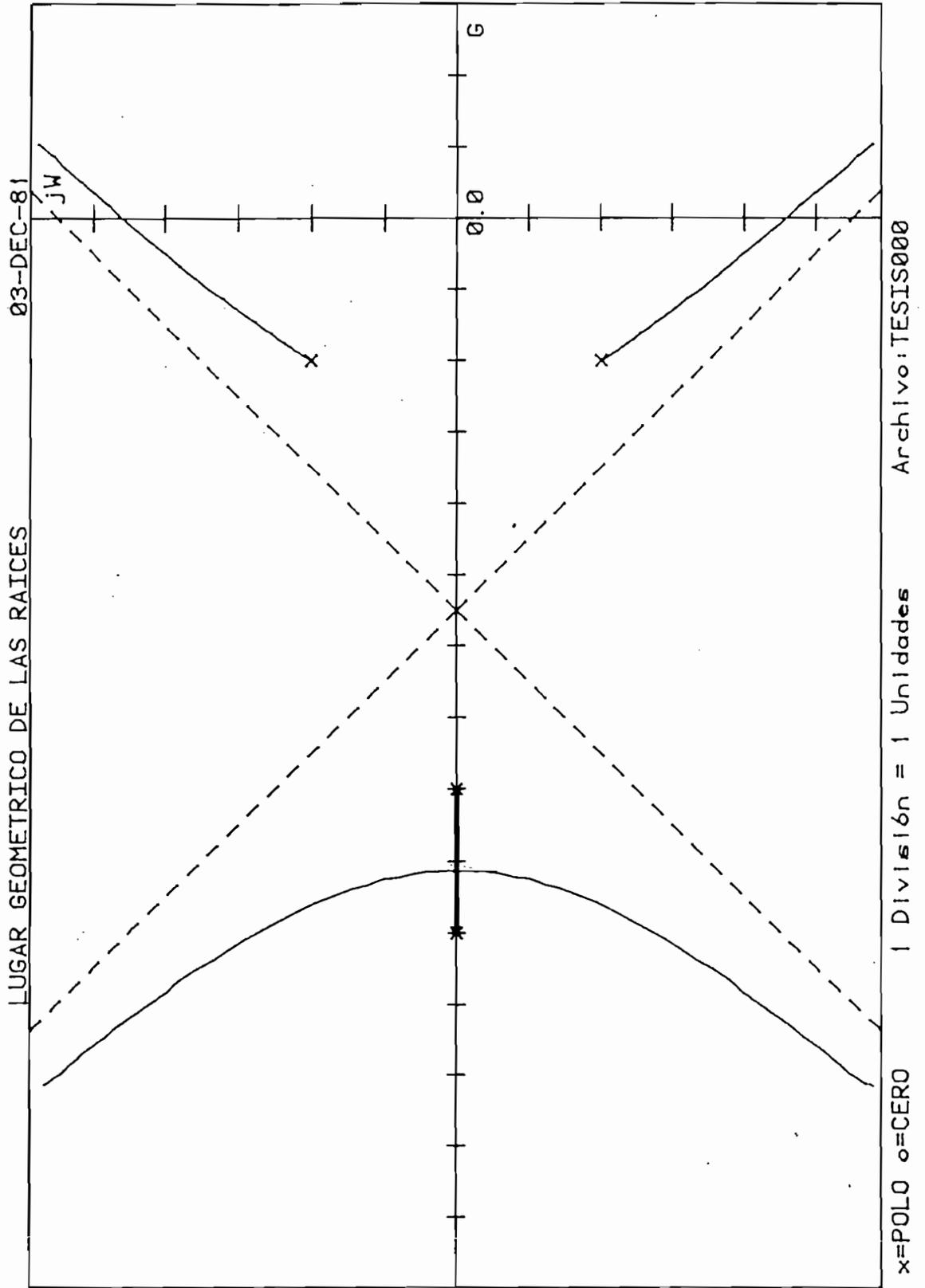
03-DEC-81



x=POLO o=CERO

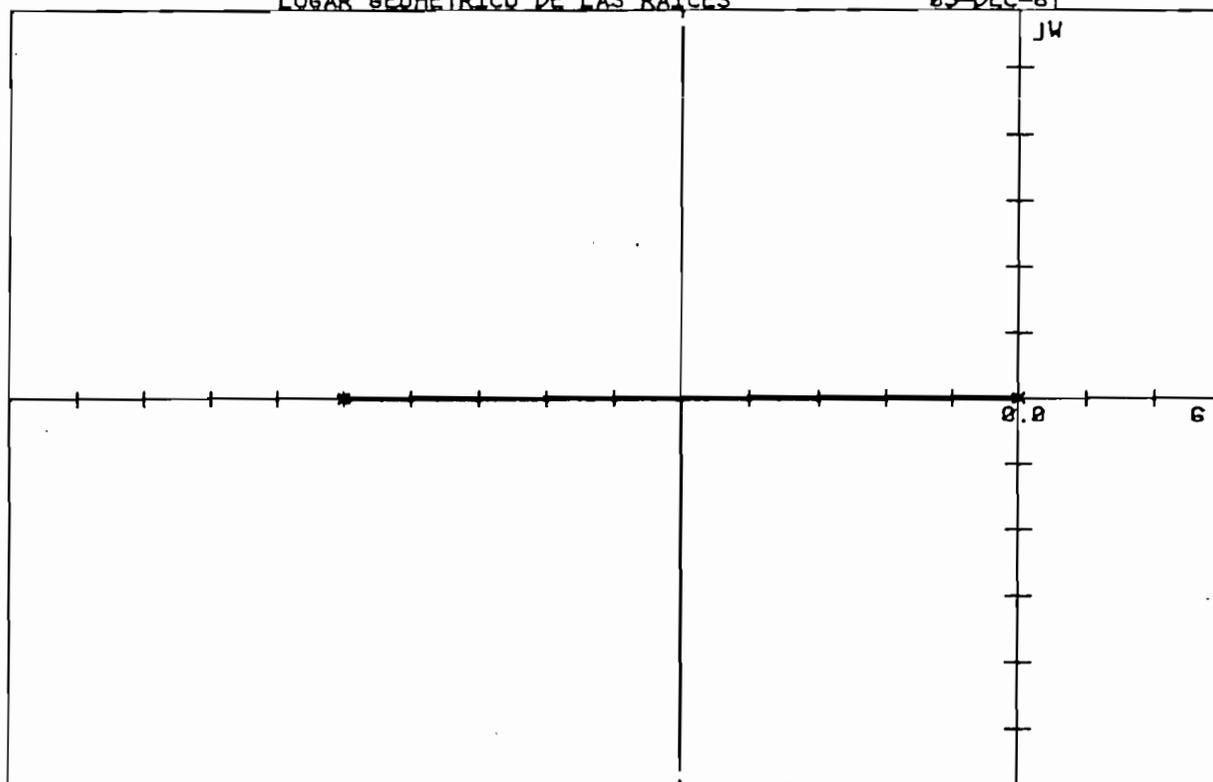
1 División = 1 Unidades

Archivo:TESIS00



LUGAR GEOMETRICO DE LAS RAICES

03-DEC-81



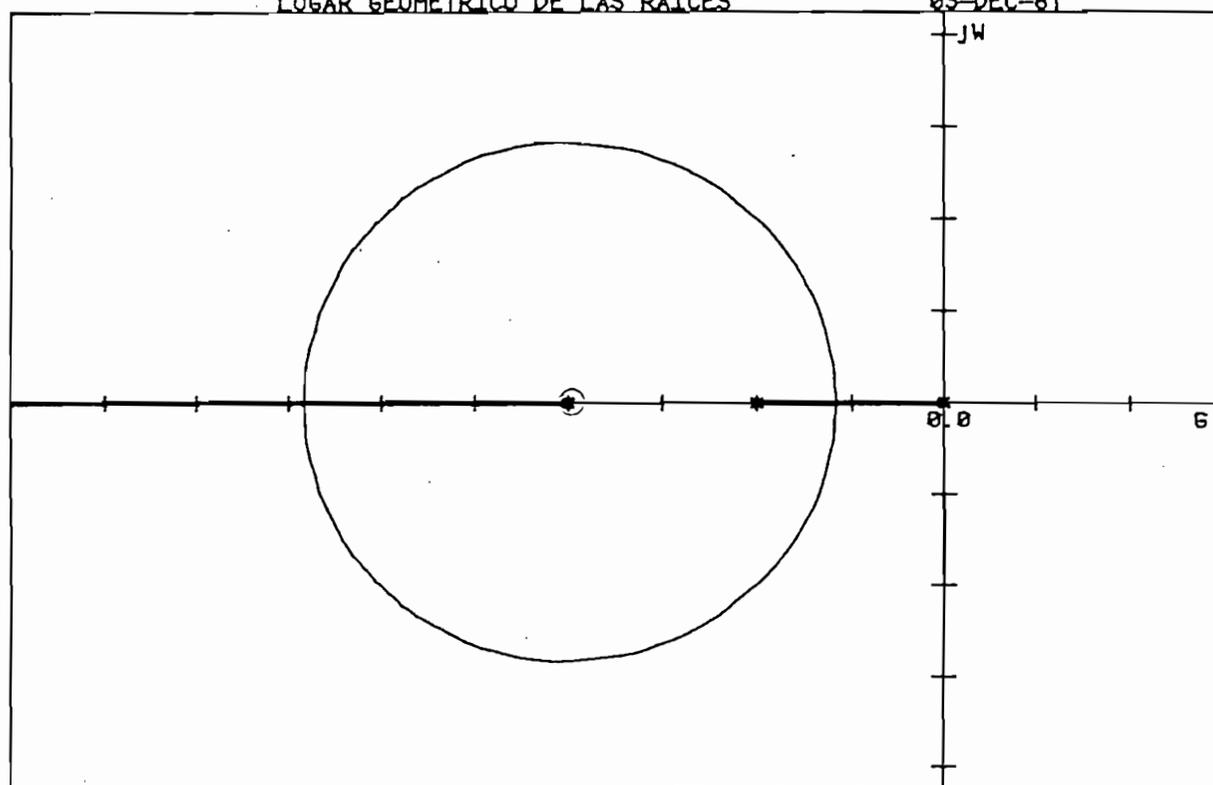
x=POLO o=CERO

1 División = 0.2 Unidades

Archivo:TESISP

LUGAR GEOMETRICO DE LAS RAICES

03-DEC-81



x=POLO o=CERO

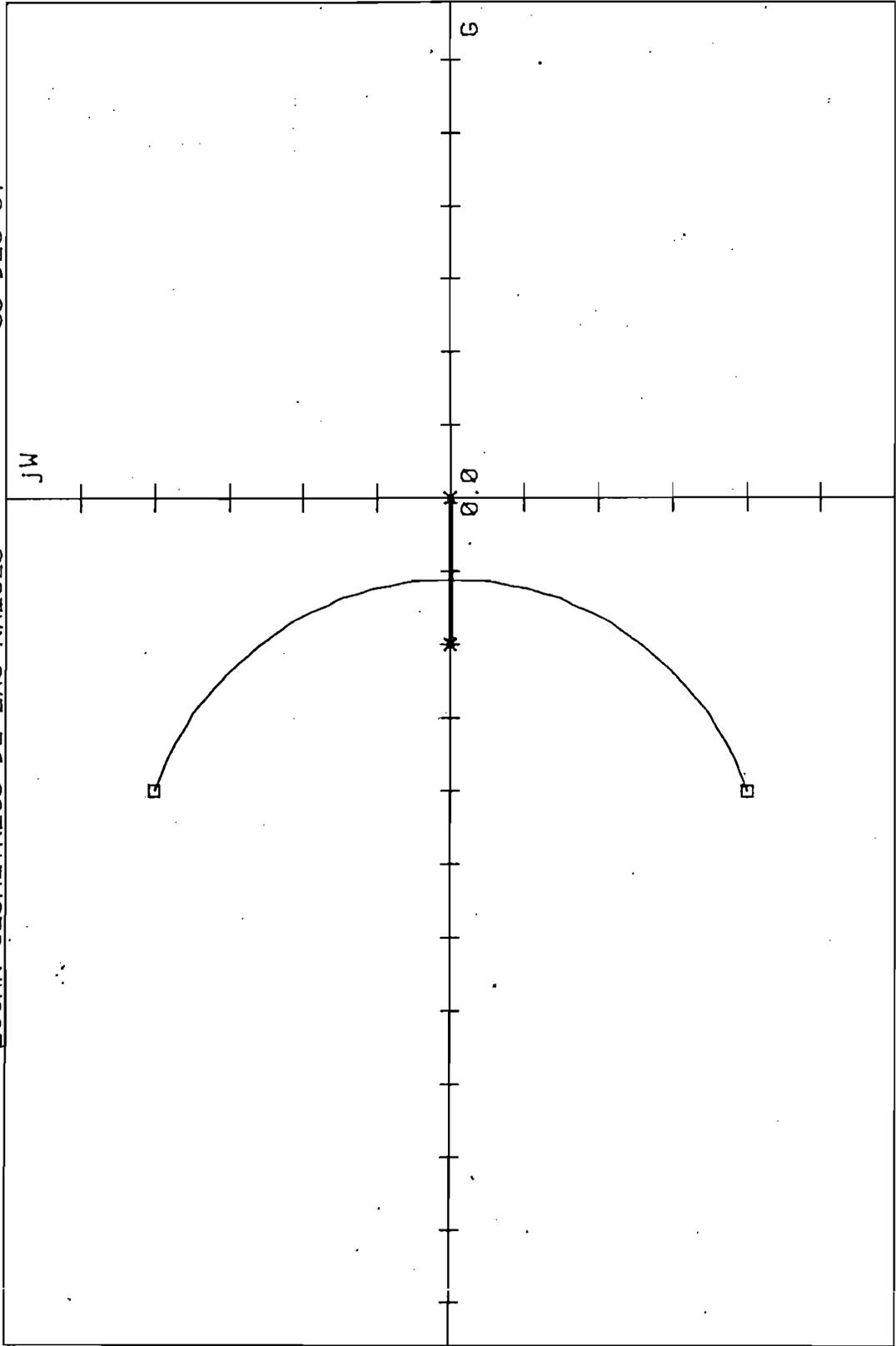
1 División = 1 Unidades

Archivo:TESISP

LUGAR GEOMETRICO DE LAS RAICES

03-DEC-81

JW



Archivo:TESISPPP

1 División = 1 Unidades

x=POLO o=CERO

CAPITULO IV

CONCLUSIONES Y PERSPECTIVAS

CAPITULO IV

Conclusiones y Perspectivas

El programa desarrollado para calcular, graficar y utilizar el LGR, se lo podrá ir apreciando con el uso que de él se de. La práctica señala que para la gran mayoría de casos, los resultados son muy satisfactorios al presentar una información concisa, requerimientos claros, validación de inconsistencias inmediata y posibilidad de reiniciar luego de una interrupción, sin mayores consecuencias.

4.1 Limitaciones

Dentro de las limitaciones del programa, existen varios niveles:

- los limitantes propios del equipo, respecto a memoria y rangos numéricos;
- el cálculo con valores muy pequeños es susceptible de tornarse confuso entre diferentes ramales;
- las bifurcaciones en puntos de separación complejos no se realizan sino en una sola dirección por considerarlos casos poco comunes, y;
- la confiabilidad de los resultados para la segunda parte se encuentra bajo el criterio del operador, de acuerdo a cada caso.

4.2 Conclusiones

Balanceando las ventajas y desventajas del uso del presente programa se puede concluir en que es una útil herramienta en el estudio de los sistemas de control; evitando el recargo inútil de tiempo en cálculos tediosos, repetitivos y que pueden inducir a errores.

Como cualquier otra actividad en la vida, la verdadera dimensión de la mayor o menor utilidad de este programa o la necesidad de reformas u optimizaciones se encontrará en función de la frecuencia de uso.

A pesar del empeño que se ha puesto en considerar todas las posibilidades de error, no se puede asegurar que en la práctica ocurra así.

4.3 Perspectivas

En cualquier tipo de cálculo automático (lo que hace un programa digital), el primer pensamiento para normar su utilización, es el mantenimiento y correcciones de eventuales ejecuciones erróneas, por lo que se trató de construir un programa modular, con suficientes comentarios e indicación del uso de la mayoría de variables.

La primera ampliación para cálculos de este programa, podría estar en el máximo número de polos y/o ceros que se puede procesar; la posible limitación se encontraría en el "cálculo de raíces de un polinomio entero", aunque podría - substituirse esta rutina sin mayores consecuencias.

Luego podría pensarse en implementar la generación de puntos del LGR desde puntos de más de cuatro raíces múltiples, o tres puntos de separación múltiples.

También se podría introducir los respectivos cambios - para que cuando el LGR pase por un punto de separación complejo, regrese a calcular la o las bifurcaciones no consideradas.

Síntesis de las reglas de construcción del LGR.

(1) Puntos de origen ($K = 0$)	Los puntos de origen ($K = 0$) del lugar de las raíces son los polos de $G(s)H(s)$. (Los polos incluyen los que se hallan en el plano s finito y en el infinito).
(2) Puntos terminales ($K = \pm\infty$)	Los puntos terminales ($K = \pm\infty$) del lugar de las raíces son los ceros de $G(s)H(s)$. (Los ceros incluyen los que se hallan en el plano s finito y en el infinito).
(3) Número de ramas separadas	Número de ramas $N = Z$ si $Z > P$ Número de ramas $N = P$ si $Z < P$ donde $P =$ número de polos finitos de $G(s)H(s)$ $Z =$ número de ceros finitos de $G(s)H(s)$
(4) Simetría del lugar de las raíces	Los lugares de las raíces de los sistemas con funciones de transferencia racionales con coeficientes constantes son simétricos con respecto al eje real del plano s .
(5) Asíntotas del lugar de las raíces para $s \rightarrow \infty$	Para grandes valores de s , las ramas del lugar de las raíces (K positiva) son asíntóticas a rectas con ángulos dados por $\theta_k = \frac{(2k+1)\pi}{P-Z}$ y para el lugar inverso de las raíces (K negativa) $\theta_k = \frac{2k\pi}{P-Z}$ donde $k = 0, 1, 2, \dots$, hasta $k = P - Z$ (exclusive).
(6) Intersección de las asíntotas (centroide)	(a) La intersección de las asíntotas tiene lugar sobre el eje real del plano s . (b) El punto de intersección de las asíntotas sobre el eje real viene dado por (para todos los valores de K) $\sigma_1 = -\frac{\sum \text{polos de } G(s)H(s) - \sum \text{ceros de } G(s)H(s)}{P - Z}$

(7) Lugar de las raíces sobre el eje real	Un punto del eje real del plano s pertenece al lugar de las raíces (K positiva) si el número total de polos y ceros de $G(s)H(s)$ que hay a la derecha del punto considerado es <i>impar</i> . Si el número total de polos y ceros a la derecha del punto es par, pertenece al lugar inverso de las raíces.
(8) Angulos de salida y de llegada	El ángulo de salida del lugar de las raíces (K positiva) de un polo (o el ángulo de llegada a un cero) de $G(s)H(s)$ puede determinarse suponiendo un punto s_1 muy próximo al polo (o cero), que pertenece a la rama asociada al polo (o cero) y aplicando la siguiente ecuación $\angle G(s_1)H(s_1) = \sum_{i=1}^m \angle s_1 + z_i - \sum_{j=1}^{m+n} \angle s_1 + p_j = (2k + 1)\pi$
(9) Intersección del lugar de las raíces con el eje imaginario	Los valores de ω y K en los puntos de corte con el eje imaginario del plano s pueden obtenerse utilizando el criterio de Routh-Hurwitz; para casos más complicados puede utilizarse el lugar de Bode de $G(s)H(s)$.
(10) Puntos de separación (puntos en silla de montar)	Los puntos de separación del lugar de las raíces (para todos los valores de K) se determinan buscando las raíces de $dK/ds = 0$, o $dG(s)H(s)/ds = 0$ (condición necesaria solamente). Otra posibilidad para determinar los puntos de separación del lugar de las raíces (para todos los valores de K) es mediante la tabla del punto de separación utilizando los coeficientes de la ecuación característica $F(s) = 0$ y $F'(s)$ (necesaria y suficiente).
(11) Cálculo del valor de K en el lugar de las raíces	El valor absoluto de K en cualquier punto s_1 del lugar de las raíces o del lugar inverso se determina mediante la siguiente ecuación: $ K = \frac{1}{ G(s_1)H(s_1) } = \frac{\text{producto de las longitudes de todos los vectores trazados desde los polos de } G(s)H(s) \text{ a } s_1}{\text{producto de las longitudes de todos los vectores trazados desde los ceros de } G(s)H(s) \text{ a } s_1}$

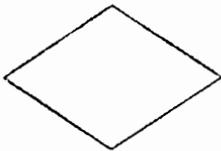
Simbología para los diagramas de flujo



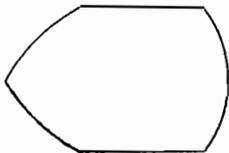
Inicio o final de un proceso



Entrada y/o salida de datos



Toma de decisión (bifurcación)



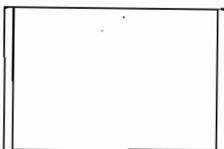
Pantalla del equipo



Conector de flujo



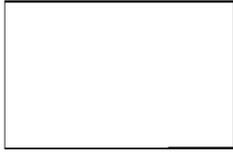
Conector a, o desde otra página



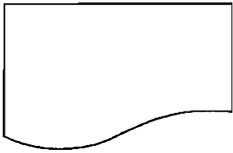
Proceso completo (subrutinas)



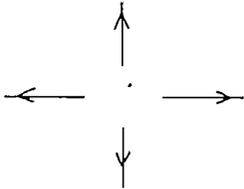
Lazo de repetición



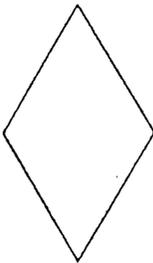
Operaciones



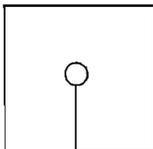
Listado en impresora



Direcciones de flujo



Clasificación



Lectura o grabación en diskette

```

1 REM ***** LGRPF *****
2 REM
3 REM ===== CALCULO Y DIBUJO DEL LUGAR GEOMETRICO DE LAS RAICES =====
4 GO TO 100
5 REM          RAMIRO PAZMINO ASTUDILLO                                08/07/80
6 REM
7 REM          TRABAJO DE TESIS                                        NOV./81
8 T1=1
9 GO TO 440
12 T1=2
13 GO TO 440
16 T1=1
17 GO TO 45
20 T1=2
21 GO TO 45
24 T1=3
25 GO TO 45
28 T1=4
29 GO TO 45
32 GOSUB 2800
33 GOSUB 3181
34 GOSUB 910
35 GO TO 540
36 GO TO 740
40 T1=5
41 GO TO 45
44 T1=6
45 IF S0=4 THEN 10000
80 GO TO 3200
100 INIT
260 DIM Z$(18),Y$(30),R$(30),X$(20),T$(17),L$(7)
270 CALL "TIME",Z$
280 DELETE 10001,30000
290 Y$="LUGAR GEOMETRICO DE LAS RAICES"
300 PRINT USING 310:Y$
310 IMAGE "LJJ",12X,30A,"_",12X,30("=")
320 PRINT "C RPA/,",Z$
330 PRINT "JJJJ          POSIBILIDADES:"
340 PRINT "J           TECLA 1 ==> REINICIAR EL PROGRAMA (RUN)"
350 PRINT "J           TECLA 2 ==> DATOS COMO COEFICIENTES"
360 PRINT "J           TECLA 3 ==> DATOS COMO FACTORES (RAICES)"
370 PRINT "J           TECLA 9 ==> LISTADO DE VARIABLES EN USO"
380 PRINT "J           TECLA 20 ==> ENTRADA DE VALORES POR DISKETTE"
390 PRINT "JJ                    Escoge TECLA          "
400 PRINT "GG                    -----"
410 S0=0
420 END
430 REM .....

```

```

440 REM                               Entrada general de datos           (LGREGD)
450 T2=2
460 GOSUB 800
470 GOSUB 10000
480 REM .....
490 REM                               Calculo y evaluacion de raices (LGRCE)
500 T2=3
510 GOSUB 800
520 GOSUB 10000
530 REM   Generacion del LGR
540 GOSUB 1300
550 PRINT "JG"                          FIN DEL LGR   G"
555 CLOSE
560 S0=4
570 REM .....
580 REM                               Graficacion, impresion y extras (LGRGIE)
590 T2=4
600 GOSUB 800
610 REM   Posibilidades de la segunda parte
620 PRINT USING 310;Y$
630 PRINT "J"
635 PRINT "J"
640 PRINT "J"
650 PRINT "J"
660 PRINT "J"
670 PRINT "J"
680 PRINT "J"
690 PRINT "J"
695 PRINT "J"
700 PRINT "JJ"
710 PRINT "GG"
720 END
730 REM XXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXX
740 REM                               Listado de variables en uso           (LGRLV)
750 T2=1
760 GOSUB 800
770 GOSUB 10000
780 END
790 REM =====
800 REM                               SUPERPOSICION DE PROGRAMAS           S/
810 DATA "LGRLV", "LGREGD", "LGRCE", "LGRGIE"
820 RESTORE 810
830 DELETE 10001,30000
840 TO=MEMORY
850 FOR I=1 TO T2
860 READ R$
870 NEXT I
880 APPEND R$;10000
890 RETURN
900 REM =====

```

```

910 REM ..... Grabacion de datos de entrada
912 REM ..... X$ --> Archivo SAM de pares de puntos
914 REM ..... T$ --> Archivo IAM de datos del LGR
920 L$="RL/"
930 DIM S$(300)
940 PRINT "GGGJUNIDAD donde esta el diskette : ";
950 INPUT T3
960 IF T3>1 OR T3<0 THEN 940
970 CALL "UNIT",T3
980 PRINT "JNOMBRE del archivo de resultados : ";
990 INPUT X$
1000 T$=L$&X$
1010 CALL "FILE",T3,X$,S$
1020 IF S0=4 THEN 1280
1030 IF S$="" THEN 1090
1040 PRINT "JG LGR31 Archivo ";X$;" existe, se destruye (SI O NO?): "
1050 INPUT R$
1060 IF R$<>"SI" THEN 980
1070 KILL X$
1080 KILL T$
1090 CREATE X$;10000,0
1100 CREATE T$;10,700
1110 OPEN X$;1,"F",S$
1120 OPEN T$;2,"F",S$
1130 WRITE #2,1;Y$
1140 WRITE #2,2;X0,X1,Y1,E1,E2,EB,E9,C9,A6
1150 WRITE #2,3;N1,D1,N,KO,S2
1160 IF N1<>0 THEN 1180
1170 CO=1
1180 WRITE #2,4;CO
1190 WRITE #2,5;C1
1200 WRITE #2,6;F
1210 WRITE #2,7;S
1230 WRITE #1;X9
1240 DELETE X9,X
1245 DIM X(9)
1250 X=0
1260 N3=0
1270 GOSUB 2520
1280 RETURN
1290 REM.....
1300 REM ..... Calculo del LGR desde los pto. de separacion
1310 S0=3
1315 PRINT "J ..... Estos grabando los puntos del LGR"
1320 S1=0
1330 SET DEGREES
1340 B4=0
1350 FOR I=1 TO N
1360 IF S(4,I)=0 OR S(4,I)=2 OR ABS(S(2,I))>E1 THEN 2480

```

```

1370 IF S(3,I)<3 THEN 1390
1380 B4=1
1390 A0=180/(S(3,I)+1)
1400 X2=S(1,I)
1410 Y2=0
1420 ..... 121
1430 GOSUB 1770
1440 X2=X2+E2*COS(A0)
1450 Y2=Y2+E2*SIN(A0)
1460 E=1000
1470 A1=7
1490 GOSUB 1770
1500 REM Busqueda de 5 puntos en abanico con angulo de A1 grados c/u
1510 FOR I2=1 TO 5
1520 A4=A0+(3-I2)*A1
1530 X4=X2+E2*COS(A4)
1540 Y4=Y2+E2*SIN(A4)
1550 GOSUB 1810
1560 IF E<=E3 THEN 1610
1570 X3=X4
1580 Y3=Y4
1590 A3=A4
1600 E=E3
1610 NEXT I2
1620 REM Evaluacion y correccion del Epsilon de distancia
1630 IF E>1 THEN 1680
1640 IF E=>0.5 THEN 1710
1650 IF E2=>10*E9 THEN 1710
1660 E2=1.2*E2
1670 GO TO 1710
1680 IF E2<=2*E9 THEN 1710
1690 E2=0.8*E2
1700 GO TO 1510
1710 X2=X3
1720 Y2=Y3
1730 A0=A3
1750 GO TO 1460
1760 REM ----- Grabacion de puntos del LGR (S/R) -----
1770 N2=N2+1
1780 WRITE #1:X2,Y2
1790 RETURN
1800 REM.....
1810 REM Evaluacion como punto del LGR S/
1820 IF X4=>X1 OR X4<=X0 OR Y4=>Y1 THEN 2030
1830 IF S1=1 THEN 2120
1840 IF Y4=>E2/2 THEN 2100
1850 I1=1
1860 IF I+I1>N THEN 2080
1870 IF ABS(ABS(S(1,I+I1))-ABS(X4))=>E2 OR S(4,I+I1)=0 THEN 1890
1880 GO TO 1920
1890 I1=I1+1

```

```

1900 GO TO 1860
1920 X2=S(1,I+I1)
1930 Y2=0
1940 GOSUB 1770
1950 S(4,I+I1)=2
1960 IF S(3,I+I1) < 0.5 THEN 1990
1970 A0=120
1980 GO TO 1410
1990 IF S(3,I) < 3 THEN 2030
2000 X2=S(1,I)
2010 A0=135
2020 GO TO 1410
2030 IF B4 < 1 THEN 2470
2040 B4=0
2050 X2=S(1,I)
2060 GOSUB 2520
2070 GO TO 1990
2080 PRINT "JG LGR24. Error en epsilon; no hay pto. de sep. cercano"
2090 END
2100 REM ..... Destino en raices complejas
2110 IF S2=0 THEN 2240
2120 IF Y4 <= -(2*E9) THEN 2470
2130 FOR I1=1 TO N1+D1
2140 IF ABS(F(2,I1)) <= E1 OR F(5,I1)=2 THEN 2230
2150 IF ABS(F(2,I1)-Y4) > E2 THEN 2230
2160 IF ABS(ABS(F(1,I1))-ABS(X4)) > E2 THEN 2230
2170 F(5,I1)=3
2190 X2=F(1,I1)
2200 Y2=F(2,I1)
2210 GOSUB 1770
2220 GO TO 2470
2230 NEXT I1
2240 REM ..... Sumatorio de angulos y calculo de K
2250 A2=0
2260 K1=K0
2270 FOR I1=1 TO N1+D1
2280 IF F(5,I1)=2 OR (F(5,I1)=0 AND ABS(F(2,I1)) <= E1) THEN 2420
2290 T0=F(4,I1)*-1^F(3,I1)
2300 T1=X4-F(1,I1)
2310 T2=Y4-F(2,I1)
2320 IF ABS(F(2,I1)) <= E1 THEN 2340
2330 T0=T0/F(4,I1)
2340 IF T1 < 0 THEN 2370
2350 A5=90
2360 GO TO 2400
2370 A5=ATN(T2/T1)
2380 IF T1 >= 0 THEN 2400
2390 A5=A5+180
2400 A2=A2+T0*A5
2410 K1=K1*(T1*T1+T2*T2)^(-T0/2)
2420 NEXT I1
2430 A2=A2-INT(ABS(A2)/360)*360*A2/ABS(A2)
2440 E3=ABS(ABS(A2)-180)
2450 RETURN
2460 REM.....

```

```

2470 GOSUB 2520
2480 IF S1=1 THEN 2750
2490 NEXT I
2500 GO TO 2580
2510 REM ..... 123
2520 REM Grabacion de numero de puntos por curva SA
2530 N3=N3+1
2540 X(N3)=N2
2550 N2=0
2560 RETURN
2570 REM .....
2580 IF S2=0 THEN 2760
2590 REM ..... LGR desde raices complejas
2600 S1=1
2610 B4=0
2620 FOR I=1 TO N1+D1
2630 IF NOT(F(2,I)>E1 AND F(5,I)<>3) THEN 2750
2640 F(5,I)=2
2650 X4=F(1,I)
2660 Y4=F(2,I)
2670 GOSUB 2240
2680 A0=E3*-1^F(3,I)*ABS(A2)/A2
2690 IF ABS(A2)<=180 THEN 2710
2700 A0=-A0
2710 F(5,I)=1
2720 X2=F(1,I)
2730 Y2=F(2,I)
2740 GO TO 1430
2750 NEXT I
2760 WRITE #2,8:N3,X
2770 CLOSE
2775 E2=5*E9
2780 RETURN
2790 REM =====
2800 REM Cambio de limites en plano de datos SA
2810 IF S0>3 THEN 2840
2820 PRINT "JG LGR61 No existen datos todavia; PRIMERO INGRESELOS"
2830 GO TO 330
2840 PRINT USING 310:Y#
2850 PRINT "J CAMBIO DE LIMITES EN PLANO DE DATOS"
2860 PRINT "JPuede cambiar un solo eje; eje imasinario es simetrico"
2870 PRINT "JLOS LIMITES ACTUALES SON : "
2880 PRINT "J", "X min.", "X max.", "Y max.", " ", X0, X1, Y1
2890 PRINT "JPara eje real ==> X Para eje imasinario ==> Y"
2900 PRINT "J Que eje desea cambiar ";
2910 INPUT R#
2920 IF R#<>"X" THEN 2970
2930 PRINT "JDisitar los limites en eje real (Xmin,Xmax) = ";
2940 INPUT X0,X1
2942 IF X1>X0 THEN 2950
2944 PRINT "JGG LGR63 Los lih'mites ingresados son incompatibles"
2946 GO TO 2930
2950 Y1=ABS(47/144*(X1-X0))
2960 GO TO 3050
2970 IF R#<>"Y" THEN 3030
2980 PRINT "JDisitar maximo para eje imasinario (Ymax) = ";

```

```

2990 INPUT Y1
3000 X1=ABS(Y1)
3010 X0=-87/53*ABS(Y1)
3020 GO TO 3050
3030 PRINT "JG LGR62 Respuesta = ";R$;" equivocada"
3040 GO TO 2900
3050 WINDOW X0,X1,-Y1,Y1
3060 PAGE
3070 E9=ABS(X1-X0)/700
3080 I=0
3090 T2=ABS(X1-X0)/20
3100 IF T2=>1 THEN 3140
3110 I=I+1
3120 T2=10*T2
3130 GO TO 3100
3140 E8=INT(T2)
3150 IF I=0 THEN 3170
3160 E8=E8/10^I
3170 E2=5*E9
3175 S0=2
3177 RETURN
3180 REM Lectura de puntos en eje real
3181 N2=X(1)
3182 DELETE X9
3183 DIM X9(X(1))
3184 GOSUB 13780
3185 READ #1:X9
3186 CLOSE 1
3187 DELETE 10001,30000
3188 TO=MEMORY
3189 RETURN
3190 REM =====
3200 REM Carga de diskette de calculos anteriores
3210 PRINT "J * ENTRADA DE DATOS DESDE DISKETTE *"
3220 S0=4
3230 GOSUB 910
3240 IF S$<>" " THEN 3280
3250 PRINT "JG LGR32 Archivo ";X$;" no existe"
3260 GOSUB 980
3270 GO TO 3240
3280 OPEN T$;2,"R",S$
3290 READ #2,1:R$
3300 IF R$=Y$ THEN 3340
3310 PRINT "JG LGR33 Archivo ";X$;" no es de LGR"
3320 CLOSE
3330 END
3340 DELETE X,C0,C1,F,S
3350 DIM X(9)
3360 READ #2,2:X0,X1,Y1,E1,E2,E8,E9,C9,A6
3370 READ #2,3:N1,D1,N,K0,S2
3380 DIM C0(N1+1),C1(D1+1),F(5,N1+D1),S(4,N)
3390 IF N1=0 THEN 3410
3400 READ #2,4:C0
3410 READ #2,5:C1

```

```

3420 READ #2,6:F
3430 READ #2,7:S
3440 READ #2,8:N3,X
3450 GO TO 560
3460 REM =====
3470 REM//////// Obtencion de las raices de un polinomio entero.////// S/R
3480 REM      TEKTRONIX PLOT 50      Mathematics Volumen 2
3490 DELETE P1,P2,Q1,Q2,P
3500 DIM F1(N),P2(N),Q1(N+1),Q2(N+1),P(14)
3510 E=E1/20
3520 FOR P0=1 TO N+1
3530 P7=N+1-P0+1
3540 Q1(P0)=T(P7)
3550 NEXT P0
3560 PRINT *          Estoy buscando las raices"
3570 GOSUB 3670
3580 RETURN
3590 REM "Polynomial roots" (Parametros)
3600 REM      Q1 -- Vector de N+1 coeficientes en orden ascendente
3610 REM      N  -- Grado del polinomio
3620 REM      P1 -- Raices (parte real)
3630 REM      P2 -- Raices (parte imaginaria)
3640 REM      E  -- Exactitud deseada
3670 F(9)=0
3680 P7=N
3690 F(7)=P7
3700 P(8)=P7+1
3710 P(6)=1
3720 Q7=P7+2
3730 FOR Q0=1 TO P7+1
3740 Q2(Q7-Q0)=Q1(Q0)
3750 NEXT Q0
3760 F(11)=0.00500101
3770 F(12)=0.010000101
3780 P(4)=0
3790 P8=P(11)
3800 P(11)=-10*P(12)
3810 P(12)=-10*P8
3820 P8=P(11)
3830 P9=P(12)
3840 P(4)=P(4)+1
3850 GO TO 3890
3860 P(9)=1
3870 P(13)=P8
3880 P(14)=P9
3890 P(5)=0
3900 P3=0
3910 P4=0
3920 P6=0
3930 Q3=1
3940 Q4=0

```

```
3950 F5=Q2(P7+1)
3960 IF P5=0 THEN 4430
3970 FOR P0=1 TO P7
3980 Q0=P7+1-P0
3990 Q8=Q2(Q0)
4000 Q5=F8*Q3-F9*Q4
4010 Q6=F8*Q4+F9*Q3
4020 F5=F5+Q8*Q5
4030 F6=F6+Q8*Q6
4040 F3=F3+F0*Q3*Q8
4050 F4=F4-F0*Q4*Q8
4060 Q3=Q5
4070 Q4=Q6
4080 NEXT P0
4090 F(10)=F3*F3+F4*F4
4100 IF F(10)=0 THEN 4340
4110 F(2)=(F6*F4-F5*F3)/F(10)
4120 F8=F8+F(2)
4130 F(3)=- (F5*F4+F6*F3)/F(10)
4140 F9=F9+F(3)
4150 IF ABS(F(2))+ABS(F(3))<E THEN 4220
4160 F(5)=F(5)+1
4170 IF F(5)<500 THEN 3900
4180 IF P(9)<>0 THEN 4220
4190 IF P(4)<5 THEN 3790
4200 PRINT 'JG LGR17 No hay raices para 500 iteraciones y 5 valores'
4210 END
4220 P0=N+2
4230 FOR Q0=1 TO P(8)
4240 Q7=P0-Q0
4250 Q8=Q1(Q7)
4260 Q1(Q7)=Q2(Q0)
4270 Q2(Q0)=Q8
4280 NEXT Q0
4290 Q7=P7
4300 F7=F(7)
4310 P(7)=Q7
4320 IF P(9)=0 THEN 3860
4330 GO TO 4370
4340 IF P(9)=0 THEN 3790
4350 F8=F(13)
4360 F9=F(14)
4370 P(9)=0
4380 IF ABS(F9)<10*E*ABS(P8) THEN 4460
4390 F(1)=F8+F8
4400 P(10)=F8*F8+F9*F9
4410 P7=P7-2
4420 GO TO 4500
```

```
4430 F8=0
4440 F(7)=F(7)-1
4450 F(8)=F(8)-1
4460 F9=0
4470 F(10)=0
4480 F(1)=F8
4490 F7=F7-1
4500 Q2(2)=Q2(2)+F(1)*Q2(1)
4510 Q7=F(1)
4520 Q8=F(10)
4530 FOR Q0=2 TO F7
4540 Q2(Q0+1)=Q2(Q0+1)+Q7*Q2(Q0)-Q8*Q2(Q0-1)
4550 NEXT Q0
4560 F1(P(6))=F8
4570 F2(P(6))=F9
4580 P(6)=P(6)+1
4590 IF P(10)=0 THEN 4630
4600 F9=-F9
4610 P(10)=0
4620 GO TO 4560
4630 IF F7>0 THEN 3760
4640 RETURN
4650 REM *****
10000 REM ***** LGRFP *****
```

```

10000 REM ***** LGREGD *****
10010 REM Ramiro Pazmino Astudillo 27/06/81
10020 REM
10030 REM Programa de entrada/verificacion de datos y
10040 REM Calculo de raices de un polinomio.
10050 REM
10060 GOSUB T1 OF 10070,10720
10065 RETURN
10070 REM ===== Datos como coeficientes =====
10080 B4=0
10090 PRINT USING 310;Y#
10100 PRINT 'J *** ENTRADA COMO COEFICIENTES ***'
10110 GOSUB 11270
10150 IF N1<>0 THEN 10190
10160 PRINT "JGANANCIA DEL NUMERADOR = ";
10170 INPUT K1
10180 GO TO 10270
10190 PRINT "JDIGITAR LOS COEFICIENTES DEL NUMERADOR"
10200 S0=0
10210 DIM T(N1+1),CO(N1+1)
10220 T0=1
10230 T1=N1
10240 T2=N1
10250 GOSUB 10400
10260 CO=T
10270 PRINT "JDIGITAR LOS COEFICIENTES DEL DENOMINADOR"
10280 S0=1
10290 T0=N1+1
10300 T1=I1
10310 T2=N1+I1
10320 K0=K1
10330 DELETE T
10340 DIM T(I1+1),C1(I1+1)
10350 GOSUB 10400
10360 C1=T
10370 DELETE T
10380 RETURN
10390 REM.....

```

```

10400 REM      Entrada de coeficientes (numerador o denominador)
10410 FOR I=1 TO T1+1
10420 PRINT " S**";T1+1-I;" = ";
10430 INPUT T(I)
10440 IF I>1 THEN 10520
10450 IF T(1)<>0 THEN 10480
10460 PRINT "JGG LGR14 PRIMER coeficiente es cero * REPITA"
10470 GO TO 10410
10480 K1=T(1)
10490 IF S0=0 THEN 10520
10500 K0=K0/K1
10510 IF K0<0 OR K0>10000 THEN 10690
10520 T(I)=T(I)/K1
10530 NEXT I
10540 T(1)=1
10550 N=T1
10560 IF N>1 THEN 10610
10570 F(1,T0)=-T(2)
10580 F(2,T0)=0
10590 F(3,T0)=S0
10600 GO TO 10680
10610 GOSUB 3470
10620 FOR I=T0 TO T2
10630 F(1,I)=F1(I-T0+1)
10640 F(2,I)=F2(I-T0+1)
10650 F(3,I)=S0
10660 NEXT I
10670 DELETE F1,F2,Q1
10680 RETURN
10690 PRINT "JG LGR15A GANANCIA K0 = ";K0;" FUERA DE LIMITES "
10700 END
10720 REM ===== Datos como factores (raices) =====
10730 B4=1
10740 PRINT USING 310:Y#
10750 PRINT "J          *** ENTRADA COMO RAICES ***"
10760 GOSUB 11260
10770 PRINT "JGANANCIA TOTAL K0 = ";
10780 INPUT K0
10790 IF K0<10001 AND K0>0 THEN 10850
10800 PRINT "JG LGR15B GANANCIA K0 = ";K0;" FUERA DE LIMITES "
10810 GO TO 10770
10850 IF N1=0 THEN 10920
10860 S0=0
10870 X#="NUMERADOR"
10880 T#="CERO"
10890 T1=N1
10900 T0=1
10910 GOSUB 11000
10920 S0=1
10930 X#="DENOMINADOR"
10940 T#="POLO"
10950 T1=N1+D1
10960 T0=N1+1
10970 GOSUB 11000
10980 RETURN
10990 REM.....

```

130 S

```

11000 REM      Entrada de raices (numerador o denominador)
11010 REM
11020 PRINT "JDIGITAR LAS RAICES DEL ";X$;" (";T$;"S)"
11030 FOR I=TO TO T1
11040 PRINT " ";T$;" (";I-TO+1;") : PARTE REAL      = ";
11050 INPUT F(1,I)
11060 PRINT "          PARTE IMAGINARIA = ";
11070 INPUT F(2,I)
11080 F(3,I)=SO
11090 IF F(2,I)=0 THEN 11240
11100 IF I=T1 THEN 11180
11110 I=I+1
11120 F(1,I)=F(1,I-1)
11130 F(2,I)=-F(2,I-1)
11140 F(3,I)=SO
11150 PRINT " ";T$;" (";I-TO+1;") : PARTE REAL      = ";F(1,I)
11160 PRINT "          PARTE IMAGINARIA = ";F(2,I)
11170 GO TO 11240
11180 PRINT "JG LGR16 Por el grado del ";X$;" no hay mas conjugadas"
11190 PRINT "J SE EQUIVOCO SOLO EN EL ULTIMO ";T$;"? (SI O NO) = ";
11200 INPUT R$
11210 IF R$="SI" OR R$="S" THEN 11230
11220 GO TO 11020
11230 I=I-1
11240 NEXT I
11250 RETURN
11260 REM.....
11270 REM      Lectura y validacion de grados
11280 E1=0.05
11290 PRINT "J      Epsilon  Rango-de-trabajo  Tipo"
11300 PRINT "      # 1      0 a 1      bajo"
11310 PRINT "      # 2      1 a 100      normal"
11320 PRINT "      # 3      100 en adelante  alto"
11330 PRINT "JNumero de Epsilon para sus calculos? = ";
11340 INPUT T1
11350 GO TO T1 OF 11370,11400,11390
11360 GO TO 11290
11370 E1=E1/10
11380 GO TO 11400
11390 E1=E1*10
11400 PRINT "JGRADO DEL NUMERADOR = ";
11410 INPUT N1
11420 IF N1<=7 AND N1>=0 THEN 11450
11430 PRINT "JG LGR11 GRADO-NUMERADOR excede a maximo de "7""
11440 GO TO 11400
11450 PRINT "JGRADO DEL DENOMINADOR = ";
11460 INPUT D1
11470 IF D1<=7 AND D1>=0 THEN 11500
11480 PRINT "JG LGR12 GRADO-DENOMINADOR excede a maximo de "7""
11490 GO TO 11450
11500 IF N1<=D1 THEN 11522
11510 PRINT "JG LGR13 GRADO-NUMERADOR excede a GRADO-DENOMINADOR "
11520 GO TO 11400
11522 N1=INT(N1)
11524 D1=INT(D1)
11530 DELETE F,C0,C1,C2,C3,C4,T,S
11532 DIM F(5,N1+D1)
11534 F=1
11536 RETURN

```

```

10000 REM ***** LGR CER *****
10010 REM          Calculo y evaluacion de raices y
10020 REM          puntos de separacion
10030 T4=130
10040 DELETE X
10050 DIM X(14)
10060 X=0
10070 N2=0
10080 IF N1+D1>1 THEN 10180
10090 X0=-(3/2)*(ABS(F(1,1))+5)
10100 X1=-X0
10110 GOSUB 2950
10120 AXIS E8,E8
10130 MOVE @32:F(1,1),E9
10140 DRAW @32:X0,E9
10150 PRINT @32:"C",Y#
10160 PRINT "CJJ LGR de una raiz en ";F(1,1);" + OJ GGG."
10165 PRINT @32:"J      (1 div.=";E8;" un.)"
10170 END
10180 REM ===== Clasificacion y banderas de raices =====
10190 S2=0
10200 S1=0
10210 FOR I=1 TO N1+D1-1
10220 IF ABS(F(2,I))<=E1 THEN 10240
10230 S2=1
10240 IF F(1,I)=F(1,I+1) THEN 10270
10250 S1=1
10260 GOSUB 10850
10270 NEXT I
10280 IF S1=1 THEN 10200
10290 IF S2=0 THEN 10580
10300 REM----- Clasificacion por eje imaginario
10310 Y2=0
10320 T1=0
10330 T0=1
10340 FOR I2=1 TO N1+D1-1
10350 IF ABS(F(2,I2))<=Y2 THEN 10370
10360 Y2=ABS(F(2,I2))
10370 IF F(1,I2)-F(1,I2+1)>E1 THEN 10440
10380 IF S1=1 THEN 10420
10390 S1=1
10400 T0=I2
10410 GO TO 10570
10420 T1=I2+1
10430 GO TO 10570
10440 IF S1=1 AND T1-T0>1 THEN 10460
10450 GO TO 10570
10460 REM
10470 S1=0
10480 FOR I=T0 TO T1-1
10490 IF ABS(F(2,I))<=ABS(F(2,I+1)) THEN 10520

```

```

10500 S1=1
10510 GOSUB 10850
10520 NEXT I
10530 IF S1=1 THEN 10470
10540 REM
10550 T1=0
10560 T0=1
10570 NEXT I2
10580 REM ----- Evaluacion de raices repetidas y/o canceladas
10590 FOR I=1 TO N1+D1-1
10600 T1=F(1,I)-F(1,I+1)
10610 IF T1>E1 THEN 10820
10620 T1=ABS(F(2,I))-ABS(F(2,I+1))
10630 IF ABS(T1)>E1 THEN 10820
10640 F(5,I)=0
10650 T1=F(3,I)+F(3,I+1)
10660 IF T1=1 THEN 10690
10670 F(4,I+1)=F(4,I+1)+F(4,I)
10680 GO TO 10820
10690 IF F(4,I)=1 THEN 10790
10700 IF S1=1 THEN 10730
10710 S1=1
10720 T0=F(4,I)-1
10730 F(4,I)=F(4,I)-1
10740 F(5,I)=1
10750 F(5,I+1)=2
10760 F(5,I-T0)=2
10770 GOSUB 10850
10780 GO TO 10830
10790 F(5,I)=2
10800 F(5,I+1)=2
10810 I=I+1
10820 S1=0
10830 NEXT I
10840 GO TO 10940
10850 REM .....
10860 REM Intercambio de columnas S/R
10870 FOR I1=1 TO 5
10880 T2=F(I1,I)
10890 F(I1,I)=F(I1,I+1)
10900 F(I1,I+1)=T2
10910 NEXT I1
10920 RETURN
10930 REM .....

```

```

10940 REM ===== Plano de datos y evaluacion en eje real =====
10950 X0=3/2*F(1,N1+D1)
10960 X1=3/2*F(1,1)
10970 IF F(1,1)>0 THEN 10990
10980 X1=ABS(X0/5)
10990 IF F(1,N1+D1)<0 THEN 11010
11000 X0=-X1/5
11010 Y1=47/144*(X1-X0)
11020 IF S2=0 THEN 11110
11030 Y2=3/2*Y1
11040 IF Y2<=Y1 THEN 11110
11050 T1=(144/47*Y2-ABS(X1-X0))/2
11060 X0=X0-T1
11070 X1=X1+T1
11080 Y1=Y2
11110 GOSUB 3050
11120 REM----- Busqueda de raices canceladas
11130 S3=0
11140 FOR I=1 TO N1+D1
11150 IF F(5,I)=2 THEN 11240
11230 S3=1
11240 NEXT I
11260 IF S3<>0 THEN 11380
11270 PRINT "JG LGR21 TODAS las raices se han cancelado - FIN"
11280 END
11370 REM.....
11380 REM      Producto de las raices en numerador y denominador
11390 IF B4=0 THEN 11800
11400 DELETE C0,C1,T
11410 IF N1=0 THEN 11460
11420 DIM C0(N1+1),T(N1+1)
11430 T0=0
11440 GOSUB 11540
11450 C0=T
11460 DELETE T
11470 DIM C1(D1+1),T(D1+1)
11480 T0=1
11490 GOSUB 11540
11500 C1=T
11510 DELETE T
11520 GO TO 11800
11530 REM .....

```

11540 REM Obtencion de un Polinomio desde sus factores

S/R

134

```
11550 T=0
11560 T1=0
11570 T(1)=1
11580 IF T1<>1 THEN 11640
11590 FOR I=1 TO N1+D1
11600 IF F(3,I)<>TO THEN 11620
11610 T(2)=F(1,I)
11620 NEXT I
11630 GO TO 11780
11640 FOR I=1 TO N1+D1
11650 IF F(3,I)<>TO OR F(2,I)>E1 THEN 11770
11660 IF ABS(F(2,I))>E1 THEN 11720
11670 T1=T1+1
11680 FOR I1=T1+1 TO 2 STEP -1
11690 T(I1)=T(I1)-T(I1-1)*F(1,I)
11700 NEXT I1
11710 GO TO 11770
11720 T1=T1+2
11730 FOR I1=T1+1 TO 3 STEP -1
11740 T(I1)=T(I1)-2*T(I1-1)*F(1,I)+T(I1-2)*(F(1,I)^2+F(2,I)^2)
11750 NEXT I1
11760 T(2)=T(2)-2*T(1)*F(1,I)
11770 NEXT I
11780 RETURN
11790 REM .....
11800 PRINT " Ecuacion para los puntos de separacion dK(s)/ds=0 : J"
11810 DELETE C2,C3,C4
11820 IF N1=0 THEN 11870
11830 DIM C3(N1)
11840 FOR I=1 TO N1
11850 C3(I)=(N1-I+1)*C0(I)
11860 NEXT I
11870 DIM C4(D1)
11880 FOR I=1 TO D1
11890 C4(I)=(D1-I+1)*C1(I)
11900 NEXT I
11910 IF N1>0 THEN 11950
11920 DIM C2(D1),T(D1)
11930 C2=-C4
11940 GO TO 12070
11950 DIM C2(N1+D1),T(N1+D1)
11960 C2=0
11970 FOR I=1 TO D1
11980 FOR I2=1 TO N1+1
11990 C2(I+I2-1)=C2(I+I2-1)+C4(I)*C0(I2)
12000 NEXT I2
12010 NEXT I
12020 FOR I=1 TO N1
12030 FOR I2=1 TO D1+1
```

135

```

12040 C2(I+I2-1)=C2(I+I2-1)-C3(I)*C1(I2)
12050 NEXT I2
12060 NEXT I
12070 DELETE C3,C4,S
12080 N=N1+D1-1
12090 T=C2
12100 IF ABS(C2(1))>E1 THEN 12200
12110 I1=0
12120 FOR I=1 TO N1+D1
12130 IF I1>0 OR ABS(C2(I))>E1 THEN 12160
12140 N=N-1
12142 IF N>0 THEN 12180
12143 N=1
12144 DIM S(4,1)
12145 S(2,1)=1000
12147 DELETE T
12150 GO TO 12500
12160 I1=I1+1
12170 T(I1)=C2(I)
12180 NEXT I
12200 DIM S(4,N)
12210 S=1
12220 IF N>1 THEN 12260
12230 S(1,1)=-T(2)/T(1)
12240 S(2,1)=0
12250 GO TO 12500
12260 GOSUB 3470
12270 DELETE T
12280 FOR I=1 TO N
12290 S(1,I)=P1(I)
12300 S(2,I)=P2(I)
12310 NEXT I
12320 DELETE P1,P2,Q1
12330 REM ----- Clasificación y evaluación de puntos de separación
12340 S1=0
12350 FOR I=1 TO N-1
12360 IF S(1,I)=S(1,I+1) THEN 12430
12370 S1=1
12380 FOR I1=1 TO 2
12390 T1=S(I1,I+1)
12400 S(I1,I+1)=S(I1,I)
12410 S(I1,I)=T1
12420 NEXT I1
12430 NEXT I
12440 IF S1=1 THEN 12340
12450 FOR I=1 TO N-1
12460 IF S(1,I)-S(1,I+1)>E1 THEN 12490
12470 S(4,I)=0
12480 S(3,I+1)=S(3,I+1)+S(3,I)
12490 NEXT I

```

```

12500 REM ----- Evaluacion de puntos de separacion en eje real
12510 B3=0
12520 I1=0
12530 FOR I=1 TO N1+D1
12540 IF F(5,I)=0 OR ABS(F(2,I))>E1 THEN 12920
12550 I1=I1+1
12560 IF I1>N THEN 12620
12570 IF S(4,I1)=0 OR ABS(S(2,I1))>E1 THEN 12550
12580 IF S(1,I1)>F(1,I)+E1 THEN 12800
12590 GO TO F(4,I) OF 12620,12660,12700,12760
12600 PRINT "JG LGR22 ";F(4,I); " Raices multiples (no se contempla)"
12610 END
12620 GOSUB 13140
12630 B3=NOT(B3)
12640 I1=I1-1
12650 GO TO 12920
12660 REM ----- Raiz doble
12670 IF B3=0 THEN 12690
12680 S(4,I1)=0
12690 GO TO 12920
12700 REM ----- Raiz triple
12710 GOSUB 13130
12720 IF B3=0 THEN 12740
12730 S(3,I1)=0.5
12740 B3=NOT(B3)
12750 GO TO 12920
12760 REM ----- Raiz cuadruple
12770 IF B3=0 THEN 12790
12780 S(3,I1)=1
12790 GO TO 12920
12800 REM ===== Ptos. de separacion, no sobre raices
12810 IF B3=0 THEN 12850
12820 GO TO S(3,I1) OF 12550,12870,12900
12830 PRI "JG LGR23 ";S(3,I1); " Ptos. de sep. multiples (no contempla)"
12840 END
12850 S(4,I1)=0
12860 GO TO 12550
12870 REM ----- Punto doble
12880 S(3,I1)=0.5
12890 GO TO 12550
12900 REM ----- Punto triple

```

```

12910 GO TO 12550
12920 NEXT I
12930 IF B3=0 THEN 12960
12940 GOSUB 13170
12950 GO TO 13000
12960 I1=I1+1
12970 IF I1>N THEN 13000
12980 S(4,I1)=0
12990 GO TO 12960
13000 C9=0
13010 A6=0
13020 IF N1<=N1+1 THEN 13080
13030 FOR I=1 TO N1+D1
13050 IF F(5,I)<>1 THEN 13070
13060 C9=C9-F(4,I)*F(1,I)*-10^F(3,I)
13070 NEXT I
13072 C9=C9/(D1-N1)
13074 A6=180/(D1-N1)
13080 DELETE X9
13081 IF N2<>0 THEN 13094
13083 N2=2
13094 DIM X9(N2)
13096 DIM X(N2)
13098 X9=X
13100 GOSUB 910
13110 RETURN
13120 REM .....
13130 REM Grabacion de puntos en eje real S/R
13140 N2=N2+1
13150 X(N2)=F(1,I)
13160 RETURN
13170 N2=N2+1
13180 X(N2)=- (10^3)
13190 RETURN
13200 REM .....

```

```

10000 REM ***** LGRGIE *****
10010 REM Ramiro Pazmino Astudillo 13/06/81
10020 REM
10030 REM Programa para evaluacion de un punto;
10040 REM Analisis de estabilidad relativa,
10050 REM Dibujo del LGR e
10060 REM Impresion de datos del calculo
10070 REM
10080 IF S0>3 THEN 10110
10090 PRINT "JG LGR34 NO existe o no esta cerrado ARCHIVO de datos"
10100 GO TO 10165
10110 SET DEGREES
10120 GOSUB T1 OF 10170,10400,11690,12650,13380,10140
10140 IF T1=3 THEN 10160
10142 GOSUB 13920
10144 T5=32
10150 GO TO 630
10160 T5=32
10165 END
10167 REM =====
10170 REM Evaluation de un punto
10180 PRINT "TECLA 4K"
10190 GOSUB 10210
10200 GO TO 10350
10210 PRINT "JDesee ingresar por el plotter (SI O NO?) = ";
10220 INPUT R$
10230 IF R$<>"SI" THEN 10280
10240 PRINT "JSi NO tiene el grafico en la unidad, aplaste la TECLA 6 ;"
10250 PRINT " o de no ponga el cursor en posicion y aplaste RETURN"
10255 INPUT R$
10260 GIN @1:X4,Y4
10270 GO TO 10330
10280 PRINT "JIngreso del punto para evaluar : "
10290 PRINT " Parte real = ";
10300 INPUT X4
10310 PRINT " Parte imasinaris = ";
10320 INPUT Y4
10330 GOSUB 2240
10340 RETURN
10350 PRINT "JDiferencia en suma de argumentos = ";E3;" grados"
10360 PRINT "JGanancia K del punto = ";K1
10370 PRINT "J NOTA : Para que un punto sea del LGR; la diferencia"
10380 PRINT " en la suma de argumentos debe tender a cero"
10390 RETURN
10395 REM =====

```

```

10400 REM                               Analisis de estabilidad relativa
10410 PRINT "TECLA 5"
10412 IF N3>1 THEN 10420
10414 PRINT "JGG LGR41 No es valido para LGR solo en eje real"
10416 END
10420 GOSUB 13950
10430 PRINT " Para obtener:J1 Margen de ganancia y margen de fase"
10440 PRINT "          2 Sobrenivel, Tp, Ts, Wn, Wd, Kte de T"
10450 PRINT "          Razon de amortiguamiento:"
10460 PRINT "          3 Dado un punto del LGR"
10470 PRINT "          4 Dado T de estabilizacion y banda (%)"
10480 PRINT "          5 Terminar"
10490 PRINT "J      NOTA: Opciones 2, 3 y 4 son para respuestas como "
10500 PRINT "          sistema de segundo orden a entrada escalon"
10510 PRINT "J Disite el nuM'ero correspondiente = ";
10520 INPUT T0
10530 GO TO T0 OF 10560,10950,11410,11500,610
10540 PRINT "JGG LGR42 OPCION=";T0;" invalida, repita"
10550 GO TO 10430
10560 PRINT @T5;"J      MARGEN DE GANANCIA Y MARGEN DE FASE"
10570 PRINT @T5;"J Ganancia estab'tica ",K0
10580 GOSUB 13780
10590 FOR I=1 TO X(1)/2
10600 GOSUB 13810
10610 NEXT I
10615 REM ..... Margen de ganancia
10620 FOR I=2 TO N3
10630 GOSUB 13810
10640 GOSUB 13810
10650 X2=X4
10660 Y2=Y4
10670 FOR I2=3 TO X(I)
10680 GOSUB 13810
10690 IF X2<=0 AND X4<0 OR (X2=>0 AND X4>0) THEN 10760
10700 Y4=(X2*Y4-X4*Y2)/(X2-X4)
10710 X4=0
10720 GOSUB 2240
10730 PRINT @T5;"J Ganancia criH'tica",K1
10740 PRINT @T5;" Margen de ganancia",K1/K0
10750 PRINT @T5;" Punto de cruce de fase", "0 +/- J";Y4
10760 X2=X4
10770 Y2=Y4
10780 NEXT I2
10790 NEXT I
10800 CLOSE 1
10810 REM ..... Margen de fase

```

```

10820 P0=0.1
10830 X4=0
10840 FOR I=E9 TO Y1 STEP 2*E1
10850 Y4=I
10860 GOSUB 2240
10870 IF ABS(K1-K0*K0)<=P0 THEN 10910
10880 NEXT I
10890 PRINT "JGG LGR43 No hay |GH(JW)|=1 con precision < ";P0
10900 GO TO 10930
10910 PRINT @T5:"J Margen de fase ",180+A2," grados"
10920 PRINT @T5:" Punto de cruce de ganancia", "0 +/- J";Y4
10930 GO TO 10430
10940 REM
10950 P0=0.5
10960 PRINT @T5:"J RESPUESTA COMO SISTEMA DE SEGUNDO ORDEN ";
10970 PRINT @T5:"A UNA ENTRADA ESCALON"
10980 PRINT "JRazon de amortiguamiento (entre 0 y 1) = ";
10990 INPUT P1
11000 IF P1=>1 OR P1<=0 THEN 10980
11010 P2=TAN(ACS(P1))
11020 GOSUB 13780
11030 FOR I=1 TO X(1)/2
11040 GOSUB 13810
11050 NEXT I
11055 IF N3=1 THEN 10414
11060 FOR I=2 TO N3
11070 GOSUB 13810
11080 FOR I1=2 TO X(I)
11090 GOSUB 13810
11100 P3=Y4+X4*P2
11110 IF ABS(P3)<=P0 THEN 11160
11120 NEXT I1
11130 NEXT I
11140 PRINT "JGG LGR51 NO corta LGR, o precision=";P0;" no adecuada"
11150 GO TO 11390
11160 PRINT @T5:"J -Razon de amortiguamiento",P1
11170 P4=100*EXP(-P1*PI/SQR(1-P1*P1))
11180 PRINT @T5:USING 11190:" Sobrenivel porcentual",P4," %"
11190 IMAGE /,FA,14X,FD,2D,FA
11200 P5=SQR(X4*X4+Y4*Y4)
11210 GOSUB 2240
11220 PRINT @T5:"J Angulo desde eje real ",ACS(P1)," gradosK"
11230 PRINT @T5:"J Ganancia en corte con LGR ",K1;"K"
11240 PRINT @T5:"J Frecuencia no amortiguada Wn",P5," 1/segK"
11250 PRINT @T5:"J Frecuencia amortiguada Wd ",Y4," 1/segK"
11260 PRINT @T5:"J Constante de amortiguamiento",X4,"K"
11270 PRINT @T5:"J Constante de tiempo ",-1/X4,"K"
11280 PRINT @T5:"J Tiempo pico Tp ",PI/Y4," segK"

```

```

11290 P7=5
11300 P6=1/X4*LOG(P7/100*SQR(1-P1*P1))
11310 PRINT @T5:"J T de estabilizacion (banda<"P7;"%)"P6," seg"
11320 PRINT "JG Desea valor de Ts para otra banda (SI 0 NO?) = ";
11330 INPUT R$
11340 IF R$<>"SI" THEN 11390
11350 PRINT "JValor de banda en % (entre 0 y 100) = ";
11360 INPUT P7
11370 IF P7<=0 OR P7>100 THEN 11350
11380 GO TO 11300
11390 CLOSE 1
11400 GO TO 10430
11410 PRINT @T5:"J RAZON DE AMORTIGUAMIENTO"
11420 GOSUB 10210
11430 P1=-X4/SQR(X4*X4+Y4*Y4)
11440 PRINT @T5:"J -Desde el punto ",X4;" + J("Y4;"")
11450 IF P1>0 AND P1<1 THEN 11160
11460 PRINT @T5:"J Razon de amortiguamiento",P1
11470 PRINT @T5:"G Caso no contemplado"
11480 GO TO 10430
11490 REM
11500 PRINT @T5:"J RAZON DE AMORTIGUAMIENTO CON Wn CONSTANTE"
11510 PRINT "JT tiempo de estabilizacion Wn.Ts>0 = ";
11520 INPUT P6
11530 IF P6<=0 THEN 11510
11540 PRINT "JBanda de respuesta (entre 0 y 100%) = ";
11550 INPUT P7
11560 IF P7<=0 OR P7>100 THEN 11540
11570 PRINT @T5:"J -T de estabilizacion menor a ",P6
11580 PRINT @T5:"J -Banda de respuesta menor a ",P7," %"
11590 FOR I=0.1 TO 0.9 STEP 0.1
11600 P8=SQR(1-I*I)
11610 P9=EXP(-I*P6)/P8*SIN(P8*P6-ATN(P8/-I))
11620 IF ABS(P9)<=P7/100 THEN 11660
11630 NEXT I
11640 PRINT "JGG LGR52 No hay razon de amortiguamiento para datos"
11650 GO TO 11670
11660 PRINT @T5:"J Razon de amortiguamiento mayor a",I
11670 GO TO 10430
11680 REM
11685 REM =====

```

```

11690 REM ..... Graficacion del LGR .....
11700 PRINT 'TECLA 6'
11710 GOSUB 13780
11720 PRINT '¿Desea el GRAFICO en el PLOTTER? (SI O NO) = ';
11730 T5=32
11740 T4=130
11750 INPUT R$
11760 IF R$<>'SI' THEN 11820
11770 PRI 'J ALISTE la unidad, COLOQUE papel y defina el CUADRO con las'
11780 PRINT 'J      teclas SET;           para continuar aplaste RETURN'
11790 INPUT R$
11800 T5=1
11810 T4=150
11820 PAGE
11830 F$=SEG(Z$,1,9)
11840 S5=1
11850 WINDOW X0,X1,-Y1,Y1
11860 VIEWPORT 3,T4-3,97,3
11870 MOVE @T5:X0,Y1
11880 DRAW @T5:X1,Y1
11890 DRAW @T5:X1,-Y1
11900 DRAW @T5:X0,-Y1
11910 DRAW @T5:X0,Y1
11920 AXIS @T5:E8,E8
11930 MOVE @T5:0,-Y1+16*E9
11940 PRINT @T5:' JW'
11950 MOVE @T5:0,0
11960 PRINT @T5:' JH0.0'
11970 RMOVE @T5:X1,0
11980 PRINT @T5:' JHHG'
11990 IF D1<=N1+1 THEN 12130
12000 FOR I=0 TO D1-N1-1
12010 A0=A6*(2*I+1)
12020 IF A0=>180 THEN 12130
12030 X2=C9
12040 Y2=0
12050 MOVE @T5:X2,Y2
12060 X2=1.5*E2*COS(A0)
12070 Y2=1.5*E2*SIN(A0)
12080 FOR I1=1 TO 25
12090 RDRAW @T5:X2,Y2
12100 RMOVE @T5:X2,Y2
12110 NEXT I1
12120 NEXT I
12130 REM ..... Dibujo del LGR sobre el eje real
12140 FOR I=1 TO X(1) STEP 2
12150 READ #1:X2,Y2
12160 MOVE @T5:X2,E9
12180 DRAW @T5:Y2,E9
12190 NEXT I
12200 REM ..... Dibujo de cada curva del LGR

```

```

12202 IF N3=1 THEN 12300
12210 FOR I=2 TO N3
12230 READ #1;X2,Y2
12240 MOVE @T5;X2,Y2
12250 FOR I1=2 TO X(I)
12260 READ #1;X2,Y2
12270 DRAW @T5;X2,Y2
12280 NEXT I1
12290 NEXT I
12300 REM ..... Evaluacion de la imagen en eje imaginario
12310 IF S5<>1 THEN 12360
12320 S5=0
12330 CALL "REWIND",1
12340 VIEWPORT 3,T4-3,3,97
12350 GO TO 11990
12360 CLOSE
12370 FOR I=1 TO N1+I1
12380 IF F(5,I)<>0 OR ABS(F(2,I))>E2 THEN 12410
12390 IF F(2,I)>10*E9 THEN 12410
12400 GO TO 12430
12410 MOVE @T5:F(1,I)+3*E9,F(2,I)+3*E9
12420 GOSUB F(3,I)+1 OF 12450,12510
12430 NEXT I
12440 GO TO 12560
12450 REM ..... Dibujo de un zero como "o" ..... - S/R -
12460 RIRAW @T5:-6*E9,0
12470 RIRAW @T5:0,-6*E9
12480 RIRAW @T5:6*E9,0
12490 RIRAW @T5:0,6*E9
12500 RETURN
12510 REM ..... Dibujo de un polo como "x" ..... - S/R -
12520 RIRAW @T5:-6*E9,-6*E9
12530 RMOVE @T5:0,6*E9
12540 RIRAW @T5:6*E9,-6*E9
12550 RETURN
12560 REM ..... Dibujo de titulos y denominaciones
12570 R$=""
12580 MOVE @T5;X0,Y1+2*E9
12590 PRINT @T5;R$;Y$;"H";R$;"HHHH";F$
12600 MOVE @T5;X0,-Y1
12610 PRINT @T5;"J x=POLO o=CERO 1 Divisi6n = ";E8;" Unidades";
12620 PRINT @T5;" Archivo:";X$;"K"
12630 RETURN
12640 REM =====

```

```
12660 PRINT "TECLA 7"
12670 GOSUB 13950
12680 IF T5=51 THEN 12700
12690 GOSUB 13840
12700 PRINT @T5:"J" FUNCION DE TRANSFERENCIA DE LAZO ABIERTO ";
12710 PRINT @T5:"GH(s)J"
12720 PRINT @T5:"Ganancia estaH'tica ",K0
12730 PRINT @T5:"Grado del numerador ",N1
12740 PRINT @T5:"Grado del denominador",D1
12750 IF N1=0 THEN 12880
12760 PRINT @T5:"JCoeficientes del numerador :J"
12770 FOR I=1 TO N1
12780 PRINT @T5: USING 12790:" s**",N1-I+1
12790 IMAGE FA,FD,S
12800 NEXT I
12810 PRINT @T5:" s**0"
12820 FOR I=1 TO N1
12830 PRINT @T5: USING 12840:C0(I)
12840 IMAGE 6D,2D,S
12850 NEXT I
12860 PRINT @T5: USING 12870:C0(N1+1)
12870 IMAGE 6D:2D
12880 PRINT @T5:"JCoeficientes del denominador :J"
12890 FOR I=1 TO D1
12900 PRINT @T5: USING 12790:" s**",D1-I+1
12920 NEXT I
12930 PRINT @T5:" s**0"
12940 FOR I=1 TO D1
12950 PRINT @T5: USING 12840:C1(I)
12970 NEXT I
12980 PRINT @T5: USING 12870:C1(D1+1)
12990 R$="Observaciones"
13000 PRINT @T5:"JPolos y ceros de lazo abierto:"
13010 PRINT @T5: USING 13020:"Parte real","Parte imag.,""Tipo",R$
13020 IMAGE /,4X,FA,8X,FA,9X,FA,11X,FA,/
13050 FOR I=1 TO N1+D1
13060 IF F(5,I)=0 AND ABS(F(2,I))<=E2 THEN 13250
13070 R$=" "
13080 T$="POLO"
13090 IF F(3,I)=1 THEN 13110
13100 T$="CERO"
13110 IF F(5,I)<>2 THEN 13140
13120 R$="Cancelado"
13130 GO TO 13230
13140 IF ABS(F(2,I))<=E1 THEN 13170
13150 R$="ConJugado"
13160 GO TO 13230
13170 GO TO F(4,I) OF 13230,13180,13200,13220
13180 R$="Doble"
13190 GO TO 13230
13200 R$="Triple"
13210 GO TO 13230
13220 R$="Cuadruple"
13230 PRINT @T5: USING 13240:F(1,I),F(2,I),T$,R$
13240 IMAGE 5X,5D,2D,10X,5D,2D,11X,4A,11X,9A
13250 NEXT I
```

```

13260 PRINT @T5:"J Puntos de separacion en el eje real :";
13270 PRINT @T5: USING 13280:"#", "Valor", "Validez";
13280 IMAGE /,9X,FA,15X,FA,11X,FA,/
13290 FOR I=1 TO N
13300 IF ABS(S(2,I))>E1 THEN 13360
13310 R$="NO"
13320 IF S(4,I)=0 THEN 13340
13330 R$="SI"
13340 PRINT @T5: USING 13350:I,S(1,I),R$
13350 IMAGE 9X,1D,13X,5D,2D,12X,2A
13360 NEXT I
13370 RETURN
13380 REM =====
13390 REM Resolver la ecuacion para los pto. separacion
13400 PRINT "TECLA 10"
13410 GOSUB 13950
13420 PRINT @T5:"J RESOLUCION DE D(s) + K * N(s) = 0"
13430 PRINT @T5:"J Ganancia estatica ",K0
13440 PRINT "J Valor de ganancia (entre 0 y 10000) = ";
13450 INPUT K1
13460 IF K1<=0 OR K1>10000 THEN 13440
13470 K1=K0*K1
13480 DELETE T
13490 DIM T(D1+1)
13500 T=C1
13510 IF N1<>0 THEN 13540
13520 T(D1+1)=T(D1+1)+K1
13530 GO TO 13580
13540 T0=D1-N1
13550 FOR I=1 TO N1+1
13560 T(I+T0)=T(I+T0)+K1*C0(I)
13570 NEXT I
13580 K2=N
13590 N=D1
13600 GOSUB 3470
13610 N=K2
13620 PRINT @T5:"J Ganancia dinamica ",K1/K0;"K"
13630 PRINT @T5:"J -Ganancia total ",K1;"K"
13640 PRINT @T5: USING 13650:"RAIZ", "PARTE REAL", "PARTE IMAG."
13650 IMAGE /,17X,FA,4X,FA,8X,FA
13660 FOR I=1 TO D1
13670 PRINT @T5: USING 13680:I,P1(I),P2(I)
13680 IMAGE 19X,FD,5X,4D,2D,10X,5D,2D
13690 NEXT I
13700 DELETE P1,P2,Q1,T
13710 PRINT "J Desea ingresar otras ganancias (SI O NO?) = ";
13720 INPUT R$
13730 IF R$="SI" THEN 13440
13740 RETURN
13750 REM =====

```

```
770 REM Subrutinas generales de LGRGIE
780 REM Apertura de archivo de puntos
790 OPEN X$;1,'R',S$
800 RETURN
810 REM Lectura de pares de puntos
820 READ #1:X4,Y4
830 RETURN
840 REM Impresion de cabeceras y titulos
850 CALL 'TIME',Z$
860 PRINT @T5:'LJESCUELA POLITECNICA NACIONAL'
870 PRINT @T5:'FACULTAD DE INGENIERIA ELECTRICA'
880 PRINT @T5: USING 13890:'SISTEMAS DE CONTROL', 'FECHA : ',Z$
890 IMAGE FA,27X,FA,18A
900 PRINT @T5: USING 13910:Y$,'Archivo : ',X$
910 IMAGE /,FA,16X,FA,FA
920 PRINT @T5: USING 13930:
930 IMAGE 72('-')
940 RETURN
950 REM Pedido de respuestas en papel
960 PRINT 'Desea los resultados en impresora (SI O NO?) = ';
970 T5=32
980 INPUT R$
990 IF R$<>'SI' THEN 14020
000 T5=51
010 GOSUB 13840
020 RETURN
030 REM.....
```

Manual de uso

Si el equipo se encuentra apagado, primeramente se encenderá la consola, luego la unidad de diskette 1, después, la unidad 0 y se inicializará el reloj interno con el comando *:

```
CALL "SETTIM", "DD-MMM-AA HH:MM:SS"
```

Luego de ejecutado este comando, o si el equipo estuvo previamente encendido; se carga el diskette conteniendo los programas en la unidad disponible con el comando:

```
CALL "MOUNT", unidad, variable-alfanumérica
```

Inmediatamente se pone en memoria el programa principal, para el cálculo del lugar geométrico de las raíces, con el comando:

```
OLD "LGRPP"
```

quedando de esta manera listo para trabajar, ya sea con el comando RUN o presionando la TECLA1 que desplegarán en la pantalla las posibilidades, opciones a tomarse como se ilustra en la FIG. D.1.

* Un comando es ejecutado, o un dato ingresado; cuando se presiona la tecla RETURN

LUCHA METÉTRICO DE LAS RAICES
 =====

POSIBILIDADES:

TECLA 1 ==> REINICIAR EL PROGRAMA (RUN)

TECLA 2 ==> DATOS COMO COEFICIENTES

TECLA 3 ==> DATOS COMO FACTORES (RAICES)

TECLA 9 ==> LISTADO DE VARIABLES EN USO

TECLA 20 ==> ENTRADA DE VALORES POR DISKETTE

Escoja TECLA

FIG. D.1 Opciones iniciales del programa

La función de transferencia de lazo abierto $GH(s)$ debe estar escrita sólo de dos formas:

a) como la relación de dos polinomios

$$GH(s) = \frac{a_n s^n + a_{n-1} s^{n-1} + \dots + a_0}{b_m s^m + b_{m-1} s^{m-1} + \dots + b_0}$$

donde $a_n \neq 0$ y $b_m \neq 0$,

para ingresar los coeficiente, presionando la TECLA2, o

b) como la relación de factores de primer grado

$$GH(s) = \frac{K_o (S+Z_1)(S+Z_2)\dots(S+Z_n)}{(S+P_1)(S+P_2)\dots(S+P_m)}$$

para ingresar las raíces, presionando la TECLA 3.

Al presionar cualquiera de las dos teclas; primero se

pide escoger un ϵ consistente con la magnitud de los datos que se ingresarán; luego los grados del numerador y denominador que deben ser enteros positivos menores a ocho; el grado del numerador no puede ser mayor al del denominador y, la ganancia estática mayor a cero y hasta un valor de 10000.

Cuando se ingresa por coeficientes puede aparecer el mensaje:

" Estoy buscando las raices "

para indicar que se debe esperar al próximo paso, en cambio al ingresar por raíces; cuando se da una raíz compleja (parte imaginaria $\neq 0$) se genera la respectiva conjugada.

Para los dos casos, calcula la ecuación de los puntos de separación y sus raíces; indicándolo con el mensaje:

"Ecuacion para los puntos de separacion $dK(s)/ds = 0$ ".

El momento que se encuentra listo a calcular los puntos pertenecientes al LGR, realiza el pedido de la unidad donde se ha colocado el diskette de datos con el mensaje:

UNIDAD donde esta el diskette:?

para luego pedir el nombre del archivo donde se almacenarán estos datos con el mensaje:

NOMBRE del archivo de resultados:?

con el que verificará si existe; en tal caso; solicitará in

dicar su destrucción o no, con el mensaje LGR31.

Al aparecer en pantalla el mensaje:

Estoy grabando los puntos del LGR

se debe esperar de 10 a 30 minutos, dependiendo de la complejidad del caso, hasta recibir aviso de:

FIN DEL LGR

y; segundos después se despliega en pantalla las alternativas de uso del ejercicio calculado, como se ilustra en la FIG. D.2.

```

LUGAR GEOMETRICO DE LAS RAICES
=====
POSIBILIDADES:
TECLA 1 ==> REINICIAR EL PROGRAMA (RUN)
TECLA 4 ==> DADO UN PUNTO, OBTENER SU BANANCIA
TECLA 5 ==> ANALISIS DE ESTABILIDAD RELATIVA
TECLA 6 ==> GRAFICACION DEL LGR
TECLA 7 ==> IMPRESION DE DATOS DEL LGR
TECLA 8 ==> CAMBIO EN LIMITES DEL PLANO
TECLA 10 ==> DADA K, OBTENER LOS PUNTOS EN LGR
TECLA 11 ==> MENU DE ESTAS ALTERNATIVAS

```

Escoja TECLA

FIG. D.2 Opciones de uso de un LGR ya calculado

En esta parte, las opciones más relevantes, son las - que corresponden al análisis de estabilidad relativa (TECLA 5) y al cambio de límites (TECLA 8).

Para análisis de estabilidad relativa se puede escoger uno o varios de los cálculos que aparecen en la FIG.D.3; de biendo el operador responsabilizarse de la correcta aplicación de cada resultado.

Para obtener:

- 1 Margen de ganancia y margen de fase
- 2 Sobrenivel, T_p , T_s , W_n , W_d , Kte de T
Razon de amortiguamiento:
- 3 Dado un punto del LGR
- 4 Dado T de estabilización y banda (%)
- 5 Terminar

NOTA: Opciones 2, 3 y 4 son para respuestas como sistema de segundo orden a entrada escalon

Disite el número correspondiente =

FIG. D.3 Opciones para análisis de estabilidad relativa
(con TECLA 5)

El cambio de los límites del plano de datos se puede u sar para ampliar un determinado sector; o graficar varios e jercicios sobre un solo papel; guardando siempre la simetría del eje i maginario.

Cabe mencionar que puede suscitarse error, al calcular

la ganancia en un punto, por sobrepasar el rango de trabajo del computador, que es de $\pm 8.988 \text{ E } \pm 307$, especialmente al utilizar la TECLA 4.

En la práctica; solamente hay que responder correctamente los requerimientos del programa, y para la mayoría de los mensajes de error acudir al manual de errores, para realizar una cómoda y eficaz sesión de trabajo.

Manual de errores

A continuación se tiene una explicación y ampliación a los mensajes de error que pueden aparecer en la pantalla del operador al ejecutarse el programa.

Todos estos mensajes, son precedidos por el código LGR seguido de un valor numérico a través del cual aparecen en este manual; además de emitir una alarma audible de advertencia,

Existen, durante el proceso, mensajes que indican la actividad que está siendo realizada por el programa y que no necesitan respuesta (se pueden diferenciar por la luz de BUSY encendida).

Para cualquier otro mensaje no contemplado en la presente lista de errores; consultar el manual del sistema o de la unidad específica.

LGR11 GRADO-NUMERADOR excede a maximo de "7"

Causa : el grado del numerador que se ha ingresado es un va
lor negativo, o mayor que siete.

Acción: digitar el valor correcto*.

LGR12 GRADO-DENOMINADOR excede a maximo de "7"

Causa : el grado del denominador que se ha ingresado es un
valor negativo, cero, o mayor que siete.

Acción: digitar el valor correcto.*

LGR13 GRADO-NUMERADOR excede a GRADO-DENOMINADOR

Causa : el grado del denominador ingresado es menor que el
valor del grado del numerador..

Acción: digitar los valores correctos*.

LGR14 PRIMER coeficiente es cero * REPITA

Causa : al ingresar los coeficientes para el numerador o el
denominador, el primer coeficiente es igual a cero.

Acción: digitar ese coeficiente correctamente. En caso de
existir error en los grados, presionar la TECLA 1.

LGR15A GANANCIA $K_o = n$ FUERA DE LIMITES

Causa : la ganancia estática n al dividir el primer coefi--
ciente del numerador para el primero del denominador

* Si ingresan valores con decimales, sólo se usa la parte en
tera.

es un valor negativo, o mayor que 10000.

Acción: reiniciar el programa (TECLA 1)

LGR15B GANANCIA $K_0 = n$ FUERA DE LIMITES

Causa : la ganancia estática total n ingresada, es un valor negativo, cero o mayor que 10000.

Acción: reiniciar el programa (TECLA 1).

LGR16 Por el grado del XXXX no hay mas conjugadas

Causa : al ingresar una raíz compleja, no existe posibilidad (por el grado del XXXX) de generar su conjugada.

Acción: corregir los valores de la última raíz; o reiniciar el programa (TECLA 1).

LGR17 No hay raíces para 500 iteraciones y 5 valores

Causa : no convergen los valores en la subrutina del cálculo de raíces de un polinomio entero.

Acción: ninguna.

LGR21 TODAS las raices se han cancelado - FIN

Causa : los valores en numerador y denominador se han simplificado.

Acción: ninguna.

LGR22 n Raices multiples (no se contempla)

Causa : se han detectado n raíces en un mismo punto, que -
exceden el máximo de cuatro previsto.

Acción: ninguna.

LGR23 n Ptos. de sep. multiples (no contempla)

Causa : se han detectado n puntos de separación, en un mismo punto, que exceden el máximo de tres previsto.

Acción: ninguna.

LGR24 Error en epsilon; no hay pto. de sep. cercano

Causa : al generar los puntos del LGR y llegar al eje real, no encuentra un punto válido (como raíz o punto de separación).

Acción: reiniciar el programa (TECLA 1), e ingresar un épsilon menor.

LGR31 Archivo XXXX existe, se destruye (SI O NO?):

Causa : el archivo XXXX consta en el directorio del diskette de la unidad especificada anteriormente.

Acción: responder SI o NC de acuerdo a la importancia del archivo XXXX.

LGR32 Archivo XXXX no existe

Causa : el archivo XXXX no consta en el directorio del diskette; de la unidad especificada anteriormente.

Acción: digitar el nombre correcto.

LGR33 Archivo XXXX no es de LGR

Causa : el archivo XXXX no contiene datos de algún ejercicio del LGR.

Acción: reiniciar el programa (TECLA 1).

LGR34 NO existe o no esta cerrado ARCHIVO de datos

Causa : se trata de realizar las opciones de la segunda parte, sin haber realizado o completado el cálculo de los puntos del LGR.

Acción: reiniciar el programa (TECLA 1) y verificar el trabajo.

LGR41 NO es valido para LGR solo en eje real

Causa : se trata de realizar el análisis de estabilidad relativa para un LGR que solo existe en el eje real.

Acción: ninguna.

LGR42 OPCION = n invalida, repita

Causa : no existe la opción n para análisis de estabilidad relativa.

Acción: digitar el valor correcto.

LGR43 No hay $|GH(jW)| = 1$ con precision $< n$

Causa : no pudo encontrar el margen de fase, al barrer el eje imaginario hasta el límite del plano.

Acción: ninguna.

LGR51 NO corta LGR, o precision=n no adecuada

Causa : no encuentra el punto de corte del LGR, con la recta para una razón de amortiguamiento dada (dentro del plano de datos).

Acción: ninguna.

LGR52 NO hay razon de amortiguamiento para datos

Causa : no puede determinarse una razón de amortiguamiento desde 0.1, que cumpla con las condiciones dadas.

Acción: ninguna.

LGR61 No existen datos todavía; PRIMERO INGRESELOS

Causa : intentá cambiar los límites del plano de datos para un ejercicio que no ha concluído, o que no se ha ingresado.

Acción: ninguna.

LGR62 Respuesta = A equivocada

Causa : para escoger el eje, en cambio de límites, se ha ingresado un valor diferente a X o Y.

Acción: digitar el alfabético correcto.

LGR63 Los límites ingresados son incompatibles

Causa : los valores límites para el eje real, son iguales o están cambiados.

Acción: digitar los valores correctos.

Bibliografía

- ✓ 1. Kuo, B.C., "Sistemas automáticos de Control", Compañía Editorial Continental S.A., Marzo 1.973
- ✓ 2. Shinnars, S.M., "Modern control systems theory and applications"., Addison-Wesley Publishing Company., 1972
- ✓ 3. Dorf, Richard C., "Sistemas automáticos de Control", Fondo Educativo Interamericano S.A., 1.977
- ✓ 4. Distefano, J.; Stubberud, A.; Williams, I., "Retroalimentación y Sistemas de Control", Mc Graw-Hill 1.978
- ✓ 3.5 GUPTA, "AUTOMATIC CONTROL", Edit Limusa, 1972
5. Barreto Vaquero Diderot, "Programa digital para calcular y dibujar el Lugar Geométrico de las Raíces de un Sistema Realimentado", Tesis de Grado., Escuela Politécnica Nacional., 1.977
- ✓ 6 - *DAZANTO RAMIRO*, "Programa para el estudio de estabilidad del criterio lugar geométrico de las raíces", Tesis de grado, EPN, 1981
6. Control, "Root loci of type II and type III Systems", julio 1.968, pp 646-647.