

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES CUAUTITLAN

“ ALGORITMOS BASICOS DE CONTROL ”

T E S I S  
QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:  
INGENIERO MECANICO ELECTRICISTA  
P R E S E N T A :

FELIPE ZETINA PEREZ

Director de Tesis: Ing. Nicolás Calva Tapia



Universidad Nacional  
Autónoma de México



## **UNAM – Dirección General de Bibliotecas Tesis Digitales Restricciones de uso**

### **DERECHOS RESERVADOS © PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis está protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

INDICE GENERAL

INTRODUCCION.

CAPITULO 1.	RESPUESTA EN FRECUENCIA DE SISTEMAS CONTINUOS Y DISCRETOS (GRAFICAS DE BODE) .....	1
1.1.	Introducción .....	2
1.2.	Diagramas de Bode para Sistemas Continuos .....	2
1.3.	Márgenes de Ganancia y de Fase .....	3
1.4.	Construcción del Algoritmo para Sistemas Continuos .....	5
1.5.	Listado del Programa BODECON .....	10
1.6.	Operación del Programa BODECON .....	16
1.7.	Ejemplos de Sistemas Continuos .....	18
1.8.	Diagramas de Bode para Sistemas Discretos .....	29
1.9.	Construcción del Algoritmo para Sistemas Discretos .....	29
1.10.	Listado del Programa BODEDISC .....	35
1.11.	Operación del Programa BODEDISC .....	41
1.12.	Ejemplos de Sistemas Discretos .....	44
CAPITULO 2.	LUGAR GEOMETRICO DE LAS RAICES DE SISTEMAS CONTINUOS Y DISCRETOS ( ROOT-LOCUS ) .....	54
2.1.	Introducción .....	55
2.2.	Lugar Geométrico para Sistemas Continuos .....	55
2.3.	Lugar Geométrico para Sistemas Discretos .....	55

2.4.	Construcción del Algoritmo para Sistemas Continuos y Discretos .....	56
2.5.	Listado del Programa ROOTLOC .....	60
2.6.	Operación del Programa ROOTLOC .....	67
2.7.	Ejemplos para Sistemas Continuos y Discretos .....	70
CAPITULO 3.	GRAFICAS DE NYQUIST PARA SISTEMAS CONTINUOS Y DISCRETOS ( CRITERIO DE NYQUIST ).	75
3.1.	Introducción .....	76
3.2.	Gráfica de Nyquist para Sistemas Continuos .....	77
3.3.	Gráfica de Nyquist para Sistemas Discretos .....	78
3.4.	Estabilidad Relativa .....	79
3.5.	Construcción del Algoritmo .....	81
3.6.	Listado del Programa NYQUIST .....	90
3.7.	Operación del Programa NYQUIST .....	100
3.8.	Ejemplos de Gráficas de Nyquist ....	105
CAPITULO 4.	SIMULACION PARA SISTEMAS DISCRETOS DE LAZO CERRADO .....	116
4.1.	Introducción .....	117
4.2.	Función de Transferencia de Pulsos de Lazo Cerrado .....	117
4.3.	Función de Transferencia del Controlador Digital .....	120
4.4.	Función de Transferencia del Retenedor y Proceso .....	121
4.5.	Construcción del Algoritmo .....	124
4.6.	Listado del Programa SIMDISC .....	131
4.7.	Operación del Programa SIMDISC .....	140

4.8. Ejemplos de Simulación de Siste--  
mas Discretos ..... 143

CONCLUSIONES.

BIBLIOGRAFIA.

# INTRODUCCION

+++++

## INTRODUCCION.

Con la aparición de las computadoras digitales, en los últimos años se ha presentado un fenómeno que ha tendido a revolucionar radicalmente el desarrollo de las actividades científicas. Debido a ello, en la actualidad es posible realizar una mayor cantidad de análisis que implican enormes volúmenes de operaciones repetitivas, en intervalos de tiempo reducidos y con una exactitud enorme.

Estas características de las computadoras digitales, amplían grandemente el panorama educativo y tecnológico de nuestra sociedad, ya que con una mínima cantidad de recursos racionalmente administrados, es posible desarrollar tanto programas computacionales enfocados hacia el reforzamiento de la enseñanza de múltiples temas, como programas computacionales enfocados hacia el análisis y diseño de sistemas.

Dentro del contexto de este paquete de " Algoritmos Básicos de Control ", se ha tratado de cumplir con tres aspectos, enmarcando su alcance en la enseñanza de algunos métodos de análisis y diseño de sistemas de control.

El paquete de " Algoritmos Básicos de Control ", se estructuró en la forma siguiente :

- 1.- Se da una breve introducción, tratando de cubrir los conceptos básicos de cada uno de los métodos expuestos.
- 2.- Se incluye la construcción de cada algoritmo en forma de bloques.
- 3.- Se presenta un listado fuente del programa computacional de cada algoritmo.
- 4.- Se proporciona una secuencia de la operación de cada programa.
- 5.- Finalmente, se plantean algunos ejemplos para ilustrar el funcionamiento de cada programa.

Los programas computacionales, fueron implementados en lenguaje BASIC, utilizando el siguiente equipo:

- a) Una microcomputadora Hewlett Packard modelo 9816, con una capacidad de 512 Kb de memoria.

- b) Una unidad de discos flexibles de 3 1/2 ", con capacidad de 270 Kb, modelo Hewlett Packard.
- c) Un impresor-graficador, modelo Hewlett Packard.

Además, el sistema operativo utilizado fue el MSDOS, compatible con el equipo antes mencionado.

El desarrollo del paquete de programas denominado - " Algoritmos Básicos de Control ", fué realizado en las instalaciones de la Unidad de Cómputo de la Facultad de Estudios Superiores Cuautitlán.



# CAPITULO 1

+++++

RESPUESTA EN FRECUENCIA DE SISTEMAS  
CONTINUOS Y DISCRETOS  
( GRAFICAS DE BODE )

+++++

## 1.1 INTRODUCCION.

En el análisis de los sistemas de control, las gráficas de respuesta en frecuencia o gráficas de Bode juegan un papel muy importante, ya que nos proporcionan información sobre el rango de frecuencias en las cuales se presenta mínima distorsión, y sobre la estabilidad del sistema en cuestión en términos de los márgenes de ganancia y de fase. Además, resultan de mucha utilidad cuando disponemos de datos experimentales, ya que se puede obtener el modelo matemático del sistema.

En este capítulo, se presentan los algoritmos para determinar la respuesta a la frecuencia de los sistemas continuos y discretos en una computadora digital. El método de análisis de Bode, fundamentalmente consiste de dos gráficas :

- a) GRAFICA DE MAGNITUD. En donde se tiene como abscisa a la frecuencia ( $\omega$ ) en radianes/segundo y como ordenada la magnitud  $GH(j\omega)$  en decibeles.
- b) GRAFICA DE FASE. En donde la abscisa es la frecuencia ( $\omega$ ) en radianes/segundo y la ordenada es el ángulo de fase en grados.

Las dos gráficas, se presentan como funciones de la frecuencia ( $\omega$ ), utilizando una escala logarítmica para el eje de las abscisas y una escala lineal para el eje de las ordenadas.

## 1.2 DIAGRAMAS DE BODE PARA SISTEMAS CONTINUOS.

En forma general, la función de transferencia de lazo abierto de un sistema de control se puede representar como :

$$GH(S) = \frac{K (S + Z_1) (S + Z_2) \dots (S + Z_m)}{(S + p_1) (S + p_2) \dots (S + p_n)} \quad (1)$$

En donde:  $K$  es la ganancia ;  $Z_1, Z_2, \dots, Z_m$  son los ceros y  $P_1, P_2, \dots, P_n$  son los polos del sistema. Sabemos que para la respuesta a la frecuencia hacemos  $S=j\omega$ , sustituyendo en la expresión (1), se tiene que :

$$GH(j\omega) = \frac{K (j\omega + Z_1) (j\omega + Z_2) \dots (j\omega + Z_m)}{(j\omega + P_1) (j\omega + P_2) \dots (j\omega + P_n)} \quad (2)$$

Sacando la magnitud en decibeles y la fase en grados, de la ecuación (2), se tiene que :

$$|GH(j\omega)| = 20 \log |K| + 20 \log \left[ \sum_{i=1}^m (j\omega + Z_i) - \sum_{j=1}^n (j\omega + P_j) \right] \quad (3)$$

y

$$\angle GH(j\omega) = \angle K + \sum_{i=1}^m \angle (j\omega + Z_i) - \sum_{j=1}^n \angle (j\omega + P_j) \quad (4)$$

### 1.3 MARGENES DE GANANCIA Y DE FASE.

Estos dos parámetros resultan de gran importancia, ya que nos determinan la estabilidad relativa del sistema, -- estos son definidos como :

- a) Margen de Ganancia (M.G.). Se define como la magnitud del inverso de la función de transferencia de lazo abierto, evaluada a una frecuencia  $\omega_{\pi}$ , -- en la cual el ángulo de fase es de  $-180$  grados :

$$M.G. = \frac{1}{|GH(j\omega_{\pi})|} \quad (\text{db})$$

donde  $\omega_{\pi}$  es la frecuencia del cruce de fase, y --  $\angle GH(j\omega_{\pi}) = -180$  grados.

- b) Margen de Fase (M.F.). Se define como la suma de  $180$  grados al ángulo de fase de la función de -- transferencia de lazo abierto y ganancia unitaria:

$$M.F. = ( 180 + \angle GH(j\omega_1) ) \quad (\text{grados})$$

donde  $\omega_1$  es la frecuencia del cruce de ganancia, y

$$|GH(j\omega_1)| = 1.$$

A continuación se muestran los puntos críticos en las gráficas de respuesta en frecuencia, para determinar los márgenes de fase y de ganancia de un sistema (figura 1.1):

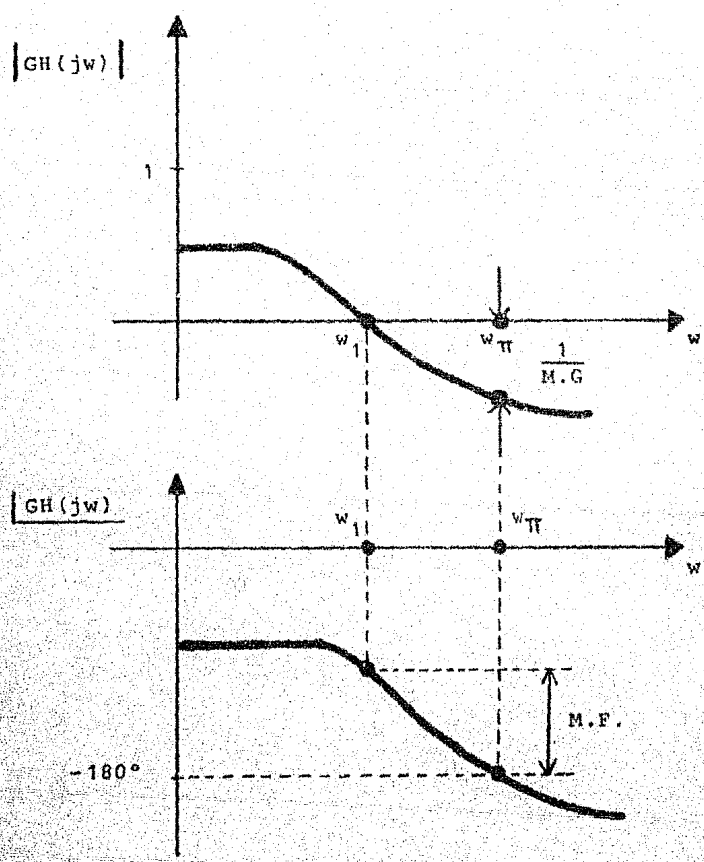


Figura 1.1. Márgenes de ganancia y fase de un sistema.

#### 1.4 CONSTRUCCION DEL ALGORITMO PARA SISTEMAS CONTINUOS.

El algoritmo por medio del cual se obtienen las gráficas de Bode para un sistema continuo, se compone de los siguientes bloques, descritos a continuación :

- A. BLOQUE DE ENTRADA DE DATOS. Dentro de este bloque se introducen los parámetros que definen la dinámica del sistema.
- a) (Ndec) El número de décadas que se desean considerar para las gráficas de Bode.
  - b) (Nz) El número de ceros del sistema.
  - c) (Np) El número de polos del sistema.
  - d) (K1) El valor de la ganancia del sistema.
  - e) (Ingraf) El incremento considerado entre cada punto de graficación, siendo este 1 o 0.25.
  - f) (Breal(Q), Aima(Q)) El valor de la parte real y la parte imaginaria respectivamente, de cada cero -- del sistema.
  - g) (Drea(Q), Cima(Q)) Valor de la parte real y la parte imaginaria respectivamente de cada polo del sistema .
- B. BLOQUE DE TABULACION DE MAGNITUD Y FASE. Dentro de este bloque se obtienen iterativamente los valores de magnitud (Aml (Icont)) y Fase (Fase(Icont)) el -- cual cumple con la siguiente secuencia :
- I) Se inicializan las variables Icont (contador de los puntos calculados) y Pp (factor que determina el -- cambio de década):
  - II) Se inicia un ciclo iterativo que tiene como condi -- ción final el número de décadas (Ndec).
  - III) Se inicia un ciclo iterativo para calcular la varia -- ción de los valores de frecuencia (Wn (Icont)), y -- cuya condición final, se encuentra cada 9 unidades -- del contador K, con un incremento en cada iteración igual al valor de la variable Ingraf:
- FOR K = 1 TO 9 STEP Ingraf
- IV) Se calcula en valor de la frecuencia Wn (Icont) en -- función del valor de la variable K del punto III y -- del factor de cambio de década (Pp)

$$W_n(Icont) = K/10 * P_p$$

- V) Se inicializan las variables  $Atan1$  (acumulador o sumatoria de los ángulos aportados por los ceros del sistema) y  $Alog1$  (acumulador o sumatoria de las magnitudes aportadas por los ceros del sistema).
- VI) Se inicia un ciclo para calcular la sumatoria de los ángulos y magnitudes aportados por los ceros del sistema, cuya condición final se cumple según el número de ceros del sistema  $Nz$ .
- VII) Se obtiene la parte imaginaria de cada cero ( $Pima$ ) que se utilizará en la sumatoria, en función de la frecuencia ( $Wn(Icont)$ ) y la parte imaginaria de cada cero ( $Aima(I)$ ):

$$Pima = Wn(Icont) - Aima(I)$$

- VIII) La sumatoria de los ángulos aportados por los ceros del sistema ( $Atan1$ ), se calcula en función de las partes real ( $Breal(I)$ ) e imaginaria ( $Pima$ ), utilizando la función  $FNarctan$ , que suministra el ángulo aportado por cada cero del sistema:

$$Atan1 = \sum_{I=1}^{Nz} \tan^{-1} (Pima/Breal(I))$$

$$o \quad Atan1 = Atan1 + FNarctan(Pima, Breal(I))$$

- IX) La sumatoria de las magnitudes aportadas por los ceros del sistema ( $Alog1$ ) se calcula en función de las partes real ( $Breal(I)$ ) e imaginaria ( $Pima$ ) en la siguiente forma:

$$Alog1 = \sum_{I=1}^{Nz} \log \left[ \sqrt{Breal(I)^2 + Pima^2} \right] \times 20$$

$$o \quad Alog1 = Alog1 + LGT(SQR(Breal(I))^2 + Pima^2) * 20$$

- X) Se inicializan las variables  $Atanh$  (acumulador o sumatoria de ángulos aportados por los polos del sistema) y  $Alogb$  (acumulador o sumatoria de magni

tudes aportadas por los polos del sistema).

- XI) Se inicia un ciclo para calcular la sumatoria - de ángulos y magnitudes aportados por los polos del sistema, cuya condición final se cumple según el número de polos  $N_p$ .
- XII) Se obtiene la parte imaginaria de cada polo ( $P_{i\text{ma}}$ ) utilizada en la sumatoria, en función de la frecuencia ( $W_n(I\text{cont})$ ) y la parte imaginaria de cada polo ( $C_{i\text{ma}}(I)$ ) :

$$R_{i\text{ma}} = W_n(I\text{cont}) - C_{i\text{ma}}(I)$$

- XIII) De manera similar al punto VIII, la sumatoria - de ángulos aportados por los polos es :

$$A_{\text{tanb}} = \sum_{I=1}^{N_p} \tan^{-1} (R_{i\text{ma}}/D_{\text{rea}}(I))$$

$$o \quad A_{\text{tanb}} = A_{\text{tanb}} + FNarctan(R_{i\text{ma}}, D_{\text{rea}}(I))$$

- XIV) De manera similar al punto IX, la sumatoria de las magnitudes aportadas por los polos es :

$$A_{\text{logb}} = \sum_{I=1}^{N_p} \log \left[ \sqrt{D_{\text{rea}}(I)^2 + P_{i\text{ma}}^2} \right] \times 20$$

$$o \quad A_{\text{logb}} = A_{\text{logb}} + LGT(\text{SQR}(D_{\text{rea}}(I)^2 + P_{i\text{ma}}^2)) \times 20$$

- XV) Posteriormente, considerando los valores obtenidos en los puntos VIII, IX, XIII y XIV, se calculan la fase ( $F_{\text{ase}}(I\text{cont})$ ) y la magnitud ( $A_{\text{ml}}(I\text{cont})$ ) totales:

$$F_{\text{ase}}(I\text{cont}) = A_{\text{tanf}} - A_{\text{tanb}}$$

$$y \quad A_{\text{ml}}(I\text{cont}) = (A_{\text{logf}} - A_{\text{logb}}) + 20 * LGT(K1)$$

en el arreglo  $F_{\text{ase}}(I\text{cont})$  se almacenan los valores correspondientes a la "Fase Total", para cada valor de frecuencia, mientras que en el arre

glo  $Aml(Icont)$  se almacenan los valores correspondientes a la "Magnitud Total", para cada valor de frecuencia.

- XVI) Se cierra el ciclo iniciado en el punto III.  
 XVII) Se cierra el ciclo iniciado en el punto II.

C. BLOQUE PARA ENCONTRAR LOS LIMITES DE GRAFICACION. Dentro de este bloque se encuentran los límites de graficación máximo y mínimo :

- a)  $Wnmin$ ,  $Wnmax$ . Frecuencia mínima y máxima.  
 b)  $Amlmin$ ,  $Amlmax$ . Magnitud mínima y máxima.  
 c)  $Fasemin$ ,  $Fasemax$ . Fase mínima y máxima.

Utiliza una subrutina llamada "seleccion" para -- llevar a cabo tal tarea.

D. BLOQUE DE GRAFICACION. Dentro de este bloque se realiza lo siguiente (para ambas gráficas) :

- I) Se inicia el paquete de graficación (instrucción GINIT).  
 II) Se define la zona de graficación en la pantalla; se definen, escalan y rotulan los ejes de coordenadas.  
 III) Se inicia un ciclo iterativo para graficar sucesivamente cada valor de magnitud o fase totales, obtenidos en el bloque B, y que se encuentran almacenados en los arreglos  $Aml(Icont)$  y  $Fase(Icont)$  contra los valores de frecuencia correspondientes  $Wn(Icont)$  :

Graficar :  $\log(Wn(x))$  Vs  $Aml(x)$

o PLOT LGT( $Wn(x)$ ),  $Aml(x)$

para el diagrama de magnitud, donde  $x=1,2,\dots,Icont$

Graficar :  $\log(Wn(x))$  Vs  $Fase(x)$

o PLOT LGT( $Wn(X)$ ),  $Fase(X)$

para el diagrama fase, donde  $X=1,2,\dots,Icont$ .

- IV) Se cierra el ciclo iniciado en el punto III.



E. BLOQUE PARA IMPRESION DE LA TABLA. Este bloque suministra un listado impreso en forma tabular de los siguientes conceptos :

- Valores de Frecuencia ( $\omega_n$ ) en radianes/segundo.
- Valor de Magnitud ( $A_m$ ) en decibeles.
- Valor de Fase (Fase) en grados.

F. BLOQUE PARA IMPRESION DE PARAMETROS. Este bloque suministra un reporte impreso de los siguientes parámetros :

- a) Número de Décadas.
- b) Número de Ceros del sistema.
- c) Número de Polos del sistema.
- d) Valor de la Ganancia del sistema.
- e) Las partes real e imaginaria de los Ceros y los Polos del sistema.

#### 1.5 LISTADO DEL PROGRAMA BODECON

( Ver la siguiente página ).

\*\*\* Programa Graficas de Bode (sist.cont) \*\*\*

```

5  ---- PROGRAMA BODECON RESPUESTA EN FRECUENCIA (S/CONTINUO)
10 ---- FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES CUAUTITLAN H.N.A.M.
15 ---- ELABORADO COMO TRABAJO DE TESIS POR :
20 ---- SUSTENTANTE : Felipe Zetina Perez
25 ---- ASESOR      : Ing. Nicolas Calva Topia
30 ---- ELABORADO EN LA UNIDAD DE COMPUTO DE LA F.E.S.C.
35 DIM Aima(20),Breal(20),Cima(20),Drea(20),Wn(200),Fase(200)
40 DIM Aml(200),Antlog(200),Al(200),Titf(40)
45 C#=CHR$(255)&"K"
50 OUTPUT 2 USING "#,K";C#
55 PRINT TAB(10);"---- RESPUESTA EN FRECUENCIA ----"
60 PRINT TAB(15);"---- SISTEMAS CONTINUOS ----"
65 PRINT RPT$( "--",57)
70 INPUT "NUMERO DE DECADAS =",Ndec
75 PRINT "NUMERO DE DECADAS =",Ndec
80 INPUT "NUMERO DE CEROS =",Nz
85 PRINT "NUMERO DE CEROS =",Nz
90 INPUT "NUMERO DE POLOS =",Np
95 PRINT "NUMERO DE POLOS =",Np
100 INPUT "VALOR DE LA GANANCIA =",K1
105 PRINT "VALOR DE LA GANANCIA =",K1
110 INPUT "INCR. DE GRAFICACION PARA RESOLUCION (1 o .25)",Ingraf
115 PRINT "INCREMENTO DE GRAFICACION",Ingraf
120 IF Ingraf<>1 AND Ingraf<>.25 THEN 110
125 INPUT "> TODO CORRECTO (SI/NO) ?",Pr#
130 IF Pr#<>"SI" AND Pr#<>"NO" THEN 125
135 IF Pr#="NO" THEN 50
140 PRINT "-- INTRODUCIR LOS CEROS --"
145 FOR Q=1 TO Nz
150     INPUT "IPARTE REAL,PARTE IMAGINARIA)",Breal(Q),Aima(Q)
155     PRINT "CERO NUMERO :";Q,"[";Breal(Q);",";Aima(Q);" i ]"
160     IF Breal(Q)=0 THEN Breal(Q)=1.E-10
165 NEXT Q
170 INPUT "> TODO CORRECTO (SI/NO) ?",Pr#
175 IF Pr#<>"SI" AND Pr#<>"NO" THEN 170
180 IF Pr#="NO" THEN
185     OUTPUT 2 USING "#,K";C#
190     GOTO 140
195 ELSE
200 END IF
205 PRINT "---- INTRODUCIR LOS POLOS ----"
210 FOR Q=1 TO Np
215     INPUT "[P. REAL],[P. IMAGINARIA]",Drea(Q),Cima(Q)
220     PRINT "POLO NUMERO :";Q,"[";Drea(Q);",";Cima(Q);" i ]"
225     IF Drea(Q)=0 THEN Drea(Q)=1.E-10
230 NEXT Q
235 INPUT "> TODO CORRECTO (SI/NO) ?",Pr#
240 IF Pr#<>"SI" AND Pr#<>"NO" THEN 235
245 IF Pr#="NO" THEN
250     OUTPUT 2 USING "#,K";C#
255     GOTO 205
260 ELSE
265 END IF

```

```

270 !--- TABULAR MAGNITUD Y FASE :
275   DEG
280   Icont=0
285   Pp=1.0
290   FOR L=1 TO Ndec
295     FOR K=1 TO 9 STEP Ingraf
300       Icont=Icont+1
305       Wn(Icont)=K/10*Fp
310       Atan1=0.
315       Alog1=0
320       FOR I=1 TO Nz
325         Pima=Wn(Icont)-Aima(I)
330         Atan1=Atan1+FNArctan(Pima,Dreal(I))
335         Alog1=Alog1+LGT(SQR(Dreal(I)^2+Pima^2))*20.0
340       NEXT I
345       Atanb=0.
350       Alogb=0.
355       FOR J=1 TO Np
360         Rima=Wn(Icont)-Cima(J)
365         Atanb=Atanb+FNArctan(Rima,Drea(J))
370         Alogb=Alogb+LGT(SQR(Drea(J)^2+Rima^2))*20.0
375       NEXT J
380 !--- ACUMULAR MAGNITUD Y FASE
385       Fase=(Atan1-Atanb)
390       Fase(Icont)=Fase
395       Aml(Icont)=(Alog1-Alogb)+20*LGT(K1)
400       Antlog(Icont)=10.0^(Aml(Icont)/20.0)
405       PRINT USING "#,4X,SDDD.DD";Wn(Icont)
410       PRINT USING "3(3X,SDDD.DDDD)";Fase(Icont);Aml(Icont);Antlog(Icont)
415       NEXT K
420       Pp=Pp*10
425     NEXT L
430 !
435 !--- ENCUENTRA LIMITES : SUPERIOR E INFERIOR DE GRAFICACION
440   FOR Q=1 TO Icont
445     A1(Q)=Wn(Q)
450   NEXT Q
455   GOSUB Seleccion
460   Wnmax=Ls
465   Wnmin=Li
470   FOR Q=1 TO Icont
475     A1(Q)=Aml(Q)
480   NEXT Q
485   GOSUB Seleccion
490   A1max=Ls
495   A1min=Li
500   FOR Q=1 TO Icont
505     A1(Q)=Fase(Q)
510   NEXT Q
515   GOSUB Seleccion
520   Fasemax=Ls
525   Fasemin=Li
530   GOTO 505

```

```

535 Seleccion: !*****
540 Ls=-1.E+300
545 Li=1.E+300
550 FOR Q=1 TO Icont-1
555     IF A1(Q)>A1(Q+1) THEN 575
560     IF A1(Q)<Li THEN Li=A1(Q)
565     IF A1(Q+1)>Ls THEN Ls=A1(Q+1)
570     GOTO 585
575     IF A1(Q)>Ls THEN Ls=A1(Q)
580     IF A1(Q+1)<Li THEN Li=A1(Q+1)
585 NEXT Q
590 RETURN
595 PRINT "WNMAX=";Wnmax,"WNMIN=";Wnmin
600 PRINT "AMLMAX=";Amlmax,"AMLMIN=";Amlmin
605 PRINT "FASEMEX=";Fasemax,"FASEMIN=";Fasemin
610 PRINT
615 PRINT "**** PARA CONTINUAR PRESIONAR [CONTINUE] ****"
620 PAUSE
625 Grafica: !--- BLOQUE DE GRAFICACION --- HP-9816 ---
630 !-----
635 GOSUB Itabla
640 OUTPUT 2 USING "#,K";C#
645 GCLEAR
650 PRINT TAB(10);"*** RESPUESTA EN FRECUENCIA (SIST.CONT) ***"
655 PRINT TAB(10);"-----"
660 PRINT TAB(9);" Facultad de Estudios Superiores Cuautitlan"
665 PRINT
670 PRINT RPT#("-",62)
675 PRINT
680 PRINT "Presionar ENTER para ver la grafica"
685 INPUT Q#
690 OUTPUT 2 USING "#,K";C#
695 ON KBD GOTO Exit
700 OUTPUT 2 USING "#,K";C#
705 INPUT " 1 = MAGNITUD ; 2 = FASE",Gr
710 INTEGER Screen(1:12480)
715 GINIT
720 PLOTTER IS 3,"INTERNAL"
725 GRAPHICS ON
730 CSIZE 6
735 LORG 6
740 Xgdumax=100*MAX(1,RATIO)
745 Ygdumax=100*MAX(1,1/RATIO)
750 FOR I=-.25 TO .25 STEP .1
755     MOVE Xgdumax/2+I,Ygdumax
760     LABEL "Respuesta en Frecuencia"
765 NEXT I
770 CSIZE 4
775 MOVE Xgdumax/2,Ygdumax*.95
780 IF Gr=1 THEN
785     Tit*="Diagrama de Magnitud (Sistema Continuo)"
790 ELSE
795     Tit*="Diagrama de Fase (Sistema Continuo)"
800 END IF

```

```

805 LABEL Tit$
810 DEG
815 LDIR 90
820 CSIZE 3.5
825 MOVE 9,Ygdumax/2
830 IF Gr=1 THEN
835 Tit$="Magnitud en Decibales"
840 ELSE
845 Tit$="Fase en Grados"
850 END IF
855 LABEL Tit$
860 LORG 4
865 LDIR 0
870 MOVE Xgdumax/2,.07*Ygdumax
875 LABEL "Frecuencia "
880 !DEFINIR SUB-AREA EN LA PANTALLA
885 VIEWPORT .1*Xgdumax,.98*Xgdumax,.15*Ygdumax,.9*Ygdumax
890 !--- DEFINIR LIMITES DE GRAFICACION
895 Xmin=-1
900 Xmax=Ndec-1
905 Xrange=Xmax-Xmin
910 Dx=.1
915 IF Gr=1 THEN
920 Ymin=Amlmin
925 Ymax=Amlmax
930 Yrange=Ymax-Ymin
935 Dy=Yrange/50
940 ELSE
945 Ymin=Fasemin
950 Ymax=Fasemax
955 Yrange=Ymax-Ymin
960 Dy=Yrange/50
965 END IF
970 !--- ESCALA NO-ISOTROPICA : izq/der/piso/techo
975 WINDOW Xmin,Xmax,Ymin,Ymax
980 CLIP OFF
985 !--- EJE HORIZONTAL
990 FOR Decade=Xmin TO Xmax
995 FOR Units=1 TO 1+8*(Decade<Xmax)
1000 X=Decade+LBT(Units)
1005 MOVE X,Ymin
1010 DRAW X,Ymax
1015 NEXT Units
1020 NEXT Decade
1025 FOR X=Xmin TO Xmax STEP Dx*10
1030 CSIZE 4
1035 LORG 6
1040 MOVE X,Ymin-Yrange*.015
1045 LABEL USING "#,K";"10 "
1050 CSIZE 3
1055 LORG 1
1060 MOVE X+Xrange*.01,Ymin-Yrange*.036
1065 LABEL USING "#,K";X
1070 NEXT X

```

```

1075 CLIP ON
1080 !--- DEFINIR LOS EJES
1085 AXES Xrange,Dy,Xmin,Ymin,1,5
1090 AXES Xrange,Dy,Xmax,Ymax,1,5
1095 GRID 1,Dy*5,Xmin,Ymin
1100 CLIP OFF
1105 !--- EJE VERTICAL
1110 FOR Y=Ymin TO Ymax STEP Dy*5
1115     CSIZE 4
1120     LORG 0
1125     MOVE Xmin-Xrange*.03,Y
1130     LABEL USING "#,K";INT(Y)
1135 NEXT Y
1140 ! Aqui es donde comienza la accion .....
1145 CLIP ON
1150 GSTORE Screen(*) ! ALMACENAR EN UN ARREGLO LA PANTALLA
1155 GOSUB Newcurve ! CARGAR LA PANTALLA Y GRAFICAR LA CURVA
1160 Spin:GOTO Spin ! LOOP,LOOP,LOOP,LOOP,LOOP
1165 Newcurve: !-----
1170 GLOAD Screen(*) ! CARGA ENREJADO (BORRA CURVA ANTERIOR)
1175 IF Gr=1 THEN
1180     FOR X=1 TO Icont
1185         BEEP 305,.2
1190         PLOT LGT(Wn(X),Am1(X)! GRAFICAR W(X) VS MAGNITUD
1195     NEXT X
1200 ELSE
1205     FOR X=1 TO Icont
1210         BEEP 400,.3
1215         PLOT LGT(Wn(X),Fase(X)! GRAFICAR W(X) VS FASE
1220     NEXT X
1225 END IF
1230 RETURN
1235 Itabla:***** IMPRIMIR TABLA Y PARAMETROS
1240 INPUT "*** IMPRIMIR LA TABLA (SI/NO) ?",Pr#
1245 IF Pr#<>"SI" AND Pr#<>"NO" THEN 1240
1250 IF Pr#="NO" THEN 1320
1255 PRINTER IS PRT
1260 PRINT CHR$(12)
1265 PRINT TAB(20); "*** RESPUESTA EN FRECUENCIA (SIST.CONT) ***"
1270 PRINT TAB(20); " "
1275 PRINT TAB(20); " _____ "
1275 PRINT TAB(20); " FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES CUAUTITLAN"
1280 PRINT TAB(15);RPT$("*",57)
1285 PRINT
1290 PRINT TAB(20); "FRECUENCIA          MAGNITUD          FASE"
1295 PRINT TAB(15);RPT$("-",57)
1300 PRINT
1305 FOR Q=1 TO Icont
1310 PRINT USING "20X,SDDD.DD,2(BX,SDDD.DDDDD)";Wn(Q);Am1(Q);Fase(Q)
1315 NEXT Q
1320 INPUT "> IMPRIMIR PARAMETROS ? (SI/NO)",Pr#
1325 IF Pr#<>"SI" AND Pr#<>"NO" THEN 1320
1330 IF Pr#="NO" THEN 1430
1335 PRINTER IS PRT

```

```

1340 PRINT CHR$(12)
1345 PRINT TAB(10);"**** D A T O S   D E L   S I S T E M A ****"
1350 PRINT
1355 PRINT TAB(10);"NUMERO DE DECADAS :";Ndec
1360 PRINT TAB(10);"NUMERO DE CEROS   :";Nz
1365 PRINT TAB(10);"NUMERO DE POLOS   :";Np
1370 PRINT TAB(10);"VALOR DE LA GANANCIA :";K1
1375 PRINT TAB(10);"=====
1380 PRINT TAB(10);"LOS CEROS DEL SISTEMA SON : "
1385 FOR Q=1 TO Nz
1390 PRINT USING "10(X),#,""S"",2(SDDD.DDDDDD);Breal(Q);Aima(Q)
1395 PRINT " j"
1400 NEXT Q
1405 PRINT TAB(10);"LOS POLOS DEL SISTEMA SON : "
1410 FOR Q=1 TO Np
1415 PRINT USING "10(X),#,""S"",2(SDDD.DDDDDD);Drea(Q);Cima(Q)
1420 PRINT " j"
1425 NEXT Q
1430 PRINTER IS CRT
1435 RETURN
1440 Exit: !***** SALIDA
1445 OUTPUT 2 USING "#,k";C$
1450 GRAPHICS OFF
1455 PRINT TABXY(10,10);"*** PARA IMPRESION, OPRINIR";
1460 PRINT " : [SHIFT] [GRAPHICS] ***"
1465 INPUT " 1 = OTRA GRAFICA ; 0 = SALIR A SYSTEM",Gr
1470 IF Gr<>1 AND Gr<>0 THEN 1445
1475 IF Gr=1 THEN Grafica
1480 GCLEAR
1485 PRINT "REGRESANDO A BASIC SYSTEM"
1490 END
1495 !---- FUNCION PARA CALCULAR EL ARCO TANGENTE
1500 DEF FNArctan(Y,X)
1505 Radians=(ACS(-1)=PI)
1510 DEG
1515 IF X=0 THEN
1520 Arctan=(90+180*(Y<0))*(Y<>0)
1525 ELSE
1530 Arctan=ATN(Y/X)+180*(X<0)!+360*((X>0) AND (Y<0))
1535 END IF
1540 IF Radians THEN
1545 RAD
1550 Arctan=Arctan/57.2957795131
1555 END IF
1560 RETURN Arctan
1565 FNEND

```

## 1.6 OPERACION DEL PROGRAMA BODECON.

Para operar el programa BODECON (Respuesta en Frecuencia de Sistemas Continuos), es necesario cargar el programa tecleando la instrucción :

LOAD "BODECON" (ENTER)

Posteriormente, presionar la tecla (RUN). A continuación, en la pantalla se pide introducir la siguiente información :

<u>EN LA PANTALLA</u>	<u>TECLEAR</u>
NUMERO DE DECADAS =	el número de décadas y ENTER.
NUMERO DE CEROS =	el número de Ceros y ENTER.
NUMERO DE POLOS =	el número de Polos y ENTER.
EL VALOR DE LA GANANCIA=	el valor de la Ganancia y ENTER.
INCR.DE GRAFICACION PARA MAYOR RESOLUCION(1 o .25)	1 o 0.25 y ENTER.
) TODO CORRECTO(SI/NO)?	SI o NO y ENTER.
-- INTRODUCIR LOS CEROS (PARTE REAL,PARTE IMAGIN)	Parte Real, Parte Imaginaria y ENTER.
repitiéndose tantas veces como ceros tenga el sistema.	
) TODO CORRECTO(SI/NO)?	SI o NO y ENTER.
-- INTRODUCIR LOS POLOS (PARTE REAL,PARTE IMAGIN)	Parte Real, Parte Imaginaria y ENTER.
repitiéndose tantas veces como polos tenga el sistema.	
) TODO CORRECTO(SI/NO)?	SI o NO y ENTER.

Posteriormente, aparecerá en la pantalla una tabla -- que muestra los valores de Fase y Magnitud calculados. Al final de la tabla se muestra la siguiente información :

WNMAX = ...                   WNMIN = ...  
 AMLMAX = ...                 AMLMIN = ...  
 FASEMAX = ...                FASEMIN = ...



en donde : WMAX, WMIN, son frecuencia máxima y mínima.  
 AMLMAX, AMLMIN, son magnitud máxima y mínima.  
 FASEMAX, FASEMIN, son fase máxima y mínima.

Para hacer que el programa prosiga, presionar la tecla (CONTINUE).

En seguida se pregunta :

\*\*\* IMPRIMIR LA TABLA (SI/NO)?

Si desea imprimir la tabla, asegurarse primero de que el impresor esté listo, después teclear SI y ENTER.

De lo contrario, teclear NO y ENTER.

Se recomienda imprimir la tabla, sólo cuando el ejercicio introducido sea satisfactorio.

Después se pregunta :

) IMPRIMIR PARAMETROS (SI/NO) ?

Si desea imprimir los parámetros del sistema, asegurarse primero de que el impresor esté listo, después teclear SI y ENTER.

De lo contrario, teclear NO y ENTER.

También se recomienda imprimir los parámetros sólo cuando el ejercicio introducido sea satisfactorio.

Después, se pide presionar la tecla (ENTER) para ver la gráfica, entonces se debe teclear :

1 y ENTER para examinar el diagrama de magnitud.

o 2 y ENTER para examinar el diagrama de fase.

Para continuar, presionar la tecla (CONTINUE), entonces, si desea imprimir la gráfica, primero asegurarse de que el impresor esté listo, después presionar simultáneamente las teclas :

(SHIFT) y (GRAPHICS)

De lo contrario teclear :

1 y ENTER para ver otra gráfica.

o 0 y ENTER para salir del programa y analizar otro sistema, o para cargar otro programa.

### 1.7 EJEMPLOS DE SISTEMAS CONTINUOS.

A continuación se ilustran algunos ejemplos, los cuales tienen las siguientes funciones de transferencia :

$$1.1) \quad GH(S) = \frac{20}{S(S+2)(S+5)}$$

$$1.2) \quad GH(S) = \frac{1}{(S+1-98j)(S+1+98j)}$$

$$1.3) \quad GH(S) = \frac{2(S+2)(S-1)}{(S-2+2j)(S-2-2j)(S+1)}$$

### EJEMPLO 1.1

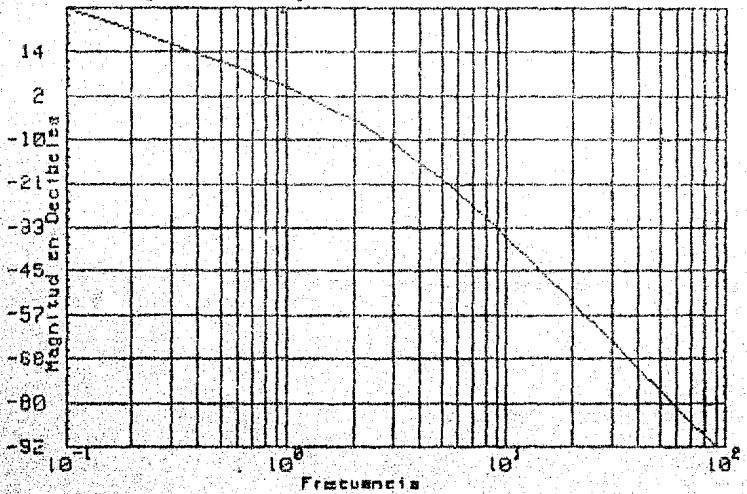
\*\*\*\* DATOS DEL SISTEMA \*\*\*\*

NUMERO DE DECADAS : 3  
NUMERO DE CEROS : 0  
NUMERO DE POLOS : 3  
VALOR DE LA GANANCIA : 20

=====

LOS CEROS DEL SISTEMA SON :  
LOS POLOS DEL SISTEMA SON :  
S +0.000000 +0.000000 j  
S +2.000000 +0.000000 j  
S +5.000000 +0.000000 j

**Respuesta en Frecuencia**  
Diagrama de Magnitud (Sistema Continuo)



## EJEMPLO 1.1

\*\*\* RESPUESTA EN FRECUENCIA (SIST.CONT) \*\*\*

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES CUAUTITLAN

\*\*\*\*\*

FRECUENCIA	MAGNITUD	FASE
+1.10	+26.00802	-94.00817
+1.20	+19.94984	-98.00120
+1.30	+16.36594	-101.96440
+1.40	+13.78136	-105.88385
+1.50	+11.73470	-109.74684
+1.60	+10.02122	-113.54202
+1.70	+8.53248	-117.25966
+1.80	+7.20444	-120.89169
+1.90	+5.99642	-124.43172
+1.00	+4.88117	-127.87498
+2.00	-3.65488	-156.80141
+3.00	-9.97605	-177.27369
+4.00	-15.15874	-192.09476
+5.00	-19.57248	-203.19889
+6.00	-23.41632	-211.75948
+7.00	-26.81644	-218.51693
+8.00	-29.86019	-223.95837
+9.00	-32.61150	-228.41659
+10.00	-35.11883	-232.12502
+20.00	-52.34770	-250.25316
+30.00	-62.74493	-256.72360
+40.00	-70.18118	-260.01258
+50.00	-75.96776	-261.99880
+60.00	-80.70335	-263.32721
+70.00	-84.71093	-264.27781
+80.00	-88.18444	-264.99157
+90.00	-91.24948	-265.54714

## EJEMPLO 1.1

\*\*\*\* DATOS DEL SISTEMA \*\*\*\*

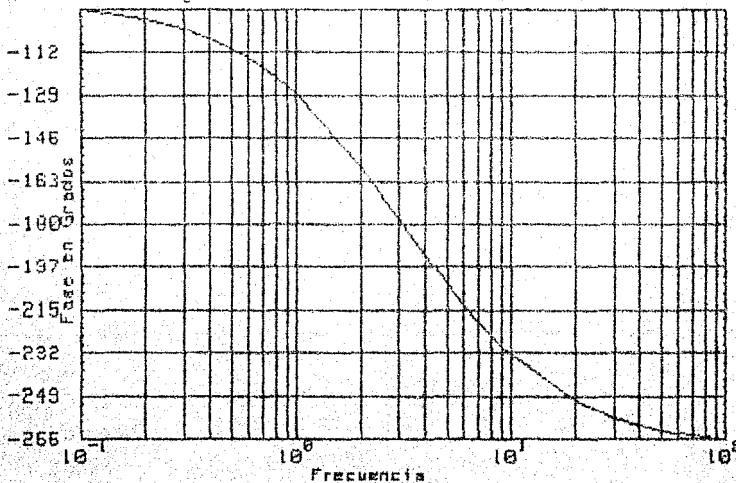
NUMERO DE DECADAS : 3  
 NUMERO DE CEROS : 0  
 NUMERO DE POLOS : 3  
 VALOR DE LA GANANCIA : 20

=====

LOS CEROS DEL SISTEMA SON :  
 LOS POLOS DEL SISTEMA SON :  
 S +0.000000 +0.000000 j  
 S +2.000000 +0.000000 j  
 S +5.000000 +0.000000 j

### Respuesta en Frecuencia

Diagrama de Fase (Sistema Continuo)



## EJEMPLO 1.2

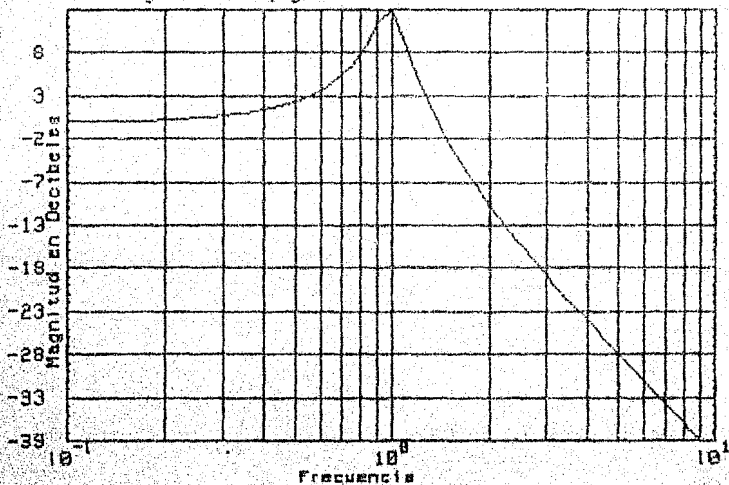
\*\*\*\* DATOS DEL SISTEMA \*\*\*\*

NUMERO DE DECADAS : 2  
 NUMERO DE CEROS : 0  
 NUMERO DE POLOS : 2  
 VALOR DE LA GANANCIA : 1

=====

LOS CEROS DEL SISTEMA SON :  
 LOS POLOS DEL SISTEMA SON :  
 S +.100000 - .980000 j  
 S +.100000 +.980000 j

**Respuesta en Frecuencia**  
 Diagrama de Magnitud (Sistema Continuo)



## EJEMPLO 1.2

\*\*\* RESPUESTA EN FRECUENCIA (SIST.CONT) \*\*\*

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES CUAUTITLAN

\*\*\*\*\*

FRECUENCIA	MAGNITUD	FASE
+ .10	+ .34907	-1.19299
+ .13	+ .39900	-1.49990
+ .15	+ .46040	-1.81274
+ .17	+ .53350	-2.15288
+ .20	+ .61859	-2.46176
+ .23	+ .71598	-2.80096
+ .25	+ .82609	-3.15222
+ .28	+ .94935	-3.51743
+ .30	+1.08628	-3.89873
+ .33	+1.23747	-4.29850
+ .35	+1.40361	-4.71946
+ .38	+1.58546	-5.16470
+ .40	+1.78389	-5.63778
+ .42	+1.99992	-6.14285
+ .45	+2.23466	-6.68473
+ .47	+2.48941	-7.26913
+ .50	+2.76564	-7.90283
+ .53	+3.06504	-8.59397
+ .55	+3.38954	-9.35239
+ .57	+3.74135	-10.19014
+ .60	+4.12302	-11.12208
+ .63	+4.53749	-12.16678
+ .65	+4.98811	-13.34772
+ .68	+5.47879	-14.69493
+ .70	+6.01393	-16.24738
+ .72	+6.59854	-18.05636
+ .75	+7.23808	-20.19035
+ .78	+7.93826	-22.74216
+ .80	+8.70426	-25.83912
+ .82	+9.53916	-29.65750
+ .85	+10.44051	-34.44079
+ .88	+11.39316	-40.51708
+ .90	+12.35613	-48.29541
+1.00	+13.88530	-98.41866
+1.25	+3.83963	-157.10927
+1.50	-2.37387	-166.80541
+1.75	-6.53153	-170.50260

## EJEMPLO 1.2

+2.00	-9.70276	-172.47870
+2.25	-12.29113	-173.72451
+2.50	-14.49090	-174.58999
+2.75	-16.41060	-175.23060
+3.00	-18.11806	-175.72660
+3.25	-19.65617	-176.12333
+3.50	-21.06257	-176.44884
+3.75	-22.35442	-176.72131
+4.00	-23.55124	-176.95312
+4.25	-24.66664	-177.15299
+4.50	-25.71141	-177.32729
+4.75	-26.69430	-177.48075
+5.00	-27.62245	-177.61699
+5.25	-28.50182	-177.73883
+5.50	-29.33743	-177.84848
+5.75	-30.13354	-177.94772
+6.00	-30.89380	-178.03800
+6.25	-31.62137	-178.12050
+6.50	-32.31901	-178.19621
+6.75	-32.98914	-178.26593
+7.00	-33.63387	-178.33038
+7.25	-34.25509	-178.39012
+7.50	-34.85449	-178.44567
+7.75	-35.43358	-178.49746
+8.00	-35.99369	-178.54586
+8.25	-36.53605	-178.59121
+8.50	-37.06177	-178.63377
+8.75	-37.57186	-178.67381
+9.00	-38.06721	-178.71154



## EJEMPLO 1.2

\*\*\*\* DATOS DEL SISTEMA \*\*\*\*

NUMERO DE DECADAS : 2

NUMERO DE CEROS : 0

NUMERO DE POLOS : 2

VALOR DE LA GANANCIA : 1

=====

LOS CEROS DEL SISTEMA SON :

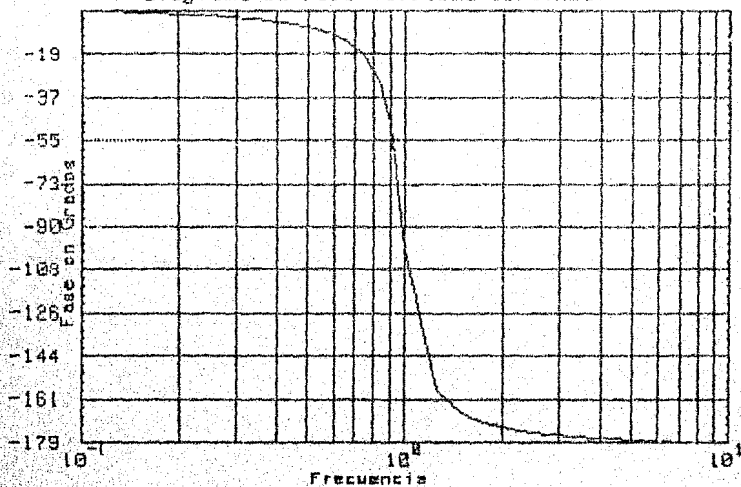
LOS POLOS DEL SISTEMA SON :

S +.100000 - .980000 j

S +.100000 + .980000 j

### Respuesta en Frecuencia

Diagrama de Fase (Sistema Continuo)



### EJEMPLO 1.3

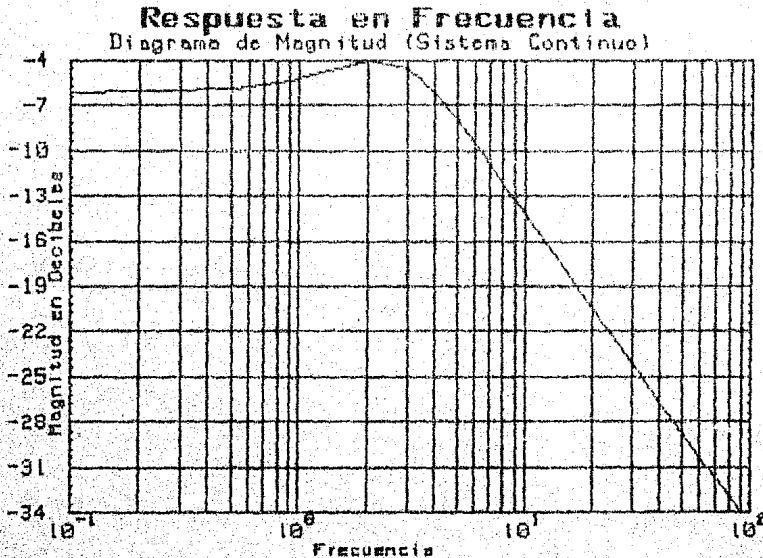
\*\*\*\* DATOS DEL SISTEMA \*\*\*\*

NUMERO DE DECADAS : 3  
NUMERO DE CEROS : 2  
NUMERO DE POLOS : 3  
VALOR DE LA GANANCIA : 2

=====

LOS CEROS DEL SISTEMA SON :  
S +2.000000 +0.000000 j  
S -1.000000 +0.000000 j

LOS POLOS DEL SISTEMA SON :  
S -2.000000 +2.000000 j  
S -2.000000 -2.000000 j  
S +1.000000 +0.000000 j



## EJEMPLO 1.3

\*\*\* RESPUESTA EN FRECUENCIA (SIST.CONT) \*\*\*

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES CUAUTITLAN

\*\*\*\*\*

FRECUENCIA	MAGNITUD	FASE
+1.10	-6.00976	-185.69280
+1.20	-5.97749	-191.17017
+1.30	-5.92452	-196.24135
+1.40	-5.85200	-200.75827
+1.50	-5.76155	-204.62356
+1.60	-5.65512	-207.78880
+1.70	-5.53500	-210.24672
+1.80	-5.40373	-212.01964
+1.90	-5.26404	-213.14976
+1.00	-5.11893	-213.69007
+2.00	-3.97940	-198.43495
+3.00	-4.45365	-172.05653
+4.00	-6.02060	-151.92751
+5.00	-7.73761	-138.81701
+6.00	-9.29419	-130.11160
+7.00	-10.65481	-124.01541
+8.00	-11.84524	-119.53109
+9.00	-12.89707	-116.09867
+10.00	-13.83677	-113.38731
+20.00	-19.95852	-101.52040
+30.00	-23.50291	-97.65772
+40.00	-26.00986	-95.73731
+50.00	-27.95190	-94.58763
+60.00	-29.53762	-93.82201
+70.00	-30.87783	-93.27549
+80.00	-32.03849	-92.86576
+90.00	-33.06211	-92.54716

## EJEMPLO 1.3

\*\*\*\* DATOS DEL SISTEMA \*\*\*\*

NUMERO DE DECADAS : 3  
 NUMERO DE CEROS : 2  
 NUMERO DE POLOS : 3  
 VALOR DE LA GANANCIA : 2

=====

LOS CEROS DEL SISTEMA SON :

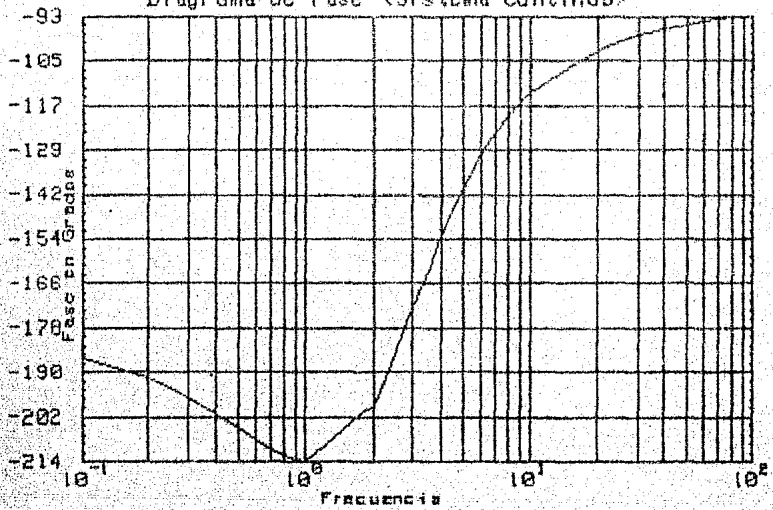
S +2.000000 +0.000000 j  
 S -1.000000 +0.000000 j

LOS POLOS DEL SISTEMA SON :

S -2.000000 +2.000000 j  
 S -2.000000 -2.000000 j  
 S +1.000000 +0.000000 j

### Respuesta en Frecuencia

Diagrama de Fase (Sistema Continuo)



### 1.8 DIAGRAMAS DE BODE PARA SISTEMAS DISCRETOS.

Asumiendo que la función de transferencia de lazo abierto de un sistema discreto en el dominio Z, puede ser representada por :

$$GH(Z) = \frac{K( C_m Z^m + C_{m-1} Z^{m-1} + \dots + C_1 Z + C_0 )}{( D_n Z^n + D_{n-1} Z^{n-1} + \dots + D_1 Z + D_0 )} \quad (4)$$

en donde :  $C_m, C_{m-1}, \dots, C_1, C_0$  son los coeficientes del numerador;  $D_n, D_{n-1}, \dots, D_1, D_0$  son los coeficientes del denominador; y K la ganancia del sistema.

Para el análisis de respuesta en frecuencia, hacemos  $Z = e^{j\omega T} = \cos \omega T + j \sin \omega T$ , siendo T el período de muestreo en segundos y  $\omega$  la frecuencia angular en radianes/seg.

Entonces, la magnitud en decibeles y la fase en grados de la función de transferencia (4), se pueden calcular como sigue :

$$\left| GH(Z) \right| = 20 \log \sum_{i=0}^m |K C_i Z^i| - \sum_{j=0}^n |D_j Z^j| \quad (5)$$

$$\left| GH(Z) \right| = \left[ K + \sum_{i=0}^m |C_i Z^i| - \sum_{j=0}^n |D_j Z^j| \right] \quad (6)$$

### 1.9 CONSTRUCCION DEL ALGORITMO PARA SISTEMAS DISCRETOS.

El algoritmo por medio del cual se obtienen las gráficas de Bode para un sistema discreto, se compone de los bloques que a continuación se describen :

A. BLOQUE DE ENTRADA DE DATOS. Dentro de este bloque se introducen los siguientes datos :

- a) El período de muestreo (T).
- b) La ganancia del sistema (K).

- c) El orden del polinomio del numerador de la función de transferencia (M).
- d) El orden del polinomio del denominador de la función de transferencia (N).
- e) Valores de los coeficientes del numerador:  $C_0, C_1, \dots, C_m$  de la función de transferencia (C(V)) donde  $V=0, 1, 2, \dots, M$ .
- f) Valores de los coeficientes del denominador:  $D_0, D_1, \dots, D_n$  de la función de transferencia (D(V)) donde  $V=0, 1, 2, \dots, N$ .

B. BLOQUE DONDE SE TABULAN LOS VALORES DE MAGNITUD Y FASE. Dentro de este bloque se obtienen iterativamente los valores de magnitud ( $G_d(Q)$ ) y fase ( $G_p(Q)$ ) cumpliendo los pasos siguientes :

- I) Se inicia un ciclo iterativo cuya variable contador  $Q$ , se utiliza para calcular la frecuencia de muestreo  $W_t$ , y cuya condición final depende del número máximo de puntos graficables ( $N_p-1$ ).
- II) Se calcula la frecuencia de muestreo  $W_t$  en función de la variable  $Q$  y del período de muestreo (T) :

$$W_s = 2\pi / T$$

$$W(Q) = (W_s/2) \times (Q/N_p)$$

$$W_t = W(Q) \times T$$

- III) Se inicializan las variables :

$N_r$  - Sumatoria de la parte real del numerador.

$N_i$  - Sumatoria de la parte imaginaria del numerador.

$D_r$  - Sumatoria de la parte real del denominador.

$D_i$  - Sumatoria de la parte imaginaria del denominador.

- IV) Se inicia un ciclo iterativo en donde se calculan las sumatorias  $N_r$  y  $N_i$  del numerador. La condición final depende del orden del numerador (M) :

$$N_r = \sum_{V=0}^m K C_v \cos(V*Wt) \quad (7)$$

$$N_i = \sum_{V=0}^m K C_v \sin(V*Wt) \quad (8)$$

tomando la expresión (7) :

$$N_r = N_r + K*C(V)*COS(V*Wt)$$

tomando la expresión (8) :

$$N_i = N_i + K*C(V)*SIN(V*Wt)$$

Estas dos últimas expresiones, representan la estructura recursiva en el programa, con las que se calcula una sumatoria.

- V) Se cierra el ciclo iniciado en el paso I.
- VI) Se inicia un ciclo iterativo en donde se calculan las sumatorias  $D_r$  y  $D_i$  del denominador. La condición final depende del orden del denominador (N) :

$$D_r = \sum_{V=0}^n D_v \cos(V*Wt) \quad (9)$$

$$D_i = \sum_{V=0}^n D_v \sin(V*Wt) \quad (10)$$

tomando la expresión (9) :

$$D_r = D_r + D(V)*COS(V*Wt)$$

tomando la expresión (10) :

$$D_i = D_i + D(V) * \text{SIN}(V * Wt)$$

Estas dos últimas expresiones, representan la estructura recursiva en el programa, con las que se calcula una sumatoria.

VII) Se cierra el ciclo iniciado en el paso VI.

VIII) Se calculan la Parte real (Re) e imaginaria (Im) totales, tomando como base los valores obtenidos en los pasos IV y VI :

$$\text{Re} = (\text{Nr} * \text{Dr} + \text{Ni} * \text{Di}) / (\text{Dr}^2 + \text{Di}^2) \quad (11)$$

$$\text{Im} = (\text{Ni} * \text{Dr} - \text{Di} * \text{Nr}) / (\text{Dr}^2 + \text{Di}^2) \quad (12)$$

IX) Se calcula la magnitud (Gm) :

$$G_m = \sqrt{\text{Re}^2 + \text{Im}^2}$$

X) Ahora se calculan la magnitud logarítmica (Gd) y la fase (Gp) totales :

$$G_d = 20 \log(G_m)$$

$$G_p = \tan^{-1}(\text{Im}/\text{Re}) - 180$$

Nota: Los pasos II al X se repiten para cada valor de la frecuencia de muestreo Wt.

XI) Se cierra el ciclo iniciado en el punto I.

C. BLOQUE PARA ENCONTRAR LOS LIMITES DE GRAFICACION. En este bloque se encuentran los límites máximo y mínimo de graficación :

a) Wmax, Wmin. Frecuencia de muestreo máxima y mínima.

b) Gdmax, Gdmin. Magnitud logarítmica máxima y mínima.



c)  $G_{pmax}, G_{pmin}$ . Fase máxima y mínima.

Se utiliza una subrutina llamada "Selección", para llevar a cabo esta tarea.

D. BLOQUE DE GRAFICACION. Dentro de este bloque se lleva a cabo lo siguiente (para ambas gráficas es similar) :

- I) Se inicializa el paquete de graficación (instrucción GINIT).
- II) Se define la zona de graficación en la pantalla; se definen, escalan y retulan los ejes de coordenadas.
- III) Se inicia un ciclo iterativo para graficar sucesivamente cada valor de magnitud o fase totales, obtenidos en el bloque B, y que se encuentran almacenados en los arreglos  $G_d(Q)$  y  $G_p(Q)$ , contra los valores de frecuencia almacenados en el arreglo  $W(X)$  :

Graficar :  $W(X)$  Vs  $G_d(X)$

o PLOT  $W(X), G_d(X)$  para  $X=1, 2, \dots, Np-1$

Y graficar :  $W(X)$  Vs  $G_p(X)$

o PLOT  $W(X), G_p(X)$  para  $X=1, 2, \dots, Np-1$

IV) Se cierra el ciclo iniciado en el paso III.

E. BLOQUE PARA IMPRESION DE LA TABLA. Este bloque suministra un listado impreso, en forma de columnas de los siguientes conceptos :

- Valores de frecuencia ( $W$ ) en radianes/seg.
- Valores de magnitud ( $G_d$ ) en decibeles.
- Valores de fase ( $G_p$ ) en grados.

F. BLOQUE PARA IMPRESION DE PARAMETROS. En este bloque se suministra un reporte impreso de los

siguientes parámetros :

- a) Período de muestreo  $T$ .
- b) Valor de la ganancia del sistema  $K_p$ .
- c) Orden del numerador  $M$ .
- d) Orden del denominador  $N$ .
- e) Coeficientes del numerador en orden ascendente  $(C(V))$ .
- f) Coeficientes del denominador en orden ascendente  $(D(V))$ .

#### 1.10 LISTADO DEL PROGRAMA BODEDISC.

( Ver la siguiente página ).

```

*** Programa Graficas de Bode (sist.disc) ***
5  !---- PROGRAMA  BODEDISC  RESPUESTA EN FRECUENCIA (S/DISCR)
10 !---- FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES CUAUTITLAN U.N.A.M.
15 !---- ELABORADO COMO TRABAJO DE TESIS POR :
20 !---- SUSTENTANTE : Felipe Zetina Perez
25 !---- ASESOR      : Ing. Nicolas Calva Tapia
30 !---- ELABORADO EN LA UNIDAD DE COMPUTO DE LA F.E.S.C.
35   ALLOCATE Gd(50),Gp(50),Gm(50),W(50),A1(50),Tit#L50)
40   C#=CHR$(255)&"K"
45   Ra=180.0/PI
50   Peque=1.0E-24
55   Np=50
60   FOR I=1 TO 50
65     Gd(I)=0
70     Gp(I)=0
75   NEXT I
80   GOSUB 1355
85   INPUT " PERIODO DE MUESTREO : ",T
90   PRINT "PERIODO DE MUESTREO =";T
95   INPUT " GANANCIA= ",K
100  PRINT "VALOR DE LA GANANCIA =";K
105  INPUT " ORDEN DEL NUMERADOR : ",M
110  PRINT "ORDEN DEL NUMERADOR :";M
115  INPUT " ORDEN DEL DENOMINADOR : ",N
120  PRINT "ORDEN DEL DENOMINADOR :";N
125  INPUT " >TODO CORRECTO (SI/NO) ?",Pr$
130  IF Pr$<>"SI" AND Pr$<>"NO" THEN GOTO 125
135  IF Pr$="NO" THEN GOTO 85
140  ALLOCATE C(M),D(N)
145  OUTPUT 2 USING "#,K";C$
150  PRINT TAB(2); "COEFS.DEL NUMERADOR INICIANDO CON EL"
155  PRINT TAB(2); "TERMINO INDEPENDIENTE"
160  FOR V=0 TO M
165    INPUT C(V)
170    PRINT "C(";V;")=";C(V);
175  NEXT V
180  PRINT
185  INPUT "> TODO CORRECTO (SI/NO)?",Pr$
190  IF Pr$<>"SI" AND Pr$<>"NO" THEN 185
195  IF Pr$="NO" THEN 150
200  PRINT TAB(2); "COEFS.DEL DENOMINADOR INICIANDO CON EL"
205  PRINT TAB(2); "TERMINO INDEPENDIENTE"
210  FOR V=0 TO N
215    INPUT D(V)
220    PRINT "D(";V;")=";D(V);
225  NEXT V
230  PRINT
235  INPUT "TODO CORRECTO (SI/NO) ?",Pr$
240  IF Pr$<>"SI" AND Pr$<>"NO" THEN 235
245  IF Pr$="NO" THEN 200
250  !---- TABULANDO MAGNITUD Y FASE :
255  FOR Q=1 TO Np-1
260    Ws=2*PI/T
265    W(Q)=(Ws/2)*(Q/Np)

```

```

270      Wt=W(Q)*T
275      Nr=0
280      Ni=0
285      Dr=0
290      Di=0
295      FOR V=0 TO M
300          Nr=Nr+K*C(V)*COS(V*Wt)
305          Ni=Ni+K*C(V)*SIN(V*Wt)
310      NEXT V
315      FOR V=0 TO N
320          Dr=Dr+D(V)*COS(V*Wt)
325          Di=Di+D(V)*SIN(V*Wt)
330      NEXT V
335      Re=(Nr*Dr+Ni*Di)/(Dr^2+Di^2)
340      Im=(Ni*Dr-Di*Nr)/(Dr^2+Di^2)
345      Gm(Q)=SQR(Re^2+Im^2)
350      IF Gm(Q)=0 THEN Gm(Q)=Peque
355      Gd(Q)=20*LOG(Gm(Q))
360      Gp(Q)=Ra*ATN(Im/Re)-180
365      PRINT USING "#,XX,SDDD.DDD";W(Q)
370      PRINT USING "3(4X,SDDD.DDDDD)";Gm(Q);Gd(Q);Gp(Q)
375  NEXT Q
380  !--- ENCUENTRA LIMITES : SUPERIOR E INFERIOR DE GRAFICACION
385  FOR Q=1 TO Np-1
390      A1(Q)=W(Q)
395  NEXT Q
400  GOSUB Seleccion
405  Wmax=Ls
410  Wmin=Li
415  FOR Q=1 TO Np-1
420      A1(Q)=Gd(Q)
425  NEXT Q
430  GOSUB Seleccion
435  Gdmax=Ls
440  Gdmin=Li
445  FOR Q=1 TO Np-1
450      A1(Q)=Gp(Q)
455  NEXT Q
460  GOSUB Seleccion
465  Gpmax=Ls
470  Gpmin=Li
475  GOTD 540
480  Seleccion: !*****
485  Ls=-1.E+300
490  Li=1.E+300
495  FOR Q=1 TO Np-1
500      IF A1(Q)>A1(Q+1) THEN 520
505      IF A1(Q)<Li THEN Li=A1(Q)
510      IF A1(Q+1)>Ls THEN Ls=A1(Q+1)
515      GOTD 530
520      IF A1(Q)>Ls THEN Ls=A1(Q)
525      IF A1(Q+1)<Li THEN Li=A1(Q+1)
530  NEXT Q
535  RETURN

```

```

540 PRINT "WMAX=";Wmax,"WMIN=";Wmin
545 PRINT "GDMAX=";Gdmax,"GDMIN=";Gdmin
550 PRINT "GPMAX=";Gpmax,"GPMIN=";Gpmin
555 PRINT
560 PRINT "***** PARA CONTINUAR PRESIONE [CONTINUE] *****"
565 PAUSE
570 Grafica: !--- BLOQUE DE GRAFICACION --- HF-9816 ---
575 !-----
580 OUTPUT 2 USING "#,K";C#
585 GCLEAR
590 PRINT TAB(10);"*** RESPUESTA EN FRECUENCIA (SIST.DISCR) ***"
595 PRINT TAB(10);"-----"
600 PRINT TAB(5);" Facultad de Estudios Superiores Cuautitlan"
605 PRINT
610 PRINT RPT#(" ",63)
615 PRINT
620 INPUT "*** IMPRIMIR LA TABLA (SI/NO) ? ***",Pr#
625 IF Pr#<>"SI" AND Pr#<>"NO" THEN 620
630 IF Pr#="NO" THEN 640
635 PRINTER IS PRT
640 !--- IMPRIME LA TABLA DE VALORES
645 PRINT CHR#(12)
650 PRINT TAB(20);"*** RESPUESTA EN FRECUENCIA (SIST.DISCR) ***"
655 PRINT TAB(20);"-----"
660 PRINT TAB(20);" FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES CUAUTITLAN"
665 PRINT TAB(15);RPT#(" ",57)
670 PRINT
675 PRINT TAB(20);"FRECUENCIA          MAGNITUD          FASE"
680 PRINT TAB(15);RPT#("-",57)
685 PRINT
690 FOR Q=1 TO Np-1
695 PRINT USING "15X,SDDD.DDD,2(0X,SDDD.DDDDD)";W(Q);Gd(Q);Gp(Q)
700 NEXT Q
705 INPUT "> IMPRIMIR PARAMETROS ? (SI/NO)",Pr#
710 IF Pr#<>"SI" AND Pr#<>"NO" THEN 705
715 IF Pr#="NO" THEN 830
720 PRINTER IS PRT
725 PRINT CHR#(12)
730 PRINT TAB(10);"**** DATOS DEL SISTEMA ****"
735 PRINT
740 PRINT TAB(10);"PERIODO DE MUESTREO :";T
745 PRINT TAB(10);"VALOR DE LA GANANCIA :";K
750 PRINT TAB(10);"ORDEN DEL NUMERADOR :";M
755 PRINT TAB(10);"ORDEN DEL DENOMINADOR :";N
760 PRINT TAB(10);RPT#("-",48)
765 PRINT TAB(10);"COEFS.DEL NUMERADOR INICIANDO CON EL"
770 PRINT TAB(10);"TERMINO INDEPENDIENTE : "
775 FOR Q=0 TO M
780 PRINT TAB(10);"C(";Q;")= ";C(Q)
785 NEXT Q
790 PRINT TAB(10);RPT#("-",48)
795 PRINT TAB(10);"COEFS.DEL DENOMINADOR INICIANDO CON EL"
800 PRINT TAB(10);"TERMINO INDEPENDIENTE : "
805 FOR Q=0 TO N

```

```

810 PRINT TAB(10);"D(";Q;")= ";D(Q)
815 NEXT Q
820 PRINT
825 PRINT
830 PRINTER IS CRT
835 !-----
840 PRINT "Presionar ENTER para ver la grafica"
845 INPUT Q#
850 OUTPUT 2 USING "#,K";C#
855 ON KBD GOTO Exit
860 OUTPUT 2 USING "#,K";C#
865 INPUT " 1 = MAGNITUD ; 2 = FASE",Gr
870 INTEGER Screen(1:12400)
875 GINIT
880 PLOTTER IS 3,"INTERNAL"
885 GRAPHICS ON
890 CSIZE 6
895 LORG 6
900 Xgdumax=100*MAX(1,RATIO)
905 Ygdumax=100*MAX(1,1/RATIO)
910 FOR I=-.25 TO .25 STEP .1
915 MOVE Xgdumax/2+I,Ygdumax
920 LABEL "Respuesta en Frecuencia"
925 NEXT I
930 CSIZE 4
935 MOVE Xgdumax/2,Ygdumax*.95
940 IF Gr=1 THEN
945 Tit#="Diagrama de Magnitud (Sist. Discreto)"
950 ELSE
955 Tit#="Diagrama de Fase (Sist. Discreto)"
960 END IF
965 LABEL Tit#
970 DEG
975 LDIR 90
980 CSIZE 3.5
985 MOVE 9,Ygdumax/2
990 IF Gr=1 THEN
995 Tit#="Magnitud en Decibeles"
1000 ELSE
1005 Tit#="Fase en Grados"
1010 END IF
1015 LABEL Tit#
1020 LORG 4
1025 LDIR 0
1030 MOVE Xgdumax/2,.07*Ygdumax
1035 LABEL "Frecuencia (W) Rad/seg"
1040 --- DEFINIR SUB-AREA EN LA PANTALLA
1045 VIEWPORT .1*Xgdumax,.98*Xgdumax,.15*Ygdumax,.9*Ygdumax
1050 --- DEFINIR LIMITES DE GRAFICACION
1055 Xmin=Wmin
1060 Xmax=Wmax
1065 Xrange=Xmax-Xmin
1070 Dx=1
1075 IF Gr=1 THEN

```

```

1080      Ymin=Gdmin
1085      Ymax=Gdmax
1090      Yrange=Ymax-Ymin
1095      Dy=1
1100  ELSE
1105      Ymin=Gpmin
1110      Ymax=Gpmax
1115      Dy=4
1120  END IF
1125  !--- ESCALA NO-ISOTROPICA : izq/der/piso/techo
1130  WINDOW Xmin,Xmax,Ymin,Ymax
1135  CLIP OFF
1140  !--- EJE HORIZONTAL
1145  FOR Decade=Xmin TO Xmax
1150      FOR Units=1 TO 1+B*(Decade<Xmax)
1155          X=Decade+Units
1160          MOVE X,Ymin
1165          DRAW X,Ymax
1170      NEXT Units
1175  NEXT Decade
1180  FOR X=Xmin TO Xmax STEP Dx*10
1185      CSIZE 4
1190      LORG 5
1195      MOVE X,Ymin-Yrange*.015
1200      LABEL USING "#,K";INT(X)
1205  NEXT X
1210  CLIP ON
1215  !--- DEFINIR LOS EJES
1220  AXES Xrange,Dy,Xmin,Ymin,1,5
1225  AXES Xrange,Dy,Xmax,Ymax,1,5
1230  GRID 1,Dy*5,Xmin,Ymin
1235  CLIP OFF
1240  !--- EJE VERTICAL
1245  FOR Y=Ymin TO Ymax STEP Dy*5
1250      CSIZE 4
1255      LORG 5
1260      MOVE Xmin-Xrange*.03,Y
1265      LABEL USING "#,K";INT(Y)
1270  NEXT Y
1275  ! Aqui es donde comienza la accion .....
1280  GOSUB Newcurve      ! CARGAR LA PANTALLA Y GRAFICAR LA CURVA
1285  Spin:GDTO Spin      ! LOOP,LOOP,LOOP,LOOP,LOOP
1290  Newcurve:          !-----
1295  IF Or=1 THEN
1300      FOR X=1 TO Np-1
1305          BEEP 305,.2
1310          PLOT W(X),Gd(X)      ! GRAFICAR W(X) VS MAGNITUD
1315      NEXT X
1320  ELSE
1325      FOR X=1 TO Np-1
1330          BEEP 400,.3
1335          PLOT W(X),Gp(X)      ! GRAFICAR W(X) VS FASE
1340      NEXT X
1345  END IF

```

1350 RETURN  
1355! --- ENCABEZADO:  
1360 OUTPUT 2 USING "#,K";C#  
1365 GRAPHICS OFF  
1370 PRINT TAB(10);"\*\*\* RESPUESTA EN FRECUENCIA (SIST.DISCR) \*\*\*"  
1375 PRINT TAB(10);"-----"  
1380 PRINT TAB(5);" Facultad de Estudios Superiores Cuautitlan"  
1385 PRINT RPT#("+",58)  
1390 PRINT  
1395 RETURN  
1400 Exit: !\*\*\*\*\* salida  
1405 OUTPUT 2 USING "#,K";C#  
1410 GRAPHICS OFF  
1415 PRINT TABXY(10,10);"\*\*\* PARA IMPRESION, OPRIMIR";  
1420 PRINT " : [SHIFT] [GRAPHICS] \*\*\*"  
1425 INPUT " 1 = OTRA GRAFICA ; 0 = SALIR A SYSTEM",Gr  
1430 IF Gr<>1 AND Gr<>0 THEN 1405  
1435 IF Gr=1 THEN Grafica  
1440 GCLEAR  
1445 PRINT "REGRESANDO A BASIC SYSTEM"  
1450 END



## 1.11 OPERACION DEL PROGRAMA BODEDISC.

Para operar el programa BODEDISC (respuesta en frecuencia de sistemas discretos), es necesario cargar el programa tecleando la instrucción :

LOAD "BODEDISC" (ENTER)

Posteriormente, presionar la tecla (RUN). A continuación, en la pantalla se pide introducir la siguiente información :

<u>EN LA PANTALLA</u>	<u>TECLEAR</u>
PERIODO DE MUESTREO =	el período de muestreo y ENTER.
GANANCIA =	la ganancia del sistema y ENTER.
ORDEN DEL NUMERADOR =	el orden del numerador y ENTER.
ORDEN DEL DENOMINADOR =	el orden del denominador y ENTER.
) TODO CORRECTO(SI/NO)?	SI o NO Y ENTER.
COEFS.DEL NUMERADOR INICIANDO CON EL TERMINO INDEPENDIENTE ?	valor del coeficiente y ENTER
introduciéndose tantas veces como lo indique el orden del numerador.	
) TODO CORRECTO(SI/NO)?	SI o NO Y ENTER
COEFS.DEL DENOMINADOR INICIANDO CON EL TERMINO INDEPENDIENTE ?	valor del coeficiente y ENTER
introduciéndose tantas veces como lo indique el orden del denominador.	
) TODO CORRECTO(SI/NO)?	SI o NO Y ENTER

Unos segundos después aparecerán en la pantalla los valores de parte real e imaginaria para los polos y ceros encontrados.

Para continuar, se pide oprimir la tecla (CONTINUE)

Acontinuación se pide en la pantalla la siguiente información :

EN LA PANTALLA

TECLEAR

LIMITE DE K :	el valor máximo de ganancia y ENTER
INCREMENTO DE K :	el valor del incremento de la ganancia y ENTER
) TOBO CORRECTO(SI/NO)?	SI o NO Y ENTER
EL NUMERO DE PUNTOS SERA : <u>nnnn</u>	-----0-----
IMPRIMIR LOS PARAMETROS? (SI/NO)	si se desea imprimir, asegurarse de que <u>esté listo el impresor</u> , teclear SI y ENTER. De lo contrario, NO y ENTER

Si la respuesta a esta última pregunta fue SI, entonces en el impresor serán desplegados los parámetros -- del sistema :

ORDEN DEL NUMERADOR N1 = ...

ORDEN DEL DENOMINADOR N2 = ...

COEFS. DEL NUMERADOR EN ORDEN DECRECIENTE :

G(1)=... ; G(2)=... ; ... ; G(N1)

COEFS. DEL DENOMINADOR EN ORDEN DECRECIENTE :

H(1)=... ; H(2)=... ; ... ; H(N2)

Posteriormente, aparecerá en la pantalla una tabla, que muestra los valores de frecuencia, magnitud y fase calculados. Al final de la tabla se muestra la siguiente información :

WMAX = ...

WMIN = ...

GDMAX = ...

GDMIN = ...

GPMAX = ...

GPMIN = ...

en donde: WMAX,WMIN, son frecuencia máxima y mínima.  
 GDMAX,GDMIN, son magnitud máxima y mínima.  
 GPMAX,GPMIN, son fase máxima y mínima.

Para hacer que el programa prosiga, presionar la tecla (CONTINUE).

En seguida se pregunta :

\*\*\* IMPRIMIR LA TABLA (SI/NO)?

Si se desea imprimir la tabla, asegurarse de que el impresor esté listo, después, teclear SI y ENTER.

De lo contrario, teclear NO y ENTER.

Nota: Se recomienda imprimir la tabla, sólo cuando el --- ejercicio sea satisfactorio.

Después se pregunta :

) IMPRIMIR PARAMETROS (SI/NO)?

Si se desea imprimir los parámetros, asegurarse de que el impresor esté listo, después, teclear SI y ENTER.

De lo contrario, teclear NO y ENTER.

Nota: También se recomienda imprimir los parámetros, sólo cuando el ejercicio sea satisfactorio.

Después de lo anterior, se pide presionar la tecla (ENTER) para ver la gráfica, entonces se debe teclear :

1 y (ENTER) para examinar el diagrama de magnitud

o 2 y (ENTER) para examinar el diagrama de fase.

Para continuar, presionar la tecla (CONTINUE), entonces si se desea imprimir la gráfica, primero asegurar se de que el impresor esté listo, después, presionar simultáneamente las teclas :

(SHIFT) (GRAPHICS)

De lo contrario teclear :

1 y ENTER para ver otra gráfica.

o 0 y ENTER para salir del programa y analizar otro sistema, o para cargar otro programa.

## 1.12 EJEMPLOS DE SISTEMAS DISCRETOS.

A continuación se ilustran algunos ejemplos, cuyas funciones de transferencia están dadas por :

1.4)

$$GH(S) = \frac{1.2 (1 + S)}{.242 - 1.242 S + S^2}$$

período de muestreo : T=0.1

1.5)

$$GH(S) = \frac{2(1-S+3S^2)}{2 + 5S - S^2}$$

período de muestreo : T=0.1

1.6)

$$GH(S) = \frac{1.5 (-1 - S + 2S^2 + S^3 + 3S^4)}{-.5 - S + 5S^2}$$

período de muestreo : T=0.3

## EJEMPLO 1.4

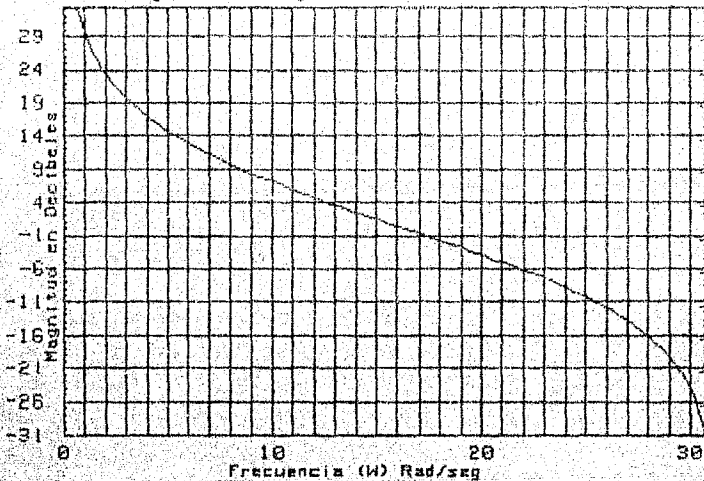
\*\*\*\* DATOS DEL SISTEMA \*\*\*\*

PERIODO DE MUESTREO : .1  
 VALOR DE LA GANANCIA : 1.2  
 ORDEN DEL NUMERADOR : 1  
 ORDEN DEL DENOMINADOR : 2

-----  
 COEFS. DEL NUMERADOR INICIANDO CON EL  
 TERMINO INDEPENDIENTE :  
 C( 0 ) = 1  
 C( 1 ) = 1

-----  
 COEFS. DEL DENOMINADOR INICIANDO CON EL  
 TERMINO INDEPENDIENTE :  
 D( 0 ) = .242  
 D( 1 ) = -1.242  
 D( 2 ) = 1

**Respuesta en Frecuencia**  
 Diagrama de Magnitud (Sist. Discreto)



EJEMPLO 1.4  
 \*\*\* RESPUESTA EN FRECUENCIA (SIST. DISCR) \*\*\*

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES CUAUTITLAN

\*\*\*\*\*

FRECUENCIA	MAGNITUD	FASE
+ .628	+34.03717	-94.74771
+1.257	+27.98548	-99.48567
+1.885	+24.41473	-104.20435
+2.513	+21.84671	-108.89470
+3.142	+19.82053	-113.54826
+3.770	+18.13089	-118.15741
+4.398	+16.66873	-122.71542
+5.027	+15.36935	-127.21654
+5.655	+14.19137	-131.65607
+6.283	+13.10685	-136.03031
+6.912	+12.09611	-140.33654
+7.540	+11.14483	-144.57296
+8.168	+10.24231	-148.73862
+8.796	+9.38034	-152.83331
+9.425	+8.55247	-156.85745
+10.053	+7.75356	-160.81206
+10.681	+6.97940	-164.69858
+11.310	+6.22648	-168.51884
+11.938	+5.49181	-172.27496
+12.566	+4.77277	-175.96927
+13.195	+4.06703	-179.60427
+13.823	+3.37248	-183.18257
+14.451	+2.68713	-186.70684
+15.080	+2.00907	-190.17976
+15.708	+1.33645	-193.60403
+16.336	+ .66742	-196.98231
+16.965	+ .00006	-200.31721
+17.593	- .66758	-203.61129
+18.221	-1.33761	-206.86704
+18.850	-2.01228	-210.08687
+19.478	-2.69409	-213.27311
+20.106	-3.38578	-216.42802
+20.735	-4.09050	-219.55377
+21.363	-4.81184	-222.65244
+21.991	-5.55399	-225.72606
+22.619	-6.32193	-228.77656
+23.248	-7.12165	-231.80581
+23.876	-7.96050	-234.81560
+24.504	-8.84768	-237.80768
+25.133	-9.79492	-240.78373
+25.761	-10.81760	-243.74537
+26.389	-11.93647	-246.69418
+27.018	-13.18056	-249.63169
+27.646	-14.59229	-252.55940
+28.274	-16.23735	-255.47877
+28.903	-18.22570	-258.39124
+29.531	-20.76341	-261.29821
+30.159	-24.31301	-264.20108
+30.788	-30.35026	-267.10122

## EJEMPLO 1.4

\*\*\*\* DATOS DEL SISTEMA \*\*\*\*

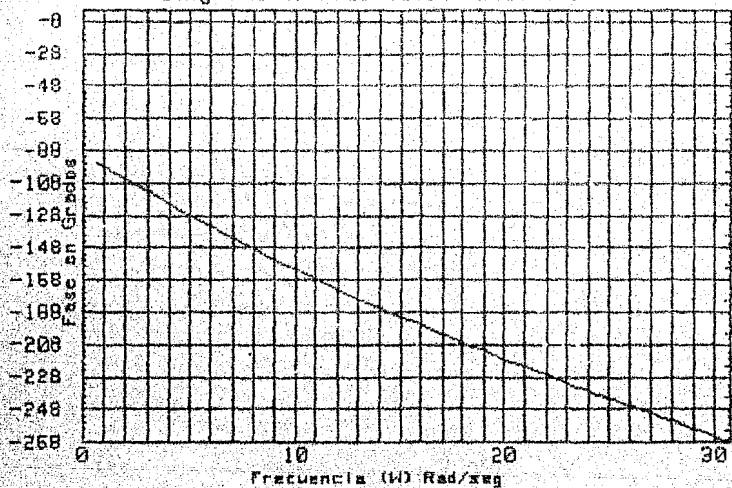
PERIODO DE MUESTREO : .1  
 VALOR DE LA GANANCIA : 1.2  
 ORDEN DEL NUMERADOR : 1  
 ORDEN DEL DENOMINADOR : 2

-----  
 COEFS. DEL NUMERADOR INICIANDO CON EL  
 TERMINO INDEPENDIENTE :  
 $C(0) = 1$   
 $C(1) = 1$

-----  
 COEFS. DEL DENOMINADOR INICIANDO CON EL  
 TERMINO INDEPENDIENTE :  
 $D(0) = .242$   
 $D(1) = -1.242$   
 $D(2) = 1$

### Respuesta en Frecuencia

Diagrama de Fase (Sist. Discreto)



### EJEMPLO 1.5

\*\*\*\* DATOS DEL SISTEMA \*\*\*\*

PERIODO DE MUESTREO : .1  
 VALOR DE LA GANANCIA : 2  
 ORDEN DEL NUMERADOR : 2  
 ORDEN DEL DENOMINADOR : 2

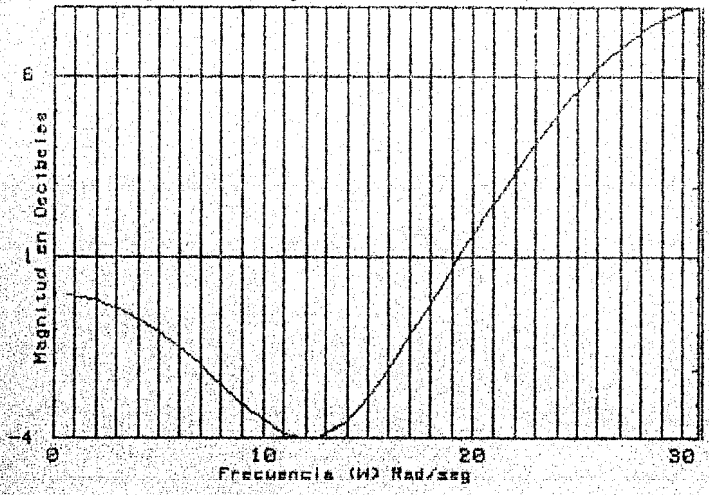
-----  
 COEFS. DEL NUMERADOR INICIANDO CON EL  
 TERMINO INDEPENDIENTE :

C( 0 ) = 1  
 C( 1 ) = -1  
 C( 2 ) = 3

-----  
 COEFS. DEL DENOMINADOR INICIANDO CON EL  
 TERMINO INDEPENDIENTE :

D( 0 ) = 2  
 D( 1 ) = 5  
 D( 2 ) = -1

**Respuesta en Frecuencia**  
 Diagrama de Magnitud (Sist. Discreto)





EJEMPLO 1.5  
 \*\*\* RESPUESTA EN FRECUENCIA (SIST.DISCR) \*\*\*

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES CUAUTITLAN

\*\*\*\*\*

FRECUENCIA	MAGNITUD	FASC
+ .628	- .01666	-175.79785
+1.257	- .06659	-171.58266
+1.885	- .14958	-167.34084
+2.513	- .26520	-163.05767
+3.142	- .41317	-158.71674
+3.770	- .59246	-154.29936
+4.398	- .80207	-149.78403
+5.027	-1.04051	-145.14583
+5.655	-1.30569	-140.35602
+6.283	-1.59471	-135.58177
+6.912	-1.90361	-130.18621
+7.540	-2.22693	-124.72916
+8.168	-2.55730	-118.96888
+8.796	-2.88499	-112.86538
+9.425	-3.19740	-106.38592
+10.053	-3.47903	-99.51300
+10.681	-3.71178	-92.25455
+11.310	-3.87625	-84.65448
+11.938	-3.95398	-75.79989
+12.566	-3.93049	-64.82025
+13.195	-3.79811	-52.87546
+13.823	-3.55764	-39.13408
+14.451	-3.21807	-22.74859
+15.080	-2.79438	-8.23634
+15.708	-2.30449	12.47119
+16.336	-1.76648	26.68583
+16.965	-1.19665	40.48051
+17.593	-.60835	53.83381
+18.221	-.01285	66.71219
+18.850	+.58240	79.07720
+19.478	+1.17128	90.89016
+20.106	+1.74953	102.11492
+20.735	+2.31406	112.71920
+21.363	+2.86259	122.67501
+21.991	+3.39334	132.05857
+22.619	+3.90480	140.94989
+23.248	+4.39555	149.43222
+23.876	+4.86409	157.59133
+24.504	+5.30882	165.41479
+25.133	+5.72788	172.89119
+25.761	+6.11916	179.60931
+26.389	+6.48028	185.75727
+27.018	+6.80862	191.12169
+27.646	+7.10137	195.88691
+28.274	+7.35561	199.43426
+28.903	+7.56849	201.34157
+29.531	+7.73729	202.38291
+30.159	+7.85971	201.52870
+30.788	+7.93393	198.74612

### EJEMPLO 1.5

\*\*\*\* DATOS DEL SISTEMA \*\*\*\*

PERIODO DE MUESTREO : .1  
VALOR DE LA GANANCIA : 2  
ORDEN DEL NUMERADOR : 2  
ORDEN DEL DENOMINADOR : 2

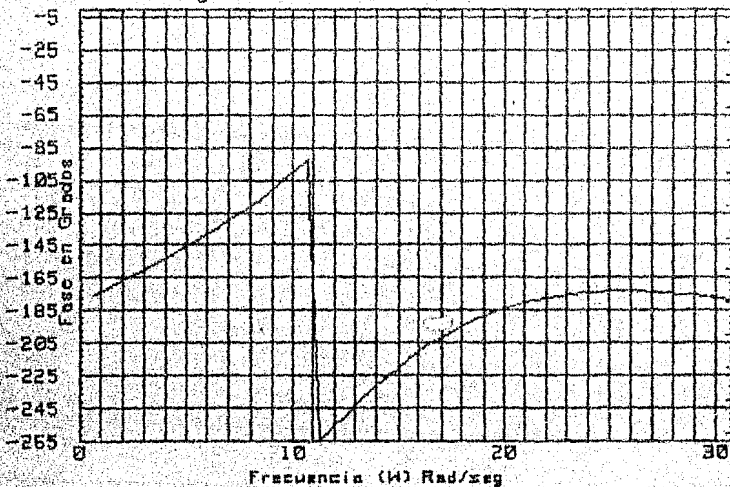
-----  
COEFS. DEL NUMERADOR INICIANDO CON EL  
TERMINO INDEPENDIENTE :

$C(0) = 1$   
 $C(1) = -1$   
 $C(2) = 3$

-----  
COEFS. DEL DENOMINADOR INICIANDO CON EL  
TERMINO INDEPENDIENTE :

$D(0) = 2$   
 $D(1) = 5$   
 $D(2) = -1$

### Respuesta en Frecuencia Diagrama de Fase (Sist. Discreto)



## EJEMPLO 1.6

\*\*\*\* DATOS DEL SISTEMA \*\*\*\*

PERIODO DE MUESTREO : .3  
 VALOR DE LA GANANCIA : 1.5  
 ORDEN DEL NUMERADOR : 4  
 ORDEN DEL DENOMINADOR : 2

-----  
 COEFS. DEL NUMERADOR INICIANDO CON EL  
 TERMINO INDEPENDIENTE :

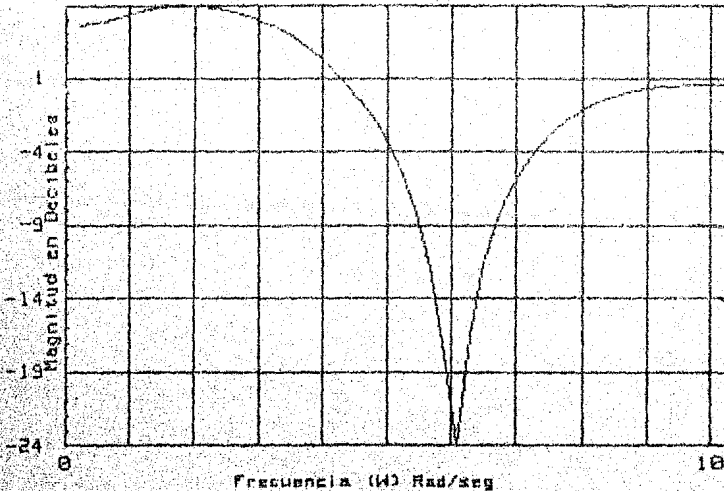
$C(0) = -1$   
 $C(1) = -1$   
 $C(2) = 2$   
 $C(3) = 1$   
 $C(4) = 3$

-----  
 COEFS. DEL DENOMINADOR INICIANDO CON EL  
 TERMINO INDEPENDIENTE :

$D(0) = -.5$   
 $D(1) = -1$   
 $D(2) = 5$

### Respuesta en Frecuencia

Diagrama de Magnitud (Sist. Discreto)



## EJEMPLO 1.6

\*\*\* RESPUESTA EN FRECUENCIA (SIST.DISCR) \*\*\*

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES CUAUTITLAN

\*\*\*\*\*

FRECUENCIA	MAGNITUD	FASE
+ .209	+4.73334	-173.10731
+ .419	+4.07820	-166.47965
+ .628	+5.08967	-160.39179
+ .838	+5.33373	-154.89385
+1.047	+5.57762	-150.01918
+1.257	+5.79495	-145.71569
+1.466	+5.96697	-141.89916
+1.676	+6.08168	-138.47772
+1.885	+6.13209	-135.36577
+2.094	+6.11448	-132.49025
+2.304	+6.02701	-129.79200
+2.513	+5.86863	-127.22498
+2.723	+5.63841	-124.75445
+2.932	+5.33494	-122.35501
+3.142	+4.95596	-120.00894
+3.351	+4.49797	-117.70477
+3.560	+3.95582	-115.43644
+3.770	+3.32217	-113.20279
+3.979	+2.58684	-111.00778
+4.189	+1.73561	-108.86145
+4.398	+ .74858	-106.78231
+4.608	- .40283	-104.80221
+4.817	-1.76100	-102.97671
+5.027	-3.39195	-101.40827
+5.236	-5.40608	-100.30485
+5.445	-8.00744	-100.15591
+5.655	-11.63402	-102.42709
+5.864	-17.42763	-113.96793
+6.074	-23.77131	-184.94228
+6.283	-16.26349	-236.17509
+6.493	-11.41371	-244.17952
+6.702	-8.38463	-245.48893
+6.912	-6.25553	-244.77270
+7.121	-4.65997	-243.15392
+7.330	-3.42072	-241.02540
+7.540	-2.43925	-238.55349
+7.749	-1.65507	-235.81502
+7.959	-1.02818	-232.84522
+8.168	-.53032	-229.65756
+8.378	-.14036	-226.25332
+8.587	+ .15853	-222.62702
+8.796	+ .36054	-218.77015
+9.006	+ .53832	-214.67435
+9.215	+ .64369	-210.33442
+9.425	+ .70793	-205.75154
+9.634	+ .74190	-200.93631
+9.844	+ .75571	-195.91130
+10.053	+ .75832	-190.71250
+10.262	+ .75681	-185.38891

### EJEMPLO 1.6

\*\*\*\* DATOS DEL SISTEMA \*\*\*\*

PERIODO DE MUESTREO : .3  
VALOR DE LA GANANCIA : 1.5  
ORDEN DEL NUMERADOR : 4  
ORDEN DEL DENOMINADOR : 2

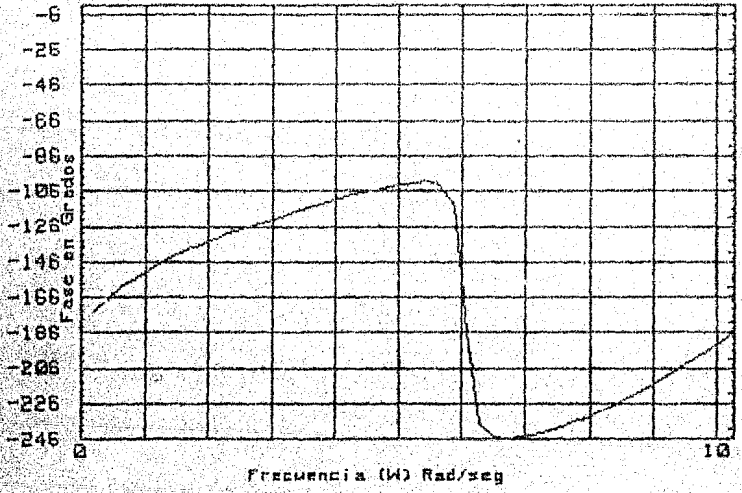
-----  
COEFS. DEL NUMERADOR INICIANDO CON EL  
TERMINO INDEPENDIENTE :

- C( 0 ) = -1
- C( 1 ) = -1
- C( 2 ) = 2
- C( 3 ) = 1
- C( 4 ) = 3

-----  
COEFS. DEL DENOMINADOR INICIANDO CON EL  
TERMINO INDEPENDIENTE :

- D( 0 ) = -.5
- D( 1 ) = -1
- D( 2 ) = 5

**Respuesta en Frecuencia**  
Diagrama de Fase (Sist. Discreto)



# CAPITULO 2

+++++

LUGAR GEOMETRICO DE LAS RAICES  
DE SISTEMAS CONTINUOS Y DISCRETOS  
( ROOT-LOCUS )

+++++

## 2.1 INTRODUCCION.

El lugar geométrico de las raíces (Root-Locus), es el comportamiento que describe la función de transferencia de lazo cerrado, cuando variamos uno o más parámetros de la función de transferencia de lazo abierto, en forma general consideraremos a dicho parámetro la ganancia  $K$ , en el rango de 0 a infinito. La gran ventaja del lugar geométrico, es que nos proporciona información sobre la estabilidad absoluta y relativa del sistema, así como también nos permite realizar cálculos sobre la respuesta en el dominio del tiempo.

Es importante tener en cuenta, que la región de estabilidad para los sistemas continuos es el semiplano izquierdo del plano  $S$ , y para los sistemas discretos es el interior del círculo unitario en el plano  $Z$ .

## 2.2 LUGAR GEOMETRICO PARA SISTEMAS CONTINUOS.

Considerando que la función de transferencia de lazo abierto  $GH_1(S)$  de un sistema continuo, puede ser expresada como :

$$GH_1(S) = \frac{K G(S)}{H(S)} = \frac{K (G_n S^m + G_{n-1} S^{m-1} + \dots + G_0)}{(H_n S^n + H_{n-1} S^{n-1} + \dots + H_0)} \quad (1)$$

donde :  $K$  es la ganancia del sistema;  $G(S)$  y  $H(S)$  son polinomios en  $S$  y  $m \leq n$ .

Entonces, los polos de lazo cerrado son las raíces de la ecuación característica :

$$H(S) + K G(S) = 0 \quad (2)$$

La localización de estas raíces en el plano  $S$ , cambia al variar el valor de  $K$  en la ecuación (2), dándonos el comportamiento en el plano  $S$ .

## 2.3 LUGAR GEOMETRICO PARA SISTEMAS DISCRETOS.

Considerando que la función de transferencia de lazo abierto  $GH(Z)$  de un sistema discreto, puede ser expresada como :

$$GH_1(Z) = \frac{K G(Z)}{H(Z)} = \frac{K (G_m Z^m + G_{m-1} Z^{m-1} + \dots + G_0)}{(H_n Z^n + H_{n-1} Z^{n-1} + \dots + H_0)} \quad (3)$$

donde : K es la ganancia del sistema; G(Z) y H(Z) son polinomios en Z y  $m \leq n$ .

Entonces, los polos de lazo cerrado son las raíces de la ecuación característica :

$$H(Z) + K G(Z) = 0 \quad (4)$$

La localización de estas raíces en el plano Z, cambia al variar el parámetro K en la ecuación (4), dándonos el comportamiento en el plano Z.

#### 2.4 CONSTRUCCION DEL ALGORITMO PARA SISTEMAS CONTINUOS Y DISCRETOS.

El algoritmo por medio del cual se obtiene la gráfica del lugar geométrico de las raíces para un sistema continuo o discreto, se compone de los siguientes bloques :

##### A. BLOQUE DE ENTRADA DEL PRIMER JUEGO DE DATOS.

Dentro de este bloque se introducen los siguientes datos :

- a) Analizar un sistema discreto o un sistema continuo ? ( Respuesta ).
- b) (Nm) Es el número de iteraciones máximo, utilizado en la subrutina "Raíces", para encontrar las raíces de un polinomio (se recomienda utilizar Nm=100 o Nm=200).
- c) (Na) Es el número de cifras de aproximación - (exactitud) con el cual se calcularán las raíces de un polinomio (se recomienda utilizar Na=4).
- d) (N1) Es el orden del polinomio del numerador de GH(S) o GH(Z).
- e) (N2) Es el orden del polinomio del denominador de GH(S) o GH(Z).



- f) (G(Cont1)) Son los valores de los coeficientes del numerador  $G_n, G_{n-1}, \dots, G_0$ , de la función de transferencia.
- g) (H(Cont1)) Son los valores de los coeficientes del denominador  $H_n, H_{n-1}, \dots, H_0$ , de la función de transferencia.

**B. BLOQUE PARA CALCULAR LOS CEROS Y LOS POLOS DEL SISTEMA.**

Para calcular los ceros y los polos del sistema se utiliza la subrutina "Raíces".

La subrutina "Raíces" es una subrutina que calcula las raíces reales y complejas de un polinomio de orden 19 como máximo. Esta, se basa en el método de Doble División Sintética de Newton.

A esta subrutina se entra con los valores de -- los coeficientes del numerador (para los ceros) y -- con los coeficientes del denominador (para los polos). Como resultado, entrega los valores de los ceros: parte real (Ycero) y parte imaginaria (Zcero); y de los polos: parte real (Ypolo) y parte imaginaria (Zpolo).

En caso de que el número de iteraciones (Nm) -- proporcionado en el bloque A, no sea suficiente, en la pantalla aparecerá el mensaje :

EL METODO NO CONVERGE EN : Nm ITERACIONES

Entonces se debe dar otro número de iteraciones mayor.

**C. BLOQUE PARA ENTRADA DEL SEGUNDO JUEGO DE DATOS.**

En este bloque se introducen los siguientes datos :

- a) (Ac) Es el valor máximo de la ganancia del sistema (se recomienda comenzar con valores de  $Ac \leq 10$ ).
- b) (St) Es el valor del incremento de la ganancia durante cada paso del lugar geométrico - (se recomienda comenzar con valores de  $St \geq 1$ ).

#### D. BLOQUE PARA TABULAR EL LUGAR GEOMÉTRICO.

El cálculo de los puntos del lugar geométrico - se realiza con un ciclo iterativo, en donde la variable contador  $K_i$  se utiliza como el valor sucesivo de ganancia, necesario para construir el lugar geométrico de las raíces. Esto es, se calculan sucesivamente las raíces de la ecuación característica:

$$H(S) + K_i G(S) = 0 \quad , \text{ para } K_i=0, St, \dots, Ac$$

donde el incremento de  $K_i$  está dado por el valor de  $St$ .

El cálculo de cada raíz de la ecuación característica para cada valor de  $K_i$ , se efectúa invocando la subrutina "Raíces". Los valores de las raíces se almacenan en los arreglos  $Yr$  y  $Zr$ , para parte real e imaginaria respectivamente.

#### E. BLOQUE PARA ENCONTRAR LOS LÍMITES DE GRAFICACIÓN.

Con este bloque se encuentran los límites máximo y mínimo de graficación :

- a)  $X_{min}, X_{max}$ . Parte real mínima y máxima.
- b)  $Y_{min}, Y_{max}$ . Parte imaginaria mínima y máxima.

Se utiliza una subrutina llamada "Encuentra", -- para realizar esta tarea.

#### F. BLOQUE PARA ENTRADA DEL TERCER JUEGO DE DATOS.

Dentro de este bloque se introducen los datos siguientes :

- a) ( $B_{izq}$ ) Es el primer valor sobre el eje real, considerado de izquierda a derecha, (se usa en la construcción de los ejes de coordenadas).
- b) ( $B_{der}$ ) Es el último valor sobre el eje real, considerado de izquierda a derecha (también se usa en la construcción de los ejes de coordenadas).
- c) ( $Escl$ ) Es un factor que escala todos los pun

tos de la gráfica, vertical y horizontalmente (se recomienda comenzar con Escl=1).

#### G. BLOQUE DE GRAFICACION.

En este bloque se lleva a cabo lo siguiente :

- I) Se inicializa el paquete de graficación --- (instrucción GINIT).
- II) Se define la zona de graficación en la pantalla; se definen, escalan y rotulan los --- ejes de coordenadas.
- III) Si el sistema es discreto, entonces trazar el círculo unitario. De lo contrario, continuar con el punto IV.
- IV) Se inicia un ciclo iterativo para graficar sucesivamente los valores almacenados en -- los arreglos Yr y Zr (parte real y parte -- imaginaria de las raíces), afectados por el factor de escala Escl :

Graficar :  $Yr * Escl$  Vs  $Zr * Escl$

o PLOT  $Yr * Escl, Zr * Escl$

- V) Se cierra el ciclo iterativo abierto en el paso IV

#### H. BLOQUE PARA IMPRESION DE PARAMETROS.

Con este Bloque se obtiene un reporte impreso de los siguientes parámetros :

- a) Orden del Numerador N1
- b) Orden del Denominador N2
- c) Coeficientes del numerador en orden decreciente G(Cont1)
- d) Coeficientes del denominador en orden decreciente H(Cont1)
- e) Ceros del sistema Ycero(Cont1), Zcero(Cont1)
- f) Polos del sistema Ypolo(Cont1), Zpolo(Cont1)
- g) Límite de ganancia Ac
- h) Incremento de ganancia St

#### 2.5 LISTADO DEL PROGRAMA ROOTLOC.

( Ver siguiente página ).

\*\*\* Programa Grafica Root-Locus \*\*\*

```

5  !--- PROGRAMA ROOTLOC LUGAR GEOMETRICO DE LAS RAICES (ROOT-LOCUS)
10 !--- FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES CUAUTITLAN U.N.A.M.
15 !--- ELABORADO COMO TRABAJO DE TESIS POR :
20 !--- SUSTENTANTE : Felipe Zetina Perez
25 !--- ASESOR      : Ing. Nicolas Calva Tapia
30 !--- ELABORADO EN LA UNIDAD DE COMPUTO DE LA F.E.S.C.
35 DIM A(20),B(20),C(20),D(20),E(20),F(20),G(20),H(20),Yr(2000)
40 DIM Zr(2000),A1(2000),Ycero(50),Ypola(50),Zcero(50),Zpola(50)
45 Cr=0
50 Peque=1.0E-24
55 GOSUB 1760
60 INPUT "ANALIZAR UN SISTEMA DISCRETO ? (SI/NO)",Sd$
65 IF Sd$<>"SI" AND Sd$<>"NO" THEN 60
70 PRINT "ANALIZAR UN SISTEMA DISCRETO ? ";Sd$
75 INPUT "NUMERO MAXIMO DE ITERACIONES :",Nm
80 PRINT "NUMERO MAXIMO DE ITERACIONES :";Nm
85 INPUT "NUMERO DE CIFRAS DE APROXIMACION :",Na
90 PRINT "CIFRAS DE APROXIMACION :";Na
95 INPUT "ORDEN DEL POLINOMIO DEL NUMERADOR",N1
100 PRINT "ORDEN DEL POLINOMIO DEL NUMERADOR";N1
105 INPUT "ORDEN DEL POLINOMIO DEL DENOMINADOR",N2
110 PRINT "ORDEN DEL POLINOMIO DEL DENOMINADOR";N2
115 INPUT "> TODO CORRECTO ? (SI/NO)",R$
120 IF R$<>"SI" AND R$<>"NO" THEN 115
125 IF R$="NO" THEN 55
130 IF N2=0 THEN 55
135 GOSUB 1760
140 N=N1
145 M=N1+1
150 PRINT "INTRODUCIR COEFS. DEL NUMER. EN ORDEN DECRECIENTE : "
155 FOR Cont1=1 TO M
160     INPUT G(Cont1)
165     PRINT "G(";Cont1;)"=";G(Cont1),
170     IF G(Cont1)=0 THEN G(Cont1)=Peque
175 NEXT Cont1
180 PRINT
185 N=N2
190 M=N2+1
195 PRINT "INTRODUCIR COEFS. DEL DENOMIN. EN ORDEN DECRECIENTE : "
200 FOR Cont1=1 TO M
205     INPUT H(Cont1)
210     PRINT "H(";Cont1;)"=";H(Cont1),
215     IF H(Cont1)=0 THEN H(Cont1)=Peque
220 NEXT Cont1
225 INPUT "> TODO CORRECTO ? (SI/NO)",R$
230 IF R$<>"SI" AND R$<>"NO" THEN 225
235 IF R$="NO" THEN 135
240 PRINT CHR$(12)
245 !--- CALCULO DE LOS CEROS
250 N=N1
255 M=N1+1
260 IF N1=0 THEN 335
265 FOR Cont1=1 TO M

```

```

270     A(Cont1)=G(Cont1)
275 NEXT Cont1
280 GOSUB Raices
285 GOSUB 1760
290 PRINT "--- CEROS ENCONTRADOS ---"
295 Cont3=0
300 FOR Cont1=1 TO N1
305     PRINT USING "#,2(SDDD.DDDDD)";Yr(Cont1),Zr(Cont1)
310     PRINT " j"
315     Cont3=Cont3+1
320     Ycero(Cont3)=Yr(Cont1)
325     Zcero(Cont3)=Zr(Cont1)
330 NEXT Cont1
335 !--- CALCULO DE LOS POLOS
340 N=N2
345 M=N+1
350 FOR Cont1=1 TO M
355     A(Cont1)=H(Cont1)
360 NEXT Cont1
365 GOSUB Raices
370 PRINT "--- POLOS ENCONTRADOS ---"
375 Cont4=0
380 FOR Cont2=(N1+1) TO (N2+N1)
385     PRINT USING "#,2(SDDDD.DDDDD)";Yr(Cont2),Zr(Cont2)
390     PRINT " j"
395     Cont4=Cont4+1
400     Zpolo(Cont4)=Zr(Cont2)
405     Ypolo(Cont4)=Yr(Cont2)
410 NEXT Cont2
415 PRINT TABXY(10,21);"*** PARA CONTINUAR OPRIMIR [CONTINUE] ***"
420 PAUSE
425 !--- LIMITES DE K
430 GOSUB 1760
435 INPUT "LIMITE DE K :";Ac
440 PRINT "LIMITE DE K :";Ac
445 INPUT "INCREMENTO DE K :";St
450 PRINT "INCREMENTO DE K :";St
455 INPUT "> TODO CORRECTO ? (SI/NO)";R#
460 IF R#<>"SI" AND R#<>"NO" THEN 455
465 IF R#="NO" THEN 430
470 PRINT "EL NUMERO DE PUNTOS SERA :";INT((Ac/St*N2)+N2)
475 INPUT "IMPRIMIR LOS PARAMETROS ? (SI/NO)";Ip#
480 IF Ip#<>"SI" AND Ip#<>"NO" THEN 475
485 IF Ip#="NO" THEN 495
490 GOSUB Imparam
495 PRINT TABXY(10,12);"*** CALCULANDO EL LUGAR GEOMETRICO ***"
500 !--- TABULA EL LUGAR GEOMETRICO
505 FOR Ki=0 TO Ac STEP St
510     FOR I=1 TO N2+1
515         L1=I-N2+N1
520         IF L1<0 THEN L1=0
525         A(I)=Ki*B(L1)+H(I)
530     NEXT I
535     N=N2

```

```

540      M=N+1
545      GOSUB Raices
550      NEXT K1
555 !--- DESPLIEGA TABLA Y RANGOS EN PANTALLA
560      N3=N1+N2
565      N4=(Ac/St+1)*N2
570      FOR Q=1 TO N4
575          PRINT USING "XXXX,2(SDDD.DDDDD),XXX,DDDD";Yr(Q);Zr(Q);Q
580      NEXT Q
585      GOSUB Grafica !GOTO GRAFICA *****
590      INPUT " > OTRA ESCALA ? (SI/NO)",Pr#
595      IF Pr#<>"SI" AND Pr#<>"NO" THEN 590
600      IF Pr#="NO" THEN 615
605      Otra=1
610      GOTO 1070
615      GRAPHICS OFF
620      OUTPUT 2 USING "#,K";CHR#(255);"K"
625      ALPHA ON
630      PRINT TABXY(10,10);"*** PARA IMPRIMIR GRAFICA OPRIMIR";
635      PRINT " : [SHIFT] [GRAPHICS] ***"
640      PRINT TAB(18);"*** PARA CONTINUAR OPRIMIR [CONTINUE] ***"
645      PAUSE
650      GOTO 1800
655 Raices: !CALCULO DE LAS RAICES
660      Ng=N
665      FOR T=0 TO 20
670          B(T)=0
675          C(T)=0
680          D(T)=0
685          E(T)=0
690          F(T)=0
695      NEXT T
700      IF (Ng<1)+(Ng>20) THEN 1800
705      Ap=10^(-Na)
710      Nr=0
715      LOOP
720          Nr=Nr+1
725      EXIT IF Nr>Ng
730          X=0
735          W=1
740          L=0
745          LOOP
750              L=L+1
755          EXIT IF L>Nm
760              B(1)=A(1)
765              E(1)=D(1)
770              FOR I=2 TO M
775                  P=X*B(I-1)-W*E(I-1)+A(I)
780                  Q=X*E(I-1)+W*B(I-1)+D(I)
785                  B(I)=P
790                  E(I)=Q
795              NEXT I
800              C(1)=B(1)

```

```

805      F(I)=E(I)
810      FOR I=2 TO N
815          P=B(I)+X*C(I-1)-F(I-1)*W
820          Q=E(I)+X*F(I-1)+C(I-1)*W
825          C(I)=P
830          F(I)=Q
835      NEXT I
840      Y=X-(B(M)*C(N)+E(M)*F(N))/(C(N)^2+F(N)^2)
845      Z=W-(E(M)*C(N)-B(M)*F(N))/(C(N)^2+F(N)^2)
850      R=X-Y
855      S=W-Z
860      Deni=SQR(Y^2+Z^2)
865      IF Deni=0 THEN Deni=Peque
870      Re1=SQR(R^2+S^2)/Deni
875      IF Re1<=Ap THEN 915
880      X=Y
885      W=Z
890  END LOOP
895  PRINT "EL METODO NO CONVERGE EN ";Nm;" ITERACIONES."
900  PRINT TAB(16); "*** PARA CONTINUAR OPRIMIR [CONTINUE]"
905  PAUSE
910  GOTO 1800
915  Cr=Cr+1
920  Yr(Cr)=Y
925  Zr(Cr)=Z
930  PRINT TABXY(12,13); "CALCULANDO PUNTO --> ";Cr
935  FOR I=2 TO N
940      A(I)=B(I)
945      D(I)=E(I)
950  NEXT I
955  N=N-1
960  M=M-1
965  END LOOP
970  RETURN
975 Grafica: ! BLOQUE DE GRAFICACION
980  FOR Q=1 TO N4
985      A1(Q)=Yr(Q)
990  NEXT Q
995  GOSUB Encuentra
1000  Xmax=Ls
1005  Xmin=Li
1010  FOR Q=1 TO N4
1015      A1(Q)=Zr(Q)
1020  NEXT Q
1025  GOSUB Encuentra
1030  Ymax=Ls
1035  Ymin=Li
1040  PRINT "Real Min=";Xmin,"Real Max=";Xmax
1045  PRINT "Imag Min=";Ymin,"Imag Max=";Ymax
1050  INPUT "BORDE IZQUIERDO (ver Real Min)=";Bizq
1055  PRINT "BORDE IZQUIERDO :";Bizq
1060  INPUT "BORDE DERECHO (ver Real Max) =";Bder
1065  PRINT "BORDE DERECHO :";Bder
1070  INPUT " ESCALA=";Escl

```

```

1075 IF Esc1<=0 THEN 1070
1080 OUTPUT 2 USING "#,K";CHR$(255)&"K"
1085 GINIT
1090 GRAPHICS ON
1095!--- ROTULAR: ENCABEZADO Y EJES
1100 CSIZE 6
1105 LORG 6
1110 Xgmax=100*MAX(1,RATIO)
1115 Ygmax=100*MAX(1,1/RATIO)
1120 FOR I=-.25 TO .25 STEP .1
1125     MOVE Xgmax/2+I,Ygmax
1130     LABEL "Lugar Geometrico de Las Raices"
1135 NEXT I
1140 CSIZE 5
1145 MOVE Xgmax/2,Ygmax-4.5
1150 IF Sd$="SI" THEN
1155     LABEL "( Sistema Discreto ) Escala :";Esc1
1160 ELSE
1165     LABEL "( Sistema Continuo ) Escala :";Esc1
1170 END IF
1175 DEG
1180 LDIR 90
1185 CSIZE 3.5
1190 LORG 4
1195 MOVE 0,Ygmax/2
1200 LABEL "Parte Imaginaria"
1205 LDIR 0
1210 MOVE Xgmax/2,.07*Ygmax
1215 LABEL "Parte Real"
1220!--- DEFINIR ZONA DE GRAFICACION
1225 VIEWPORT 10,120,15,90
1230 FRAME
1235 LORG 5
1240 CSIZE 5
1245 Ymin=-2
1250 Ymax=2
1255 IF Sd$="NO" THEN
1260     WINDOW Bizq,Bder,Ymin*1.1,Ymax*1.1
1265 ELSE
1270     SHOW Bizq,Bder,Ymin*1.1,Ymax*1.1
1275     Ist=1+ABS(Ymax/Bizq)-.2
1280 END IF
1285 AXES 1,.2,0,0,5,5,3
1290 GRID 1,1,0,0
1295!--- COLOCAR LOS VALORES DE LOS EJES
1300 CLIP OFF
1305 FOR X=INT(Bizq-Ist) TO INT(Bder+Ist)
1310     CSIZE 4
1315     LORG 6
1320     MOVE X,Ymin*1.1
1325     LABEL USING "#,K";X
1330 NEXT X
1335 LORG 2
1340 IF Sd$="NO" THEN 1360

```



```

1345 MOVE 0,0
1350 POLYGON 1,150
1355 LORG 8
1360 CLIP OFF
1365 FOR Y=INT(Ymin)-1 TO INT(Ymax)+1
1370     CSIZE 4
1375     MOVE Bder+.2+Ist,Y
1380     LABEL USING "#,K";Y
1385 NEXT Y
1390 CSIZE 4.1,1 !--- COLOCA LOS CEROS Y POLOS DEL SISTEMA
1395 CLIP ON
1400 LORG 5
1405 FOR Cont1=1 TO N1
1410     MOVE Yr(Cont1)*Esc1,Zr(Cont1)*Esc1
1415     LABEL "0"
1420 NEXT Cont1
1425 FOR Cont1=(N1+1) TO (N2+N1)
1430     MOVE Yr(Cont1)*Esc1,Zr(Cont1)*Esc1
1435     LABEL "X"
1440 NEXT Cont1
1445 !--- GRAFICA EL LUGAR GEOMERICO
1450 CSIZE 2
1455 FOR Q=N3+1 TO N4
1460     PLOT Yr(Q)*Esc1,Zr(Q)*Esc1
1465     LABEL "*"
1470     BEEP 250,.05
1475 NEXT Q
1480 IF Otr=1 THEN 590
1485 RETURN
1490 Encuentra: ! ENCONTRAR MAXIMO Y MINIMO
1495 Ls=-1.E+300
1500 Li=1.E+300
1505 FOR Q=1 TO N4-1
1510     IF A1(Q)>A1(Q+1) THEN 1530
1515     IF A1(Q)<Li THEN Li=A1(Q)
1520     IF A1(Q+1)>Ls THEN Ls=A1(Q+1)
1525     GOTO 1540
1530     IF A1(Q)>Ls THEN Ls=A1(Q)
1535     IF A1(Q+1)<Li THEN Li=A1(Q+1)
1540 NEXT Q
1545 RETURN
1550 Imparam: ! IMPRIMIR PARAMETROS
1555 PRINTER IS PR1
1560 PRINT TAB(8);RPT$("*",47)
1565 PRINT TAB(8);"***** FACULTAD DE ESTUDIOS";
1570 PRINT " SUPERIDRES CUAUTITLAN *****"
1575 PRINT TAB(8);RPT$("*",47)
1580 PRINT
1585 PRINT TAB(8);"ORDEN DEL NUMERADOR N1=";N1
1590 PRINT TAB(8);"ORDEN DEL DENOMINADOR N2=";N2
1595 PRINT TAB(8);RPT$("~",50)
1600 PRINT TAB(8);"COEFS. DEL NUMER. EN ORDEN DECRECIENTE :";
1605 PRINT TAB(8);"";
1610 FOR Cont1=1 TO N1+1

```

```

1615     PRINT "G(";Cont1;")=";G(Cont1);"; ";
1620 NEXT Cont1
1625 PRINT
1630 PRINT TAB(8);"COEFS. DEL DENOMIN. EN ORDEN DECRECIENTE : "
1635 PRINT TAB(8);"";
1640 FOR Cont1=1 TO N2+1
1645     PRINT "H(";Cont1;")=";H(Cont1);"; ";
1650 NEXT Cont1
1655 PRINT
1660 PRINT TAB(8);RPT#("-",50)
1665 PRINT TAB(8);"CEROS ENCONTRADOS : "
1670 FOR Cont1=1 TO Cont3
1675     PRINT USING "5X,#,3X,SDDD.DDDD";Ycero(Cont1)
1680     PRINT USING "#,3X,SDDD.DDDD";Zcero(Cont1)
1685     PRINT "j"
1690 NEXT Cont1
1695 PRINT TAB(8);"POLOS ENCONTRADOS : "
1700 FOR Cont1=1 TO Cont4
1705     PRINT USING "5X,#,3X,SDDD.DDDD";Ypolo(Cont1)
1710     PRINT USING "#,3X,SDDD.DDDD";Zpolo(Cont1)
1715     PRINT "j"
1720 NEXT Cont1
1725 PRINT TAB(8);RPT#("-",50)
1730 PRINT TAB(8);"LIMITE DE K :";Ac;"INCREMENTO DE K :";St
1735 PRINT TAB(8);RPT#("-",50)
1740 PRINT
1745 PRINT
1750 PRINTER IS CRT
1755 RETURN
1760 !--- ENCABEZADO Y BORRAR PANTALLA
1765 OUTPUT 2 USING "#,K";CHR$(255)&"K"
1770 PRINT TAB(10);"---- LUGAR GEOMETRICO DE LAS RAICES";
1775 PRINT " (ROOT-LOCUS) ----"
1780 PRINT TAB(15);"---- F.E.S. CUAUTITLAN U.N.A.M. ----"
1785 PRINT
1790 GCLEAR
1795 RETURN
1800 !--- TERMINAR EL PROGRAMA
1805 GCLEAR
1810 GOSUB 1760
1815 PRINT "***** FIN DEL PROGRAMA *****"
1820 END

```

## 2.6 OPERACION DEL PROGRAMA ROOTLOC.

Para operar el programa ROOTLOC (lugar geométrico de las raíces), es necesario cargar el programa tecleando la instrucción :

LOAD "ROOTLOC" (ENTER)

Posteriormente, presionar la tecla (RUN). A continuación, en la pantalla se pide introducir la siguiente información :

EN LA PANTALLA

TECLEAR

ANALIZAR UN SISTEMA DISCRETO? (SI/NO)	SI o NO y ENTER
NUMERO MAXIMO DE ITERACIONES:	el número máximo de iteraciones para el cálculo de las raíces.
NUMERO DE CIFRAS DE APROXIMACION :	el número de cifras de aproximación para el máximo error en el cálculo de las raíces.
ORDEN DEL POLINOMIO DEL NUMERADOR :	el orden del numerador.
ORDEN DEL POLINOMIO DEL DENOMINADOR :	el orden del denominador (mayor o igual que el del numerador).
) TODO CORRECTO?(SI/NO)	SI o NO y ENTER
INTRODUCIR COEFS. DEL NUMERADOR EN ORDEN DECRECIENTE ; ?	el valor del coeficiente de mayor orden y ENTER
esta operación se repite dependiendo del orden del numerador.	
INTRODUCIR COEFS. DEL DENOMINADOR EN ORDEN DECRECIENTE ; ?	el valor del coeficien-

	te de mayor orden y ENTER
Esta operación se repite dependiendo del orden del denominador.	
) TODO CORRECTO?(SI/NO)	SI o NO y ENTER
<p>A continuación, en la pantalla aparecen los valores de los ceros y polos encontrados :</p> <p>CEROS ENCONTRADOS :</p> <p>+nnn.nnnn +nnn.nnnn j . . .</p> <p>POLOS ENCONTRADOS :</p> <p>+nnn.nnnn +nnn.nnnn j . . .</p>	

Para continuar, presionar la tecla (CONTINUE). Después, en la pantalla se pide introducir la siguiente información :

EN LA PANTALLA

TECLEAR

LIMITE DE K :	el valor máximo de ganancia y ENTER
INCREMENTO DE K :	el valor del incremento de ganancia durante cada iteración y ENTER
) TODO CORRECTO?(SI/NO)	SI o NO y ENTER

Después en la pantalla aparece, durante el tiempo en el que se están calculando las raíces el siguiente mensaje :

\*\*\* CALCULANDO EL LUGAR GEOMETRICO \*\*\*

CALCULANDO PUNTO --> ....

Después de algunos segundos o minutos, aparece en la pantalla, una tabla con los valores de: parte real, parte imaginaria y el número de punto calculado.

Posteriormente, aparecen en la pantalla los valores mínimos y máximos siguientes :

Real Min = ...                      Real Max = ...

Imag Min = ...                      Imag Max = ...

en donde: Real Min, Real Max, son parte real mínima y máxima; Imag Min, Imag Max, son parte imaginaria mínima y máxima.

A continuación se pide introducir la siguiente información :

EN LA PANTALLA

TECLEAR

BORDE IZQUIERDO (ver Real Min)	el número entero más -- aproximado al valor del Real Min y ENTER
BORDE DERECHO (ver Real Max)	el número entero más -- aproximado al valor del Real Max y ENTER
ESCALA =	el valor del factor de escala (se recomienda -- comenzar con 1).

Después, aparecerá en la pantalla la gráfica mostrando el lugar geométrico de las raíces.

En la parte inferior izquierda de la gráfica se pregunta :

) OTRA ESCALA ? (SI/NO)

Si se desea aplicar una escala diferente a la establecida con anterioridad, teclear SI y ENTER. Esta operación se puede repetir cualquier número de ocasiones.

Si no se desea aplicar otra escala, teclear NO y ENTER. Entonces, si se desea "Imprimir la Gráfica", verificar que el impresor esté listo y presionar simultánea-

mente las teclas :

(SHIFT) (GRAPHICS)

Después de la impresión de la gráfica, aparecerá en la pantalla el mensaje :

\*\*\*\*\* FIN DEL PROGRAMA \*\*\*\*\*

En este punto, se puede volver a correr el programa presionando la tecla (RUN), o se puede cargar un programa diferente.

## 2.7 EJEMPLOS PARA SISTEMAS CONTINUOS Y DISCRETOS.

A continuación se ilustran algunos ejemplos, cuyas funciones de transferencia están dadas por :

$$2.1) \quad GH_1(s) = \frac{K(S^2 + 6S + 6.75)}{(S^3 + 5S^2 + 4S)}$$

para :  $K_{max}=70$ ;  $\Delta K=0.4$

$$2.2) \quad GH_1(s) = \frac{K}{(S^3 + 6.5S^2 + 13S + 5)}$$

para :  $K_{max}=10$ ;  $\Delta K=0.5$

$$2.3) \quad GH_1(s) = \frac{K}{(S^4 + 4S^3 + 6S^2 + 4S)}$$

para :  $K_{max}=3$ ;  $\Delta K=0.2$

$$2.4) \quad GH_1(s) = \frac{.368S + .2657}{S^2 - 1.368S + .368} \quad , \quad \text{para: } K_{max}=35; \Delta K=.2$$

### EJEMPLO 2.1

\*\*\*\*\*  
 \*\*\*\*\* FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES CUAUTITLAN \*\*\*\*\*  
 \*\*\*\*\*

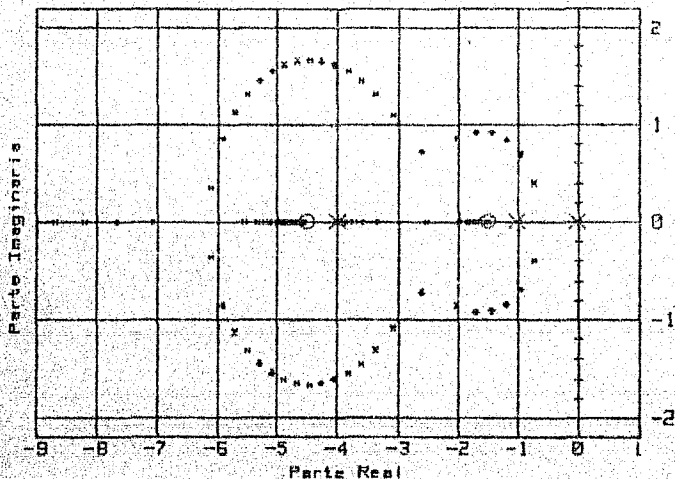
ORDEN DEL NUMERADOR N1= 2  
 ORDEN DEL DENOMINADOR N2= 3

COEFS. DEL NUMER. EN ORDEN DECRECIENTE :  
 G( 1 )= 1 ; G( 2 )= 6 ; G( 3 )= 6.75 ;  
 COEFS. DEL DENOMIN. EN ORDEN DECRECIENTE :  
 H( 1 )= 1 ; H( 2 )= 5 ; H( 3 )= 4 ; H( 4 )= 1.E-24 ;

CEROS ENCONTRADOS :  
 -1.5000      -0.0000j  
 -4.5000      +0.0000j  
 POLDS ENCONTRADOS :  
 -0.0000      +0.0000j  
 -1.0000      -0.0000j  
 -4.0000      -0.0000j

LIMITE DE K : 70      INCREMENTO DE K : .4

**Lugar Geometrico de Las Raices**  
 ( Sistema Continuo ) Escala : 1



## EJEMPLO 2.2

\*\*\*\*\*  
 \*\*\*\*\* FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES CUAUTITLAN \*\*\*\*\*  
 \*\*\*\*\*

ORDEN DEL NUMERADOR N1= 0

ORDEN DEL DENOMINADOR N2= 3

-----  
 COEFS. DEL NUMER. EN ORDEN DECRECIENTE :

G( 1 )= 1 ;

COEFS. DEL DENOMIN. EN ORDEN DECRECIENTE :

H( 1 )= 1 ; H( 2 )= 6.5 ; H( 3 )= 13 ; H( 4 )= 5 ;

-----  
 CEROS ENCONTRADOS :

POLOS ENCONTRADOS :

    -.5000        +0.0000j

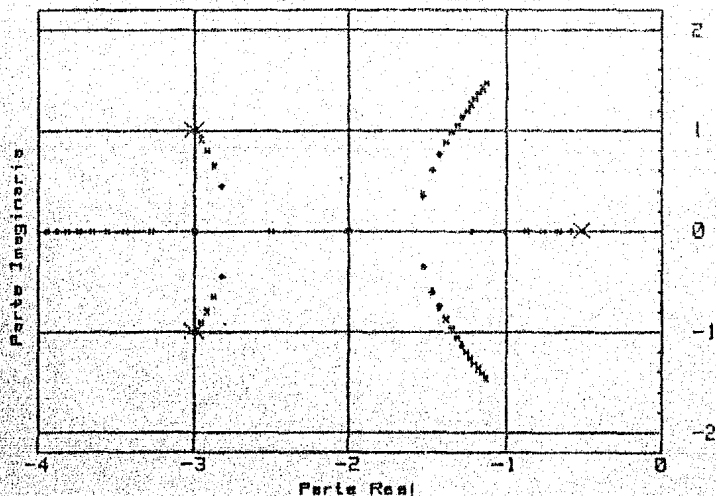
   -3.0000       +1.0000j

   -3.0000       -1.0000j

-----  
 LIMITE DE K : 10

INCREMENTO DE K : .5

### Lugar Geometrico de Las Raices ( Sistema Continuo ) Escala : 1



-3



EJEMPLO 2.3

\*\*\*\*\*  
 \*\*\*\*\* FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES CUAUTITLAN \*\*\*\*\*  
 \*\*\*\*\*

ORDEN DEL NUMERADOR N1= 0  
 ORDEN DEL DENOMINADOR N2= 4

-----  
 COEFS. DEL NUMER. EN ORDEN DECRECIENTE :

G( 1 )= 1 :

COEFS. DEL DENOMIN. EN ORDEN DECRECIENTE :

H( 1 )= 1 ; H( 2 )= 4 ; H( 3 )= 6 ; H( 4 )= 4 ; H( 5 )= 1.E-24 ;

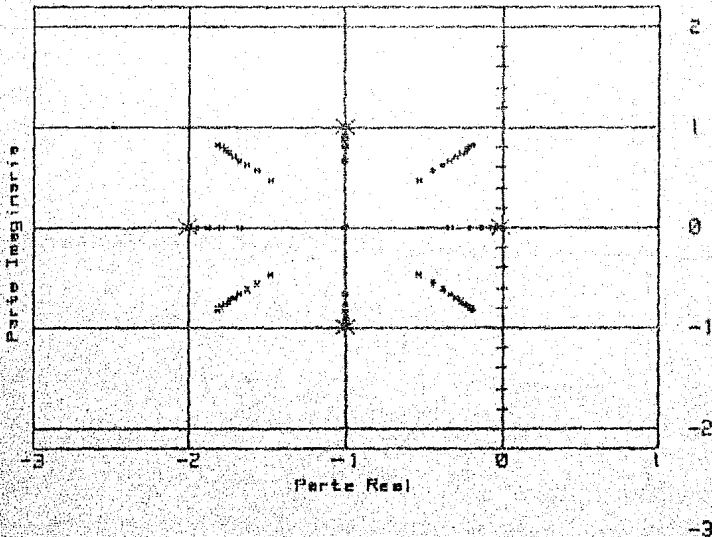
-----  
 CEROS ENCONTRADOS :

POLOS ENCONTRADOS :

-0.0000	+0.0000j
-1.0000	+1.0000j
-1.0000	-1.0000j
-2.0000	-0.0000j

-----  
 LIMITE DE K : 3                      INCREMENTO DE K : .2  
 -----

**Lugar Geometrico de Las Raices**  
 ( Sistema Continuo ) Escala : 1



### EJEMPLO 2.4

\*\*\*\*\* FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES CUAUTITLAN \*\*\*\*\*  
\*\*\*\*\*

ORDEN DEL NUMERADOR N1= 1  
ORDEN DEL DENOMINADOR N2= 2

COEFS. DEL NUMER. EN ORDEN DECRECIENTE :  
G( 1 )= .368 ; G( 2 )= .2657 ;

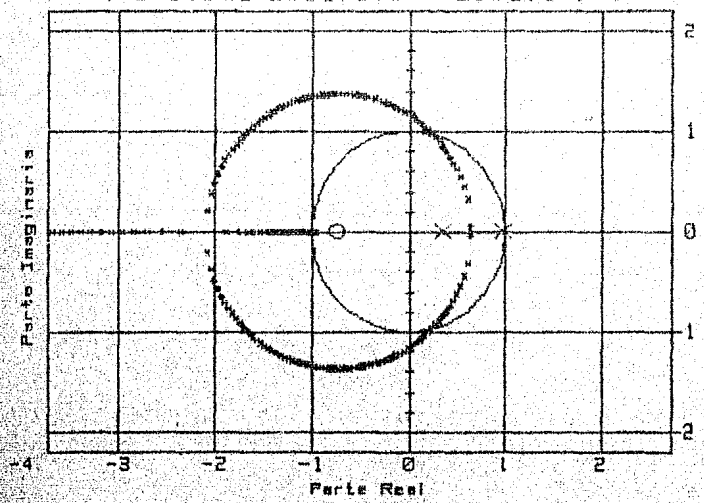
COEFS. DEL DENOMIN. EN ORDEN DECRECIENTE :  
H( 1 )= 1 ; H( 2 )=-1.368 ; H( 3 )= .368 ;

CEROS ENCONTRADOS :  
-.7220 +0.0000j

POLOS ENCONTRADOS :  
+.3680 -0.0000j  
+1.0000 -0.0000j

LIMITE DE K : 35            INCREMENTO DE K : .2

### Lugar Geometrico de Las Raices ( Sistema Discreto ) Escala : 1



CAPITULO 3  
+++++  
GRAFICAS DE NYQUIST PARA  
SISTEMAS CONTINUOS Y DISCRETOS  
+++++

### 3.1 INTRODUCCION.

En este capítulo, se presenta el criterio de Nyquist ó gráfica de Nyquist para analizar la estabilidad de sistemas continuos y discretos en el dominio de la frecuencia.

La gráfica de Nyquist, también llamada traza polar, consiste en la representación en coordenadas rectangulares o polares del lugar geométrico de la función de transferencia, en el rango de frecuencias :

$$-\infty \leq w \leq \infty$$

esto es, graficando la parte real  $X(w)$  contra la parte imaginaria  $Y(w)$ , de la función de transferencia ó la magnitud y el ángulo de la función de transferencia, se obtiene la representación de la gráfica de Nyquist, la cual se muestra en la figura 3.1 :

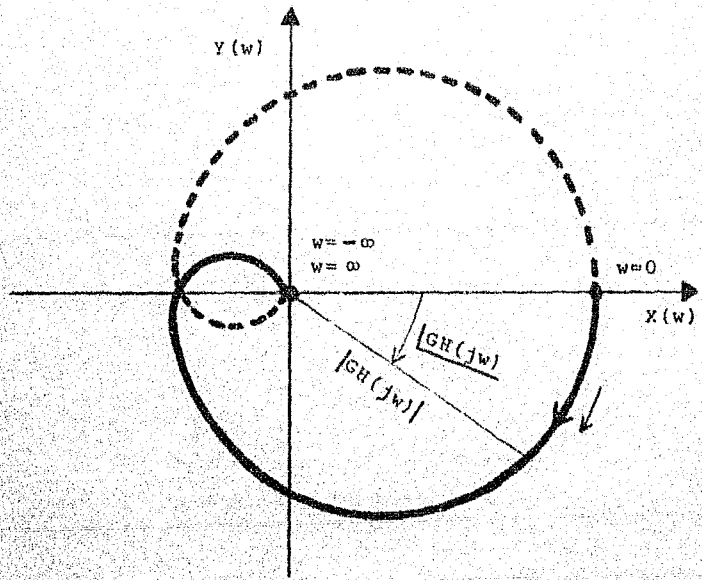


Figura 3.1 representación de la gráfica de Nyquist.

## 3.2 GRÁFICA DE NYQUIST PARA SISTEMAS CONTINUOS

Definiendo la función de transferencia de lazo abierto de un sistema continuo, evaluada para  $S=jw$  como:

$$GH(jw) = \frac{K \prod_{i=1}^m (jw + Z_i)}{\prod_{q=1}^n (jw + P_q)} \quad (1)$$

en donde:  $m \leq n$ ;  $K$  es la ganancia del sistema;  $Z_1, Z_2, \dots, Z_m$  los ceros;  $P_1, P_2, \dots, P_n$  los polos y  $w$  la frecuencia.

Entonces, se pueden calcular las partes real  $X(w)$  e imaginaria  $Y(w)$  de  $GH(jw)$ , procediendo de la siguiente forma:

Desarrollando la multiplicatoria del numerador de (1):

$$K(jw + Z_1) (jw + Z_2) \dots (jw + Z_m) = K (A + jB) \quad (2)$$

se genera una parte real  $A$  y una parte imaginaria  $B$ .

De la misma forma para el denominador, se tiene que:

$$(jw + P_1) (jw + P_2) \dots (jw + P_n) = C + jD \quad (3)$$

se genera una parte real  $C$  y una parte imaginaria  $D$ .

Posteriormente se realiza el cociente de (2) y (3):

$$GH(jw) = \frac{K (A + jB)}{C + jD} = K (X + jY) \quad (4)$$

en donde,  $X$  es la parte real y  $Y$  la parte imaginaria -- de  $GH(jw)$ .

Por lo tanto, al evaluar :

$$((X(w) + jY(w)) K$$

tomando como parámetro la frecuencia  $w$ , se obtienen los puntos que constituyen la gráfica de Nyquist de un sistema continuo.

### 3.3 GRAFICA DE NYQUIST PARA SISTEMAS DISCRETOS.

Dada la función de transferencia de lazo abierto de un sistema discreto como:

$$GH(Z) = \frac{K \prod_{j=1}^m (z + z_j)}{\prod_{q=1}^n (z + p_q)} \quad (5)$$

y transformándola al dominio de la frecuencia por la relación:  $Z = e^{j\omega T}$ , se tiene que:

$$GH(e^{j\omega T}) = \frac{K \prod_{i=1}^m (e^{j\omega T} + z_i)}{\prod_{q=1}^n (e^{j\omega T} + p_q)} \quad (6)$$

en donde:  $m \leq n$ ;  $e^{j\omega T} = \cos \omega T + j \sin \omega T$ ;  $\omega$  la frecuencia en rad/seg y  $T$  el período de muestreo en seg.

Ahora, para encontrar la parte real  $X(\omega)$  e imaginaria  $Y(\omega)$  de  $GH(Z)$  se procede de la siguiente forma:

Se desarrolla la multiplicatoria del numerador de (6):

$$K(e^{j\omega T} + z_1)(e^{j\omega T} + z_2) \dots (e^{j\omega T} + z_m) = K(A + jB) \quad (7)$$

dándonos una parte real  $A$  y una parte imaginaria  $B$ .

De la misma forma para el denominador se tiene:

$$(e^{j\omega T} + p_1)(e^{j\omega T} + p_2) \dots (e^{j\omega T} + p_n) = C + jD \quad (8)$$

Posteriormente, se realiza el cociente de (7) y (8):

$$GH(e^{j\omega T}) = \frac{K(A + jB)}{C + jD} = K(X + jY) \quad (9)$$

en donde:  $X$  es la parte real y  $Y$  la parte imaginaria de  $GH(e^{j\omega T})$ .

Por lo tanto, al evaluar :

$$((X(w) + jy(w)) K$$

tomando como parámetro la frecuencia  $w$ , se obtienen los puntos que constituyen la gráfica de Nyquist de un sistema discreto.

### 3.4 ESTABILIDAD RELATIVA.

La utilidad de un sistema de control, depende del grado de estabilidad que tenga. Esto es, no basta que sea estable, sino que debe serlo en cierta medida. Para determinar el grado o medida de estabilidad de un sistema se puede aplicar la gráfica de respuesta en frecuencia de Nyquist.

En la figura 3.2, se muestran las gráficas de respuesta de un sistema para diferentes valores de ganancia  $K$ .

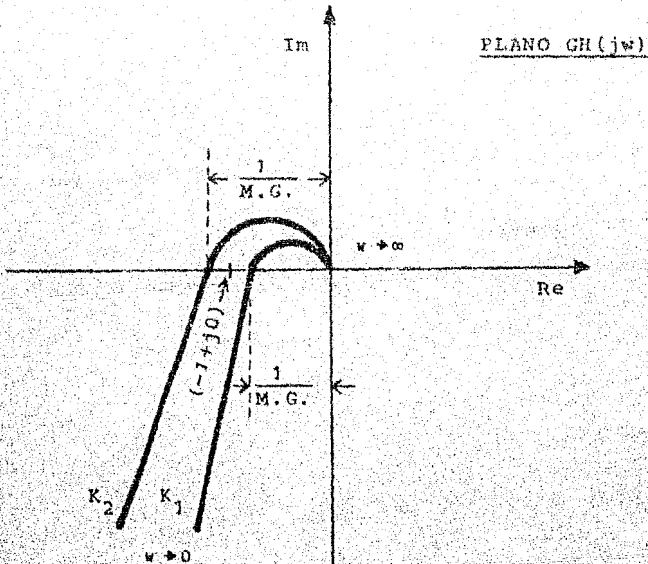


Figura 3.2 Gráficas de Nyquist para diferentes valores de  $K$ .

En general, cuanto más se acerque la gráfica de  $GH(j\omega)$  al punto crítico  $(-1+j0)$ , la respuesta del sistema se hace más oscilatoria. De esta manera, se puede emplear la distancia entre el lugar geométrico de la función y el punto  $(-1+j0)$  como una medida de la estabilidad relativa del sistema. Esta distancia se expresa en términos del margen de ganancia y de fase.

MARGEN DE GANANCIA.

El margen de ganancia (M.G.) se define, como el recíproco de  $GH(j\omega)$  cuando el ángulo de fase es de  $-180^\circ$ . Denotándose con  $\omega_\pi$ , la frecuencia a la cual ocurre el corte del eje real negativo, se tiene:

$$M.G. = \frac{1}{|GH(j\omega_\pi)|}$$

que expresado en decibeles queda como :

$$M.G. = 20 \log \frac{1}{|GH(j\omega_\pi)|} \quad (db)$$

cuando  $|GH(j\omega)| < 1$ , el margen de ganancia es positivo y se puede interpretar como la ganancia mínimo adicional que hace inestable al sistema. En caso contrario, cuando  $|GH(j\omega)| > 1$ , el margen de ganancia es negativo y se interpreta como la ganancia mínima, que se debe reducir para llevar al sistema al margen de la estabilidad. En la figura 3.2, se puede ver el margen de ganancia, nótese que para un sistema estable, corresponde un margen de ganancia positivo.

MARGEN DE FASE.

El margen de fase (M.F.) se define, como el ángulo que hay entre el eje real negativo y el lugar geométrico de la función cuando su magnitud es unitaria. La frecuencia a la cual ocurre, se denota por  $\omega_1$ .

El margen de fase se designa por  $\gamma$  siendo  $\gamma = 180^\circ + \phi$ . En la figura 3.3, se puede observar el margen de fase, tanto para un sistema estable como para uno inestable. Para el primero corresponde un margen de fase ( $\gamma > 0$ ) y para el segundo un margen de fase negativo ( $\gamma < 0$ ).



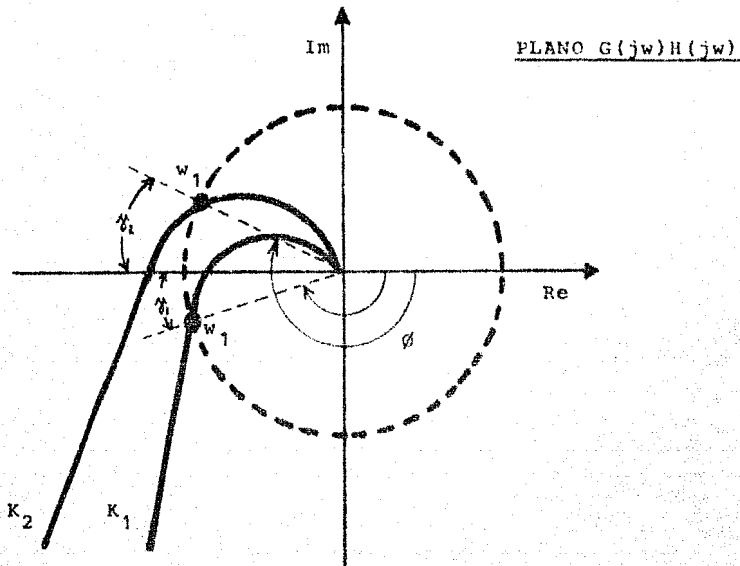


Figura 3.3 Gráficas de Nyquist para ilustrar el margen de fase.

### 3.5 CONSTRUCCION DEL ALGORITMO.

El algoritmo por medio del cual se obtiene la gráfica de Nyquist para sistemas continuos y discretos se compone de los siguientes bloques :

#### A. BLOQUE DE ENTRADA DEL PRIMER JUEGO DE DATOS.

Dentro de este bloque se introducen los siguientes datos:

- a) Analizar un sistema discreto o continuo (respuesta).
- b) Si el sistema es discreto, introducir el valor del período de muestreo ( $T_m$ ).

- c) (Nm) Es el número máximo de iteraciones - utilizado en la subrutina "Raíces", para encontrar las raíces de un polinomio (se recomienda utilizar Nm=100 ó Nm=200).
- d) (Na) Es el número de cifras de aproximación (exactitud) con el cual se calcularán las raíces de un polinomio (se recomienda utilizar Na=4).
- e) (N1) Es el orden del polinomio del numerador de GH(S) o GH(Z).
- f) (N2) Es el orden del polinomio del denominador de GH(S) o GH(Z).
- g) G(Cont1) Son los valores de los coeficientes del numerador:  $G_m, G_{m-1}, \dots, G_0$ ; en GH(S) o GH(Z).
- h) H(Cont1) Son los valores de los coeficientes del denominador:  $H_n, H_{n-1}, \dots, H_0$ ; en GH(S) o GH(Z).

#### B. BLOQUE PARA EL CALCULO DE LOS CEROS Y POLOS DEL SISTEMA.

Para calcular los polos y ceros del sistema, se utiliza la subrutina "Raíces".

La subrutina "Raíces", es una subrutina que calcula las raíces reales y complejas de un polinomio de orden 19 como máximo. Se basa en el método de Doble División Sintética de Newton.

A esta subrutina se entra con los valores de los coeficientes del numerador (para los ceros) y con los coeficientes del denominador (para los polos). Como resultado, entrega los valores de los ceros: parte real (Ycero) y parte imaginaria (Zcero); y de los polos: parte real (Ypolo) y parte imaginaria (Zpolo).

En caso de que el número de iteraciones (Nm) proporcionado en el bloque A, no sea suficiente, en la pantalla aparecerá el mensaje :

EL METODO NO CONVERGE EN : Nm ITERACIONES.

Entonces se debe dar un valor de Nm mas grande.

### C. BLOQUE PARA ENTRADA DEL SEGUNDO JUEGO DE DATOS.

En este bloque se introducen los siguientes datos :

- a) ( $I_w$ ) Es el valor de frecuencia con el que se desea iniciar el cálculo de los puntos de la gráfica de Nyquist.
- b) ( $W_n$ ) Es el valor de frecuencia máximo para el cálculo de los puntos de la gráfica de Nyquist.
- c) ( $D_w$ ) Es el incremento de frecuencia para el cálculo de los puntos de la gráfica de Nyquist.
- d) ( $T_h$ ) Es el valor de  $\theta$  (segundos) del término  $e^{-\theta s}$ , que representa el tiempo de retardo, o tiempo muerto de un sistema continuo.
- e) ( $K$ ) Es el valor de la ganancia del sistema.

### D. BLOQUE PARA TABULAR LOS VALORES DE LAS PARTES REAL E IMAGINARIA DE $GH(j\omega)$ O $GH(Z)$ .

Dentro de este bloque se tabulan los valores de las partes real ( $P_{real}(\text{Punto})$ ) e imaginaria ( $P_{imag}(\text{Punto})$ ) de  $GH(j\omega)$  o  $GH(Z)$ , cumpliendo la secuencia siguiente :

- I) Se da un valor inicial a la variable Punto, como apuntador del punto calculado.
- II) Se inicia un ciclo iterativo cuya variable - contador ( $P_r$ ) indica el valor de la frecuencia para el cual se están calculando los valores  $P_{real}$  y  $P_{imag}$ . La condición inicial es el valor introducido en  $I_w$ , el incremento en  $D_w$  y el valor final el introducido para  $W_n$ .
- III) Se incrementa en una unidad el valor del apuntador (Punto) del punto calculado.
- IV) Si el sistema es discreto, se introduce el término  $e^{j\omega T}$ , en la siguiente forma :

$$\text{como } e^{j\omega T} = \cos \omega T + j \text{sen } \omega T$$

entonces :

Fac1 = COS(WT) representa el factor de transformación para la parte real, y :

Fac2 = SIN(WT) representa el factor de transformación de la parte imaginaria; continuar - en el paso VI.

De lo contrario, continuar con el paso V.

V) Se realizan las siguientes asignaciones:

Fac1 = 0 para el término de transformación de las partes reales, en las multiplicatorias

y Fac2 = Fr para el término de transformación de las partes imaginarias, en las multiplicatorias.

VI) Paso para calcular la multiplicatoria de los términos del numerador. Este paso utiliza la subrutina "Mult", para realizar los productos entre números complejos.

VI.1 Si el sistema es discreto, tomar los valores de la parte real y la parte imaginaria (Ycero (1) y Zcero(1)) del primer cero, aplicarle -- los factores obtenidos en el paso IV :

$$Nreal = Fac1 - Ycero(1)$$

$$Nimag = Fac2 - Zcero(1)$$

Iniciar un ciclo iterativo para asignar los - valores de las partes real e imaginaria (Ycero, Zcero) de los ceros, a partir del segundo cero. Con estos valores se entra a la subrutina "Mult". La subrutina "Mult" entrega el - valor de la parte real (Nreal) y la imaginaria (Nimag) correspondientes a la multiplicatoria del numerador.

Continuar con el paso VII.

VI.2 Si el sistema es continuo, tomar los valores del término correspondiente al retardo e <sup>-θs</sup>:

$$N_{\text{real}} = \cos (Fr \theta)$$

$$N_{\text{imag}} = -\text{sen} (Fr \theta)$$

donde :  $\theta = Th$

Iniciar un ciclo iterativo para asignar los valores de las partes real e imaginaria -- (Ycero, Zcero) de los ceros, partiendo del segundo cero. Con estos valores se entra a la subrutina "Mult". La subrutina "Mult", - entrega el valor de la parte real (Nreal) y la imaginaria (Nimag) correspondientes a la multiplicatoria del numerador.

- VII) Paso para calcular la multiplicatoria de los términos del denominador. Este paso utiliza la subrutina "Mult", para realizar productos entre números complejos.

Se toman los valores de la parte real y parte imaginaria (Ypolo(1), Zpolo(1)) del primer polo, aplicándoles los factores obtenidos en el paso IV :

$$N_{\text{real}} = \text{Fac1} \cdot Y_{\text{polo}}(1)$$

$$N_{\text{imag}} = \text{Fac2} \cdot Z_{\text{polo}}(1)$$

- VIII) Iniciar un ciclo iterativo para asignar los valores de las partes real e imaginaria --- (Ypolo, Zpolo) de los polos, a partir del segundo polo. Con estos valores se entra a la subrutina "Mult". Esta entrega el valor de la parte real (Nreal) y la imaginaria (Nimag) correspondientes a la multiplicatoria del denominador.

- IX) Cálculo del cociente de la multiplicatoria del numerador, obtenida en los pasos VI al VI.2, y la multiplicatoria del denominador obtenida en los pasos VII al VIII.

- IX.1 Si el orden del numerador es cero, sólo considerar el término correspondiente al retardo  $e^{-\theta_s}$ , como parte de la multiplicatoria del numerador :

$$N_{\text{real}} = \cos (Fr \theta)$$

$$N_{\text{imag}} = -\text{sen} (Fr \theta)$$

Con estos valores y los obtenidos en el paso VI.1, se realiza el producto entre la multiplicatoria del numerador y el conjugado de la multiplicatoria del denominador.

En las variables Num1 y Num2, se almacenan los valores de las partes real e imaginaria del producto anterior.

Continuar con el paso X.

IX.2 Si el orden del numerador es diferente de cero, realizar el producto entre la multiplicatoria del numerador obtenida en los puntos VI al VI.2, y el conjugado de la multiplicatoria del denominador obtenida en los puntos VII y VIII. En las variables Num1 y Num2, se almacenan los valores de las partes real e imaginaria del producto anterior.

X) Calcular el producto de la multiplicatoria del denominador con su conjugado y almacenar el resultado en la variable Deno.

XI) Calcular por separado, el cociente de los valores Num1 y Num2, obtenidos en los pasos IX.1 ó IX.2, con el valor de la variable Deno obtenido en el punto X.

El resultado de estos cocientes, se almacena respectivamente en los arreglos Preal(Punto) y Pimag(Punto), siendo :

Preal el valor de la parte real resultante calculado para el actual valor de frecuencia; Pimag el valor de la parte imaginaria resultante calculado para el actual valor de frecuencia; Punto el apuntador del punto calculado.

Estos valores son los que se utilizan en el bloque H, para desplegar la gráfica.

XII) Cerrar el ciclo iniciado en el paso II.

#### E. BLOQUE PARA CALCULAR LOS MARGENES DE GANANCIA Y FASE.

Dentro de este bloque se calculan los márgenes de ganancia y fase. Para ello se utiliza una subrutina llamada "Margen".

La subrutina "Margen", se estructuró según las relaciones siguientes :

$$M.G. = \frac{1}{|G(jw_{\pi}) H(jw_{\pi})|}$$

en donde: M.G. es el margen de ganancia y  $w_{\pi}$  es la frecuencia de cruce de ganancia.

$$M.F. = 180^{\circ} + \angle G(jw_1) H(jw_1)$$

en donde: M.F. es el margen de fase y  $w_1$  es la frecuencia de cruce de fase.

#### F. BLOQUE PARA ENCONTRAR LOS LIMITES DE GRAFICACION.

Con este bloque se encuentran los límites máximos y mínimos de graficación :

- a)  $X_{min}, X_{max}$ . Parte real mínima y máxima.
- b)  $Y_{min}, Y_{max}$ . Parte imaginaria mínima y máxima.

Se utiliza la subrutina "Encuentra" para llevar a cabo esta tarea.

#### G. BLOQUE DE ENTRADA DEL TERCER JUEGO DE DATOS.

Dentro de este bloque se introducen los siguientes datos :

- a) Borde izquierdo (Bizq). Es el primer valor sobre el eje real, considerado de izquierda a derecha (se utiliza en la construcción de los ejes de coordenadas).
- b) Borde derecho (Bder). Es el último valor sobre el eje real, considerado de izquierda a derecha (se usa en la construcción de los ejes de coordenadas).
- c) Borde superior (Bsup). Es el último valor sobre el eje imaginario, considerado de abajo hacia arriba (se usa en la construcción de los ejes de coordenadas).

H. BLOQUE PARA DESPLEGAR GRAFICA.

En este bloque se lleva a cabo lo siguiente:

- I) Se inicializa el paquete de graficación (instrucción GINIT).
- II) Se define la zona de graficación en la pantalla; se definen, escalan y rotulan los ejes de coordenadas.
- III) Se marca con una "X" el punto de coordenadas (-1,0).
- IV) Se inicia un ciclo iterativo para graficar - sucesivamente los valores almacenados en los arreglos Preal y Pimag, encontrados en el bloque D :

Graficar : Preal Vs Pimag

ó PLOT Preal(Q), Pimag(Q)

donde: Q= 1, 2, ..., Punto

- V) Se cierra el ciclo abierto en el paso IV.
- VI) Se inicia un ciclo iterativo para graficar - la "imagen" de la gráfica de Nyquist :

Graficar : Preal Vs Pimag

ó PLOT Preal(Q), -Pimag(Q)

donde: Q= Punto, Punto-1, ..., 1

- VII) Se cierra el ciclo abierto en el punto VI.
- VIII) Se pregunta si se desea obtener la gráfica de Nyquist, para otro valor de ganancia K.  
En caso afirmativo, regresar al bloque C.e.  
En caso afirmativo, continuar.

IX) BLOQUE PARA IMPRESION DE PARAMETROS.

Con este bloque se obtiene un reporte impreso de los siguientes Parámetros :



- a) Orden del numerador.
- b) Orden del denominador.
- c) Coeficientes del numerador en orden decreciente.
- d) Coeficientes del denominador en orden decreciente.
- e) Ceros del sistema.
- f) Polos del sistema.
- g) Valores de los márgenes de ganancia y fase para los diferentes valores de  $K$  :

Mgn1, Mfs1

Mgn2, Mfs2

Mgn3, Mfs3

- h) Valores de ganancia  $K$  ( $K_1, K_2, K_3$ ).
- i) Rango de valores de frecuencia (frecuencia máxima, mínima y su incremento).

### 3.6 LISTADO DEL PROGRAMA NYQUIST.

(Ver la siguiente página)

\*\*\* Programa Grafica de Nyquist \*\*\*

```

5  !--- PROGRAMA NYQUIST. ANALISIS DE ESTABILIDAD
10 !--- POR EL CRITERIO DE NYQUIST
15 !--- FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES CUAUTITLAN U.N.A.M.
20 !--- ELABORADO COMO TRABAJO DE TESIS POR :
25 !--- SUSTENTANTE : Felipe Zetina Perez
30 !--- ASESOR      : Ing. Nicolas Calva Tapia
35 !--- ELABORADO EN LA UNIDAD DE COMPUTO DE LA F.E.S.C.
40  GINIT
45  DIM A(20),B(20),C(20),D(20),E(20),F(20),G(20),H(20),Yr(200)
50  DIM Zr(200),A1(2000),Ycero(50),Ypolo(50),Zcero(50),Zpolo(50)
55  DIM Re(50),Im(50),Freal(2000),Pimag(2000)
60  Radi=180/PI
65  Cr=0
70  Kcont=0
75  Peque=1.0E-24
80  GOSUB 2515
85  INPUT "ANALIZAR UN SISTEMA DISCRETO ? (SI/NO)",Sd$
90  IF Sd$<>"SI" AND Sd$<>"NO" THEN 85
95  PRINT "ANALIZAR UN SISTEMA DISCRETO ? ";Sd$
100 IF Sd$="NO" THEN 120
105 INPUT "INSTANTE DE MUESTREO :",Tm
110 PRINT "INSTANTE DE MUESTREO :";Tm
115 Wn=PI/Tm
120 INPUT "NUMERO MAXIMO DE ITERACIONES :",Nm
125 PRINT "NUMERO MAXIMO DE ITERACIONES :";Nm
130 INPUT "NUMERO DE CIFRAS DE APROXIMACION :",Na
135 PRINT "CIFRAS DE APROXIMACION :";Na
140 INPUT "ORDEN DEL POLINOMIO DEL NUMERADOR",N1
145 PRINT "ORDEN DEL POLINOMIO DEL NUMERADOR";N1
150 INPUT "ORDEN DEL POLINOMIO DEL DENOMINADOR",N2
155 PRINT "ORDEN DEL POLINOMIO DEL DENOMINADOR";N2
160 INPUT "> TODO CORRECTO ? (SI/NO)",R$
165 IF R$<>"SI" AND R$<>"NO" THEN 160
170 IF R$="NO" THEN 80
175 IF N2=0 THEN 80
180 GOSUB 2515
185 N=N1
190 M=N1+1
195 PRINT "INTRODUCIR COEFS. DEL NUMER. EN ORDEN DECRECIENTE :"
200 FOR Cont1=1 TO M
205   INPUT G(Cont1)
210   PRINT "G(;"Cont1;)"=";G(Cont1),
215   IF G(Cont1)=0 THEN G(Cont1)=Peque
220 NEXT Cont1
225 PRINT
230 N=N2
235 M=N2+1
240 PRINT "INTRODUCIR COEFS. DEL DENOMIN. EN ORDEN DECRECIENTE : "
245 FOR Cont1=1 TO M
250   INPUT H(Cont1)
255   PRINT "H(;"Cont1;)"=";H(Cont1),
260   IF H(Cont1)=0 THEN H(Cont1)=Peque
265 NEXT Cont1

```

```

270 INPUT "> TODO CORRECTO ? (SI/NO)",R#
275 IF R#<>"SI" AND R#<>"NO" THEN 270
280 IF R#="NO" THEN 180
285 PRINT
290 !--- CALCULO DE LOS CEROS
295 N=N1
300 M=N1+1
305 IF N1=0 THEN 380
310 FOR Cont1=1 TO M
315 A(Cont1)=G(Cont1)
320 NEXT Cont1
325 GOSUB Raices
330 GOSUB 2515
335 PRINT "--- CEROS ENCONTRADOS ---"
340 Cont3=0
345 FOR Cont1=1 TO N1
350 PRINT USING "#,2(SDDD.DDD)";Yr(Cont1),Zr(Cont1)
355 PRINT " j"
360 Cont3=Cont3+1
365 Ycero(Cont3)=Yr(Cont1)
370 Zcero(Cont3)=Zr(Cont1)
375 NEXT Cont1
380 !--- CALCULO DE LOS POLOS
385 N=N2
390 M=N+1
395 FOR Cont1=1 TO M
400 A(Cont1)=H(Cont1)
405 NEXT Cont1
410 GOSUB Raices
415 PRINT "--- POLOS ENCONTRADOS ---"
420 Cont4=0
425 FOR Cont2=(N1+1) TO (N2+N1)
430 PRINT USING "#,2(SDDDD.DDD)";Yr(Cont2),Zr(Cont2)
435 PRINT " j"
440 Cont4=Cont4+1
445 Zpolo(Cont4)=Zr(Cont2)
450 Ypolo(Cont4)=Yr(Cont2)
455 NEXT Cont2
460 PRINT TABXY(10,16);"** PARA CONTINUAR OPRIMIR [CONTINUE] **"
465 PAUSE
470 !--- LIMITES DE Wn
475 GOSUB 2515
480 INPUT "LIMITE INFERIOR DE Wn:",Iw
485 PRINT "LIMITE INFERIOR DE Wn";Iw
490 IF Sd#="NO" THEN
495 INPUT "LIMITE SUPERIOR DE Wn : ",Wn
500 PRINT "LIMITE DE Wn: ";Wn
505 ELSE
510 END IF
515 INPUT "INCREMENTO DE Wn: ",Dw
520 PRINT "INCREMENTO DE Wn: ";Dw
525 INPUT "VALOR DE TETHA : ",Th
530 PRINT "VALOR DE TETHA : ";Th
535 INPUT "VALOR DE K : ";Kg

```

```

540 PRINT "VALOR DE K :";Kg
545 INPUT "> TODO CORRECTO ? (SI/NO)",R#
550 IF R#(">SI" AND R#(">NO" THEN 545
555 IF R#="NO" THEN 475
560 RAD
565 Kcont=Kcont+1
570 Kap(Kcont)=Kg
575 PRINT TABXY(10,18);"*** CALCULANDO TRAYECT. DE NYQUIST ***"
580 !--- TABULA LA TRAYECTORIA DE NYQUIST
585 Punto=0
590 FOR Fr=Iw TO Wn STEP Dw
595 Punto=Punto+1
600 IF Sd#="SI" THEN
605 Fac1=COS(Fr*Tm)
610 Fac2=SIN(Fr*Tm)
615 ELSE
620 Fac1=0
625 Fac2=Fr
630 END IF
635 !--- MULTIPLICATORIA DEL NUMERADOR
640 IF Sd#="SI" THEN
645 Nreal=Fac1-Ycero(1)
650 Nimag=Fac2-Zcero(1)
655 Lim=N1
660 FOR Q=2 TO N1
665 Re(Q)=Fac1-Ycero(Q)
670 Im(Q)=Fac2-Zcero(Q)
675 NEXT Q
680 GOSUB Mult
685 ELSE
690 Nreal=COS(Fr*Th*PI)
695 Nimag=-SIN(Fr*Th*PI)
700 Lim=N1
705 FOR Q=2 TO N1
710 Re(Q)=Fac1-Yzero(Q)
715 Im(Q)=Fac2-Zcero(Q)
720 NEXT Q
725 GOSUB Mult
730 END IF
735 Numre=Nreal
740 Numim=Nimag
745 !--- MULTIPLICATORIA DEL DENOMINADOR
750 Nreal=Fac1-Ypolo(1)
755 Nimag=Fac2-Zpolo(1)
760 Lim=N2
765 FOR Q=2 TO N2
770 Re(Q)=Fac1-Ypolo(Q)
775 Im(Q)=Fac2-Zpolo(Q)
780 NEXT Q
785 GOSUB Mult
790 Denre=Nreal
795 Denim=Nimag
800 !--- CALCULO DEL COCIENTE
805 IF N1=0 THEN

```

```

810      Nreal=COS(Fr*Th*PI)
815      Nimag=-SIN(Fr*Th*PI)
820      Re(2)=Denre
825      Im(2)=-Denim
830      Lim=2
835      GOSUB Mult
840      Num1=Nreal
845      Num2=Nimag
850      ELSE
855      Nreal=Numre
860      Nimag=Numim
865      Lim=2
870      Re(2)=Denre
875      Im(2)=-Denim
880      GOSUB Mult
885      Num1=Nreal
890      Num2=Nimag
895      END IF
900      Deno=(Denre^2)+(Denim^2)
905      IF Deno=0 THEN Deno=Peque
910      Preal(Punto)=Num1*Kg/Deno
915      Pimag(Punto)=Num2*Kg/Deno
920      PRINT TABXY(20,16);Fr,Punto
925      NEXT Fr
930 !--- ENCUESTRA EL MARGEN DE GANANCIA Y FASE
935      GOSUB Margen
940      Mgn(Kcont)=Mgan
945      Mfs(Kcont)=Mfase
950      INPUT "IMPRIMIR LOS PARAMETROS ? (SI/NO) ",Ip$
955      IF Ip$(">")"SI" AND Ip$("<")"NO" THEN 950
960      IF Ip$="NO" THEN 970
965      GOSUB Imparam
970 !--- DESPLIEGA TABLA Y RANGOS EN PANTALLA
975      FOR Q=1 TO Punto
980          PRINT USING "XXX,2(XXX,SDDD.DDD)";Preal(Q);Pimag(Q)
985      NEXT Q
990      GOSUB Grafica !GOTO GRAFICA *****
995      PAUSE
1000     GRAPHICS OFF
1005     INPUT "GRAFICAR PARA OTRA K ? (SI/NO)",Pr$
1010     IF Pr$(">")"SI" AND Pr$("<")"NO" THEN 1005
1015     IF Pr$="SI" THEN S35
1020     OUTPUT 2 USING "#,K";CHR$(255);"K"
1025     GRAPHICS OFF
1030     PRINT TABXY(10,10);"*** PARA IMPRIMIR GRAFICA OPRIMIR";
1035     PRINT " : [SHIFT] [GRAPHICS] ***"
1040     Etiqueta
1045     PRINT TAB(18);"*** PARA CONTINUAR OPRIMIR [CONTINUE] ***"
1050     PAUSE
1055     GOSUB Imprtab
1060     GOTO 2560
1065 Margen: !--- RUTINA MARGEN DE GANANCIA Y FASE
1070     Limite=1.E-8

```

```

1075 FOR Q=1 TO Punto
1080     IF ABS(Pimag(Q))<=Limite THEN 1105
1085 NEXT Q
1090 Limite=Limite*10
1095 IF Limite>=1.E+0 THEN 1170 !NO CRUZA EL EJE IMAG
1100 GOTO 1075
1105 IF Preal(Q)=0 THEN Preal(Q)=Peque
1110 Mgan=ABS(1/Preal(Q))
1115 Limite=1.E-8
1120 FOR Q=1 TO Punto
1125     Mag=SQR(Preal(Q)^2+Pimag(Q)^2)
1130     IF ABS(1-Mag)<=Limite THEN 1155
1135 NEXT Q
1140 Limite=Limite*10
1145 IF Limite>=1.E+0 THEN 1180 !NO SE ACERCA AL CIRC. UNIT.
1150 GOTO 1120
1155 IF Preal(Q)=0 THEN Preal(Q)=Peque
1160 Mfase=ATN(Pimag(Q)/Preal(Q))*Radi
1165 RETURN
1170 Mgan=1.E+3
1175 RETURN
1180 Mfase=1.E+3
1185 RETURN
1190!---- CALCULO DE LAS RAICES --Metodo, Doble Division Sintetica NR-
1195 Raices:!-------
1200 Ng=N
1205 FOR T=0 TO 20
1210     B(T)=0
1215     C(T)=0
1220     D(T)=0
1225     E(T)=0
1230     F(T)=0
1235 NEXT T
1240 IF (Ng<1)+(Ng>20) THEN 2560
1245 Ap=10^(-Na)
1250!
1255 Nr=0
1260 LOOP
1265 Nr=Nr+1
1270 EXIT IF Nr>Ng
1275 X=0
1280 W=1
1285 L=0
1290 LOOP
1295 L=L+1
1300 EXIT IF L>Nm
1305 B(1)=A(1)
1310 E(1)=D(1)
1315 FOR I=2 TO M
1320     P=X*B(I-1)-W*E(I-1)+A(I)
1325     Q=X*E(I-1)+W*B(I-1)+D(I)
1330     B(I)=P
1335     E(I)=Q
1340 NEXT I

```

```

1345      C(1)=B(1)
1350      F(1)=E(1)
1355      FOR I=2 TO N
1360          P=B(I)+X*C(I-1)-F(I-1)*W
1365          Q=E(I)+X*F(I-1)+C(I-1)*W
1370          C(I)=P
1375          F(I)=Q
1380      NEXT I
1385      Y=X-(B(M)*C(N)+E(M)*F(N))/(C(N)^2+F(N)^2)
1390      Z=W-(E(M)*C(N)-B(M)*F(N))/(C(N)^2+F(N)^2)
1395      R=X-Y
1400      S=W-Z
1405      Deni=SQR(Y^2+Z^2)
1410      IF Deni=0 THEN Deni=Peque
1415      Re1=SQR(R^2+S^2)/Deni
1420      IF Re1<=Ap THEN 1460
1425      X=Y
1430      W=Z
1435      END LOOP
1440      PRINT "EL METODO NO CONVERGE EN :";Nm;" ITERACIONES."
1445      PRINT TAB(18); "*** PARA CONTINUAR OPRIMIR [CONTINUE]"
1450      PAUSE
1455      GOTO 2560
1460      Cr=Cr+1
1465      Yr(Cr)=Y
1470      Zr(Cr)=Z
1475      FOR I=2 TO N
1480          A(I)=B(I)
1485          D(I)=E(I)
1490      NEXT I
1495      N=N-1
1500      M=M-1
1505      END LOOP
1510      RETURN
1515!
1520 Grafica: !-----BLOQUE DE GRAFICACION -----
1525      FOR Q=1 TO Punto
1530          A1(Q)=Preal(Q)
1535      NEXT Q
1540      GOSUB Encuentra
1545      Xmax=Ls
1550      Xmin=Li
1555      FOR Q=1 TO N4
1560          A1(Q)=Pimag(Q)
1565      NEXT Q
1570      GOSUB Encuentra
1575      Ymax=Ls
1580      Ymin=Li
1585      PRINT "Real Min=";Xmin,"Real Max=";Xmax
1590      PRINT "Imag Min=";Ymin,"Imag Max=";Ymax
1595      IF kcont>1 THEN 1615
1600      INPUT "BORDE IZQUIERDO : ",B1zq
1605      INPUT "BORDE DERECHO : ",Bder
1610      INPUT "BORDE SUPERIOR : ",Bsup

```

```

1615 OUTPUT 2 USING "#,K";CHR$(255)&"K"
1620 GRAPHICS ON
1625 CLIP OFF
1630!---- ROTULAR: ENCABEZADO Y EJES
1635 CSIZE 6
1640 LORG 6
1645 Xgmax=100*MAX(1,RATIO)
1650 Ygmax=100*MAX(1,1/RATIO)
1655 FOR I=-.25 TO .25 STEP .1
1660     MOVE Xgmax/2+I,Ygmax
1665     LABEL "Trayectoria de Nyquist"
1670 NEXT I
1675 CSIZE 3.5
1680 IF Sd$="SI" THEN
1685     MOVE Xgmax/2,Ygmax-6
1690     LABEL "( Sistema Discreto )"
1695 ELSE
1700     MOVE Xgmax/2,Ygmax-6
1705     LABEL "( Sistema Continuo )"
1710 END IF
1715 DEG
1720 LDIR 90
1725 CSIZE 3.5
1730 LORG 4
1735 MOVE 8,Ygmax/2
1740 LABEL "Parte Imaginaria de GH"
1745 LDIR 0
1750 MOVE Xgmax/2,.07*Ygmax
1755 LABEL "Parte Real de GH"
1760!---- DEFINIR ZONA DE GRAFICACION
1765 VIEWPORT 10,120,15,90
1770 FRAME
1775 LORG 5
1780 CSIZE 5
1785 Ymin=-Bsup
1790 Ymax=Bsup
1795 WINDOW Bizq,Bder,Ymin,Ymax
1800 AXES .5,.5,0,0,1,1,3
1805 GRID 1,1,0,0
1810!---- COLOCAR LOS VALORES DE LOS EJES
1815 CLIP OFF
1820 FOR X=Bizq TO Bder
1825     CSIZE 4
1830     LORG 6
1835     IF ABS(X)<.00001 THEN X=0
1840     MOVE X,Ymin
1845     LABEL USING "#,K";X
1850 NEXT X
1855 CSIZE 7
1860 LORG 5
1865 MOVE -1,0
1870 LABEL "X"
1875 CLIP OFF
1880 FOR Y=Ymin TO Ymax

```



```

1885      CSIZE 4
1890      LORG 2
1895      MOVE Bder+.1,Y
1900      LABEL USING "#,K";Y
1905      NEXT Y
1910      GOTD 1955
1915 Mult:  !** RUTINA PARA MULTIPLICAR COMPLEJOS
1920      FOR I=2 TO Lim
1925          Temp1=Nreal
1930          Temp2=Nimag
1935          Nreal=(Nreal*Re(I))-(Nimag*Im(I))
1940          Nimag=(Temp1*Im(I))+(Re(I)*Temp2)
1945      NEXT I
1950      RETURN
1955 !--- GRAFICA LA TRAYECTORIA DE NYQUIST
1960      CSIZE 3
1965      MOVE Preal(1),Pimag(1)
1970      CLIP ON
1975      LINE TYPE 1
1980      FOR Q=1 TO Punto
1985          PLOT Preal(Q),Pimag(Q),1
1990          BEEP 250,.05
1995      NEXT Q
2000      LINE TYPE 8
2005      FOR Q=Punto TO 1 STEP -1
2010          PLOT Preal(Q),-Pimag(Q),1
2015          BEEP 200,.05
2020      NEXT Q
2025      RETURN
2030 !
2035 Encuentra:  ! ENCONTRAR MAXIMO Y MINIMO
2040      Ls=-1.E+300
2045      Li=1.E+300
2050      FOR Q=1 TO Punto-1
2055          IF A1(Q)>A1(Q+1) THEN 2075
2060          IF A1(Q)<Li THEN Li=A1(Q)
2065          IF A1(Q+1)>Ls THEN Ls=A1(Q+1)
2070          GOTD 2085
2075          IF A1(Q)>Ls THEN Ls=A1(Q)
2080          IF A1(Q+1)<Li THEN Li=A1(Q+1)
2085      NEXT Q
2090      RAD
2095      RETURN
2100 Imparam:  !IMPRIMIR PARAMETROS
2105      PRINTER IS PRT
2110      PRINT
2115      PRINT
2120      PRINT
2125      PRINT
2130      PRINT
2135      PRINT TAB(4);"ORDEN DEL NUMERADOR  N1=";N1
2140      PRINT TAB(4);"ORDEN DEL DENOMINADOR N2=";N2
2145      PRINT TAB(4);RPT#("-",50)
2150      PRINT TAB(4);"COEFS. DEL NUMER. EN ORDEN DECRECIENTE : "

```

```

2155 PRINT TAB(4);"";
2160 FOR Cont1=1 TO N1+1
2165     PRINT "G(";Cont1;")=";G(Cont1);"; ";
2170 NEXT Cont1
2175 PRINT
2180 PRINT TAB(4);"COEFS. DEL DENOMIN. EN ORDEN DECRECIENTE : "
2185 PRINT TAB(4);"";
2190 FOR Cont1=1 TO N2+1
2195     PRINT "H(";Cont1;")=";H(Cont1);"; ";
2200 NEXT Cont1
2205 PRINT
2210 PRINT TAB(4);RPT$("-",50)
2215 PRINT TAB(4);"CEROS ENCONTRADOS : "
2220 FOR Cont1=1 TO Cont3
2225     PRINT USING "#,2(SDDD.DDD)";Ycero(Cont1),Zcero(Cont1)
2230     PRINT "j"
2235 NEXT Cont1
2240 PRINT TAB(4);"POLOS ENCONTRADOS : "
2245 FOR Cont1=1 TO Cont4
2250     PRINT USING "#,2(SDDD.DDD)";Ypolo(Cont1),Zpolo(Cont1)
2255     PRINT "j"
2260 NEXT Cont1
2265 PRINT TAB(4);RPT$("-",50)
2270 PRINT TAB(4);"VALOR(ES) DE K : "
2275 PRINT TAB(4);"";
2280 FOR Q=1 TO Kcont
2285     PRINT "K(";Q;")=";Kap(Q);"; ";
2290 NEXT Q
2295 PRINT
2300 PRINT TAB(4);RPT$("-",50)
2305 PRINT TAB(4);"MUESTREO :";Tm,"RETARDO :";Th
2310 PRINT TAB(4);RPT$("-",50)
2315 PRINT TAB(4);"MARGEN DE GANANCIA :           MARGEN DE FASE : "
2320 FOR Q=1 TO Kcont
2325     PRINT TAB(4);"Mgn(";Q;")=";
2330     PRINT USING "#,XX,DDDD.DDDD,16(X)";Mgn(Q)
2335     PRINT "Mfs(";Q;")=";
2340     PRINT USING "XX,DDDD.DDDD";Mfs(Q)
2345 NEXT Q
2350 PRINT TAB(4);RPT$("-",51)
2355 PRINT TAB(4);"RANGO DE Wn: ";Iw;" --> ";Wn;
2360 PRINT " ; INCREMENTO DE Wn : ";Dw
2365 PRINT TAB(4);RPT$("-",51)
2370 PRINT
2375 PRINT
2380 PRINTER IS CRT
2385 RETURN
2390 Imptab: !IMPRIMIR TABLA
2395 PRINTER IS PRT
2400 PRINT CHR$(12)
2405 PRINT TAB(8);RPT$("-",51)
2410 PRINT TAB(12);"w";TAB(19);"PARTE REAL";TAB(32);
2415 PRINT "PARTE IMAGINARIA"
2420 PRINT TAB(8);RPT$("-",51)

```

```

2425 PRINT
2430 IF Punto<=50 THEN
2435     Incr=1
2440 ELSE
2445     Incr=INT(Punto/50)
2450 END IF
2455 IF Punto>50 AND Punto<=199 THEN
2460     Incr=2
2465 ELSE
2470 END IF
2475 Wr=Iw
2480 FOR Q=1 TO Punto STEP Incr
2485 PRINT USING "11X,DD.DD,2(3(X),SDDD.DDD)";Wr,Freeal(Q),Pimag(Q)
2490 Wr=Wr+(Dw*Incr)
2495 NEXT Q
2500 PRINT CHR$(12)
2505 PRINTER IS CRT
2510 RETURN
2515 !---- ENCABEZADO Y BORRAR PANTALLA
2520 OUTPUT 2 USING "#,K";CHR$(255)&"K"
2525 PRINT TAB(10);"---- ESTABILIDAD POR EL CRITERIO";
2530 PRINT " DE NYQUIST ----"
2535 PRINT TAB(15);"---- F.E.S. CUAUTITLAN U.N.A.M. ----"
2540 PRINT
2545 GRAPHICS OFF
2550 ! GCLEAR
2555 RETURN
2560 !---- TERMINAR EL PROGRAMA
2565 PRINTER IS CRT
2570 GCLEAR
2575 GOSUB 2515
2580 PRINT "***** FIN DEL PROGRAMA *****"
2585 END
2590 !---- SUBRRUTINA PARA ROTULAR LA GRAFICA
2595 SUB Etiqueta
2600     ALPHA OFF
2605     CLIP OFF
2610     GRAPHICS INPUT IS KBD,"KBD"
2615     PLOTTER IS CRT,"INTERNAL"
2620     TRACK CRT IS ON
2625     LINE TYPE 1
2630     GRAPHICS ON
2635     MOVE 0,0
2640     LOOP.
2645         READ LOCATOR X,Y,Status$
2650         DIGITIZE X,Y,Status$
2655         DISP X,Y
2660         MOVE X,Y
2665         LINPUT "TEXTO",Tex$
2670         INPUT "TAMAGO",T
2675         IF Tex$="" THEN 2720
2680         IF Tex$="~" THEN GOSUB Goma
2685         CSIZE T,.5
2690         LORG 5
2695         LABEL Tex$
2700         Long=LEN(Tex$)
2705     END LOOP
2710 Goma: DISP USING VAL$(Long)!"X"
2715     RETURN
2720 SUBEND

```

### 3.7 OPERACION DEL PROGRAMA NYQUIST.

Para operar el programa NYQUIST (Análisis de estabilidad por el criterio de Nyquist), es necesario cargar el programa tecleando la instrucción :

LOAD "NYQUIST" (ENTER)

Posteriormente, presionar la tecla (RUN). A continuación, en la pantalla se pide introducir la siguiente información :

EN LA PANTALLA

TECLEAR

ANALIZAR UN SISTEMA DISCRETO? (SI/NO)	SI para un sistema discreto. NO para un sistema continuo.
si la respuesta fue SI: INSTANTE DE MUESTREO :	el valor del instante - de muestreo en segundos.
En caso contrario: NUMERO MAXIMO DE ITERACIONES:	el n° máximo de iteraciones, para el cálculo de las raíces.
NUMERO DE CIFRAS DE APROXIMACION :	el n° de cifras de aproximación, para el error máximo en el cálculo de las raíces.
ORDEN DEL POLINOMIO DEL NUMERADOR :	el orden del numerador.
ORDEN DEL POLINOMIO DEL DENOMINADOR :	el orden del denominador.
) TODO CORRECTO? (SI/NO)	SI o NO y ENTER.
INTRODUCIR COEFS. DEL NUMERADOR EN ORDEN DECRECIENTE : ?	el valor del coeficiente de mayor orden y ENTER
Esta operación se repite dependiendo del orden del numerador.	

( Continuación )

<p>INTRODUCIR COEFS. DEL DENOMINAD<sub>OP</sub> EN ORDEN DECRECIENTE : ?</p> <p>Esta operación se repite dependiendo del orden del denominador.</p>	<p>el valor del coeficiente de mayor orden y ENTER</p>
<p>) TODO CORRECTO? (SI/NO)</p>	<p>SI o NO y ENTER</p>
<p>CEROS ENCONTRADOS :</p> <p>+nnn.nnnn +nnn.nnnn j</p> <p>  :          :</p> <p>  :          :</p> <p>  :          :</p> <p>POLOS ENCONTRADOS :</p> <p>+nnn.nnnn +nnn.nnnn j</p> <p>  :          :</p> <p>  :          :</p> <p>  :          :</p> <p>** PARA CONTINUAR OPRIMIR (CONTINUE) **</p>	<p>presionar (CONTINUE)</p>
<p>LIMITE INFERIOR DE Wn:</p>	<p>el valor inicial de la frecuencia y ENTER.</p>
<p>Si el sistema es continuo: LIMITE SUPERIOR DE Wn:</p> <p>En caso contrario: INCREMENTO DE Wn:</p>	<p>el valor máximo de la frecuencia y ENTER.</p> <p>el valor del incremento de frecuencia y ENTER.</p>
<p>VALOR DE TETHA :</p>	<p>el valor del tiempo de retardo <math>\theta</math>, en el término <math>e^{-\theta s}</math> y ENTER.</p>
<p>VALOR DE K :</p>	<p>el valor de la ganancia K y ENTER.</p>
<p>) TODO CORRECTO? (SI/NO)</p>	<p>SI o NO y ENTER.</p>

Después en la pantalla aparece durante el tiempo en el que se están calculando los puntos de la gráfica de Nyquist, el siguiente mensaje :

mm.mm      nnnn  
 \*\*\* CALCULANDO TRAYECTORIA DE NYQUIST \*\*\*

en donde: mm.mm indica la frecuencia con la que se está efectuando el cálculo y nnnn indica el punto que se está calculando.

Nota: Este último número no debe ser > que 2000, ya que el programa sólo está diseñado para calcular como máximo 2000 puntos, y al sobrepasar esta cantidad la computadora enviará un mensaje de "error en dimensionamiento". De presentarse esta situación, el usuario debe volver a ejecutar el programa presionando la tecla (RUN), e introducir una vez más los datos del sistema.

Posteriormente se pregunta :

IMPRIMIR LOS PARAMETROS? (SI/NO)

Si se quieren imprimir los parámetros del sistema asegurarse de que el impresor esté listo, entonces, te clear SI y ENTER.

De lo contrario, te clear NO y ENTER.

A continuación, en la pantalla se despliega una tabla, mostrando los valores de la parte real y la parte imaginaria calculados.

Después de la tabla, se muestran los valores máximos y mínimos de las partes real e imaginaria :

Real min = ...                      Real max = ...

Imag min = ...                      Imag max = ...

En seguida, se pide la siguiente información:

EN LA PANTALLA

TECLEAR

BORDE IZQUIERDO :	el valor para el borde izquierdo del eje real y ENTER.
BORDE DERECHO :	el valor para el borde derecho del eje real y ENTER.

BORDE SUPERIOR :

el valor para el borde superior del eje imaginario y ENTER.

Posteriormente, aparecerá desplegada en la pantalla la gráfica de Nyquist. Para continuar Presionar la tecla (CONTINUE).

Entonces, aparecerá en la pantalla la pregunta :

GRAFICAR PARA OTRA K ?(SI/NO)

Si se desea ver la gráfica para un nuevo valor de ganancia (K), teclar SI

Entonces se pregunta :

VALOR DE K :

teclar el nuevo valor de ganancia y ENTER.

) TODO CORRECTO ?(SI/NO)

teclar SI o NO y ENTER.

En seguida se vuelve a calcular la gráfica para el nuevo valor de ganancia. Al terminar, se pregunta :

IMPRIMIR PARAMETROS ?(SI/NO)

teclar SI o NO y ENTER , según convenga.

En la pantalla aparece la gráfica con el valor anterior de ganancia y la gráfica con el nuevo valor de ganancia. Para continuar, presionar la tecla (CONTINUE).

Si no se desea introducir otro valor de ganancia teclar NO y ENTER.

En la pantalla aparece una vez más la gráfica de Nyquist. En este paso, el programa permite colocar cualquier "letrero" o comentario sobre cualquier zona de la pantalla.

Si no se desea poner comentario alguno, presionar la tecla (EXECUTE), después teclar un espacio (barra espaciadora) y la tecla (ENTER) dos veces. Si se dese--

a imprimir la gráfica, presione simultáneamente las teclas :

(SHIFT) (GRAPHICS).

Después, para imprimir la tabla, presione la tecla (CONTINUE). Entonces, la ejecución del programa termina. En este momento, es posible correr una vez más el programa (tecla RUN), o cargar un programa diferente.

Si se desea colocar uno o varios comentarios sobre la gráfica, proceder en la forma siguiente :

1. Girar la perilla posicionadora (esquina superior izquierda del teclado), en sentido horario. Esto sirve para mover el cursor (+) en la dirección horizontal.
2. Para mover el cursor en dirección vertical:
  - a) Hacia arriba, girar la perilla posicionadora en sentido antihorario, presionando simultáneamente la tecla (SHIFT).
  - b) Hacia abajo, girar la perilla en sentido horario, presionando simultáneamente la tecla (SHIFT).

Nota: la posición del cursor, indica el centro del texto que se va a colocar, por ejemplo:

K =+ 10

↑  
posición del cursor antes de dar el texto

3. Una vez que el cursor se coloca en la posición deseada, presionar la tecla (EXECUTE).
4. En la esquina inferior izquierda de la gráfica se pregunta por el texto que se desea colocar en la posición indicada por el cursor.
5. Teclar el contenido del texto y (ENTER).
6. Teclar el tamaño de la letra que se desea utilizar (3,4,5, o 6) y (ENTER). Con esto, el texto es colocado sobre la gráfica.

Nota: la secuencia 3 a 6, se puede repetir las veces -- que sean necesarias.



7. Para salir de esta opción, teclear (EXECUTE), dar un espacio en blanco (barra espaciadora) y (ENTER) dos veces.

8. Para imprimir la gráfica, presionar simultáneamente las teclas :

(SHIFT) (GRAPHICS)

Después, para imprimir la tabla presionar la tecla (CONTINUE). En este momento, es posible correr una vez más el programa (tecla -- RUN), o cargar un programa diferente.

### 3.8 EJEMPLOS DE GRÁFICAS DE NYQUIST.

A continuación, se ilustran algunos ejemplos, - los cuales tienen las siguientes funciones de transferencia :

$$3.1) \quad GH(S) = \frac{K}{(S^3 + 3S^2 + 2S)}$$

para:  $W_{min}=0.5$ ,  $W_{max}=6$ ,  $\Delta W=.1$   
 $K_1=10$ ,  $K_2=6$ ,  $K_3=3$

$$3.2) \quad GH(S) = \frac{K}{(S^3 + 2S^2 + S + 1)}$$

para:  $W_{min}=0.1$ ,  $W_{max}=3$ ,  $\Delta W=.02$   
 $K_1=1$ ,  $K_2=0.5$

$$3.3) \quad GH(S) = \frac{K}{(S + 1)}$$

para:  $W_{min}=0.1$ ,  $W_{max}=10$ ,  $\Delta W=.05$   
 $K_1=1$ ,  $\theta=0.5$

$$3.4) \quad GH(S) = \frac{K S}{S^2 - 1.208S + .208}$$

para:  $W_{min}=0.1$ ,  $W_{max}=2$ ,  $\Delta W=.1$   
 $K_1=1.2434$ , muestreo  $T_m=1.57$

## EJEMPLO 3.1

ORDEN DEL NUMERADOR  $N1=0$   
 ORDEN DEL DENOMINADOR  $N2=3$

COEFS. DEL NUMER. EN ORDEN DECRECIENTE :

$G(1) = 1$  ;

COEFS. DEL DENOMIN. EN ORDEN DECRECIENTE :

$H(1) = 1$  ;  $H(2) = 3$  ;  $H(3) = 2$  ;  $H(4) = 1.E-24$  ;

CEROS ENCONTRADOS :

POLOS ENCONTRADOS :

$-0.000 + 0.000j$

$-1.000 + 0.000j$

$-2.000 + 0.000j$

VALOR(ES) DE K :

$K(1) = 10$  ;  $K(2) = 6$  ;  $K(3) = 3$  ;

MUESTREO : 0      RETARDO : 0

MARGEN DE GANANCIA :

$Mgn(1) = .5881$

$Mgn(2) = .9801$

$Mgn(3) = 1.9602$

MARGEN DE FASE :

$Mfs(1) = -12.9326$

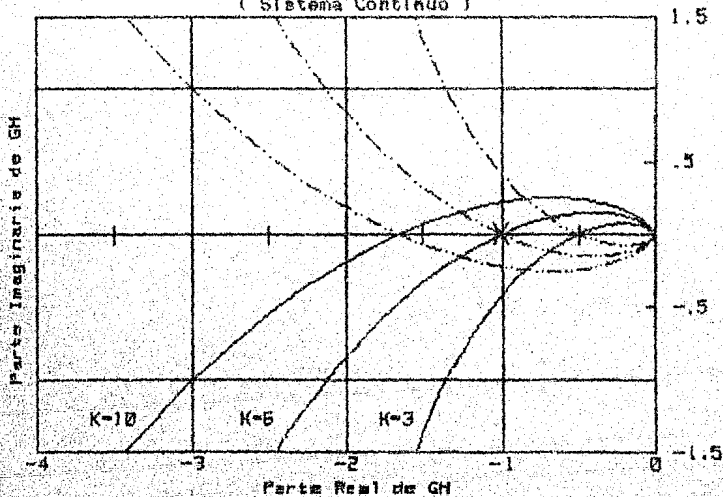
$Mfs(2) = .5457$

$Mfs(3) = 18.4350$

RANGO DE  $Wn$  : .5 --> 6 ; INCREMENTO DE  $Wn$  : .1

### Trayectoria de Nyquist

( Sistema Continuo )



## EJEMPLO 3.1

W	PARTE REAL	PARTE IMAGINARIA
.50	-1.694	-1.976
.70	-1.345	-.967
.90	-1.034	-.456
1.10	-.782	-.187
1.30	-.588	-.047
1.50	-.443	+.025
1.70	-.336	+.059
1.90	-.257	+.072
2.10	-.198	+.076
2.30	-.154	+.073
2.50	-.121	+.069
2.70	-.096	+.063
2.90	-.077	+.057
3.10	-.062	+.051
3.30	-.051	+.046
3.50	-.042	+.041
3.70	-.035	+.036
3.90	-.029	+.033
4.10	-.024	+.029
4.30	-.021	+.026
4.50	-.017	+.024
4.70	-.015	+.021
4.90	-.013	+.019
5.10	-.011	+.017
5.30	-.010	+.016
5.50	-.008	+.014
5.70	-.007	+.013
5.90	-.006	+.012

## EJEMPLO 3.2

ORDEN DEL NUMERADOR  $N1= 0$   
 ORDEN DEL DENOMINADOR  $N2= 3$

COEFS. DEL NUMER. EN ORDEN DECRECIENTE :

$G( 1 )= 1 ;$

COEFS. DEL DENOMIN. EN ORDEN DECRECIENTE :

$H( 1 )= 1 ; H( 2 )= 2 ; H( 3 )= 1 ; H( 4 )= 1 ;$

CEROS ENCONTRADOS :

POLOS ENCONTRADOS :

$-.123 \quad +.745j$

$-.123 \quad -.745j$

$-1.755 \quad -0.000j$

VALOR(ES) DE  $K :$

$K( 1 )= 1 ; K( 2 )= .5 ;$

MUESTREO : 0      RETARDO : 0

MARGEN DE GANANCIA :

$Mgn( 1 )= 1.0000$

$Mgn( 2 )= 2.0000$

MARGEN DE FASE :

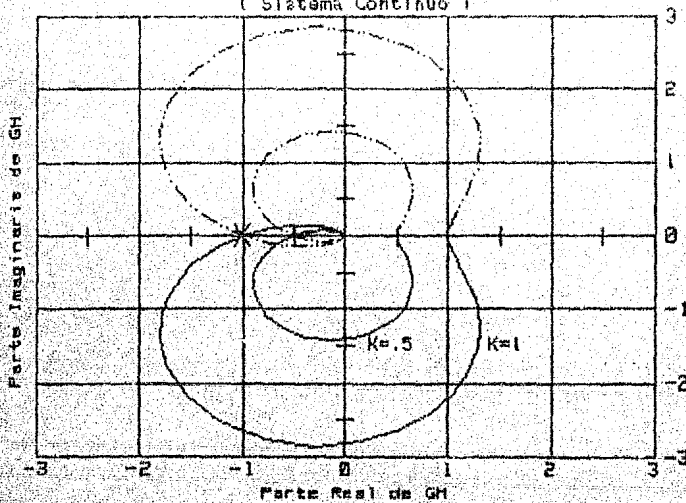
$Mfs( 1 )= -.0003$

$Mfs( 2 )= -45.8769$

RANGO DE  $Wn$ : .1  $\rightarrow$  3 ; INCREMENTO DE  $Wn$  : .02

### Trayectoria de Nyquist

( Sistema Continuo )



## EJEMPLO 3.2

W	PARTE REAL	PARTE IMAGINARIA
.10	+ .505	-.051
.14	+ .510	-.073
.18	+ .517	-.096
.22	+ .525	-.122
.26	+ .536	-.150
.30	+ .549	-.183
.34	+ .564	-.221
.38	+ .581	-.266
.42	+ .601	-.321
.46	+ .621	-.391
.50	+ .640	-.480
.54	+ .651	-.598
.58	+ .641	-.754
.62	+ .581	-.958
.66	+ .415	-1.199
.70	+ .078	-1.396
.74	-.393	-1.382
.78	-.773	-1.089
.82	-.902	-.703
.86	-.856	-.400
.90	-.749	-.207
.94	-.639	-.091
.98	-.542	-.023
1.02	-.462	+ .018
1.06	-.397	+ .042
1.10	-.343	+ .056
1.14	-.299	+ .064
1.18	-.262	+ .068
1.22	-.232	+ .070
1.26	-.206	+ .070
1.30	-.184	+ .069
1.34	-.165	+ .068
1.38	-.149	+ .066
1.42	-.134	+ .064
1.46	-.122	+ .062
1.50	-.111	+ .059
1.54	-.101	+ .057
1.58	-.093	+ .055
1.62	-.085	+ .053
1.66	-.078	+ .051
1.70	-.072	+ .048
1.74	-.067	+ .046
1.78	-.062	+ .044
1.82	-.057	+ .043
1.86	-.053	+ .041
1.90	-.049	+ .039
1.94	-.046	+ .038
1.98	-.043	+ .036
2.02	-.040	+ .035
2.06	-.037	+ .033

## EJEMPLO 3.2

2.10	-.035	+.032
2.14	-.033	+.031
2.18	-.031	+.029
2.22	-.029	+.028
2.26	-.027	+.027
2.30	-.025	+.026
2.34	-.024	+.025
2.38	-.022	+.024
2.42	-.021	+.023
2.46	-.020	+.022
2.50	-.019	+.022
2.54	-.018	+.021
2.58	-.017	+.020
2.62	-.016	+.019
2.66	-.015	+.019
2.70	-.014	+.018
2.74	-.014	+.017
2.78	-.013	+.017
2.82	-.012	+.016
2.86	-.012	+.016
2.90	-.011	+.015
2.94	-.011	+.015
2.98	-.010	+.014

## EJEMPLO 3.3

ORDEN DEL NUMERADOR  $N1= 0$   
 ORDEN DEL DENOMINADOR  $N2= 1$

-----  
 COEFS. DEL NUMER. EN ORDEN DECRECIENTE :  
 $G( 1 )= 1 ;$   
 COEFS. DEL DENOMIN. EN ORDEN DECRECIENTE :  
 $H( 1 )= 1 ; H( 2 )= 1 ;$

-----  
 CEROS ENCONTRADOS :  
 POLOS ENCONTRADOS :  
 $-1.000 +0.000j$

-----  
 VALDR(ES) DE K :  
 $K( 1 )= 1 ;$

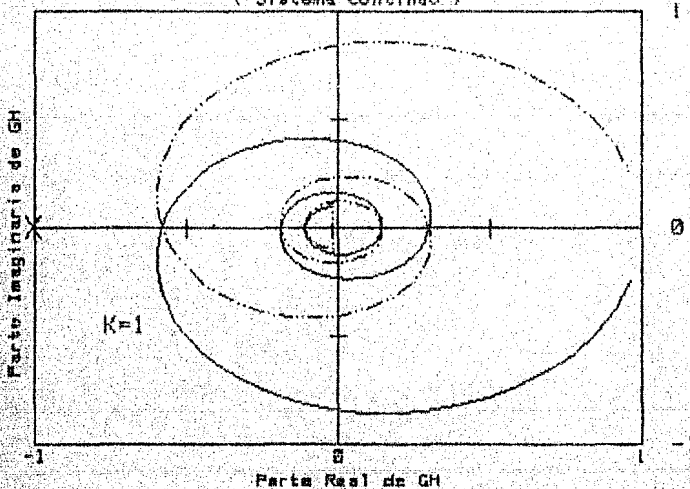
-----  
 MUESTREO : 0      RETARDO : .5

-----  
 MARGEN DE GANANCIA :              MARGEN DE FASE :  
 $Mgn( 1 )= 1.7205$                        $Mfs( 1 )= -14.7106$

-----  
 RANGO DE  $Wn$ : .1 --> 10 ; INCREMENTO DE  $Wn$  : .05  
 -----

### Trayectoria de Nyquist

( Sistema Continuo )



## EJEMPLO 3.3

W	PARTE REAL	PARTE IMAGINARIA
.10	+.962	-.253
.20	+.855	-.480
.30	+.692	-.662
.40	+.495	-.786
.50	+.283	-.849
.60	+.075	-.854
.70	-.114	-.811
.80	-.276	-.731
.90	-.405	-.623
1.00	-.500	-.500
1.10	-.562	-.369
1.20	-.594	-.238
1.30	-.599	-.112
1.40	-.581	+.005
1.50	-.544	+.109
1.60	-.491	+.198
1.70	-.427	+.273
1.80	-.355	+.331
1.90	-.279	+.373
2.00	-.200	+.400
2.10	-.122	+.412
2.20	-.046	+.411
2.30	+.024	+.398
2.40	+.089	+.374
2.50	+.146	+.341
2.60	+.195	+.301
2.70	+.235	+.255
2.80	+.266	+.205
2.90	+.288	+.153
3.00	+.300	+.100
3.10	+.303	+.047
3.20	+.298	-.003
3.30	+.285	-.051
3.40	+.266	-.095
3.50	+.240	-.133
3.60	+.210	-.167
3.70	+.175	-.194
3.80	+.138	-.214
3.90	+.099	-.228
4.00	+.059	-.235
4.10	+.019	-.236
4.20	-.019	-.231
4.30	-.054	-.220
4.40	-.087	-.204
4.50	-.116	-.183
4.60	-.141	-.159
4.70	-.162	-.131



## EJEMPLO 3.3

4.80	-.177	-.101
4.90	-.187	-.070
5.00	-.192	-.038
5.10	-.192	-.007
5.20	-.187	+.023
5.30	-.178	+.052
5.40	-.164	+.078
5.50	-.147	+.102
5.60	-.127	+.122
5.70	-.104	+.138
5.80	-.079	+.150
5.90	-.053	+.158
6.00	-.027	+.162
6.10	-.001	+.162
6.20	+.024	+.157
6.30	+.048	+.149
6.40	+.070	+.137
6.50	+.090	+.123
6.60	+.107	+.105
6.70	+.120	+.086
6.80	+.130	+.065
6.90	+.137	+.043
7.00	+.140	+.020
7.10	+.139	-.002
7.20	+.135	-.024
7.30	+.128	-.045
7.40	+.118	-.063
7.50	+.105	-.080
7.60	+.090	-.095
7.70	+.073	-.106
7.80	+.054	-.115
7.90	+.035	-.121
8.00	+.015	-.123
8.10	-.004	-.122
8.20	-.023	-.119
8.30	-.041	-.112
8.40	-.058	-.103
8.50	-.072	-.092
8.60	-.085	-.078
8.70	-.095	-.063
8.80	-.103	-.047
8.90	-.108	-.030
9.00	-.110	-.012
9.10	-.109	+.005
9.20	-.106	+.022
9.30	-.100	+.038
9.40	-.092	+.053
9.50	-.081	+.066
9.60	-.069	+.077
9.70	-.056	+.086
9.80	-.041	+.093
9.90	-.026	+.097

## EJEMPLO 3.4

ORDEN DEL NUMERADOR  $N1= 1$   
 ORDEN DEL DENOMINADOR  $N2= 2$

COEFS. DEL NUMER. EN ORDEN DECRECIENTE ;  
 $G( 1 )= 1$  ;  $G( 2 )= 1.E-24$  ;  
 COEFS. DEL DENOMIN. EN ORDEN DECRECIENTE ;  
 $H( 1 )= 1$  ;  $H( 2 )=-1.208$  ;  $H( 3 )= .208$  ;

CEROS ENCONTRADOS :  
 $-0.000 +0.000j$   
 POLOS ENCONTRADOS :  
 $+1.208 -0.000j$   
 $+1.000 +0.000j$

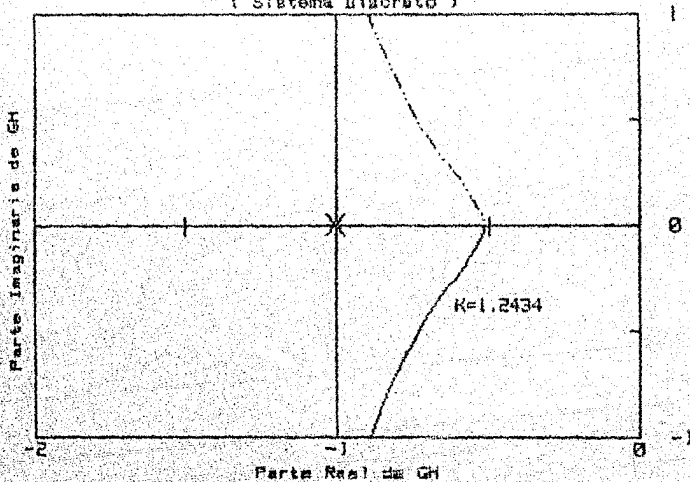
VALOR(ES) DE K ;  
 $K( 1 )= 1.2434$  ;

MUESTREO : 1.57 RETARDO : 0

MARGEN DE GANANCIA ; MARGEN DE FASE ;  
 $Mgn( 1 )= 1.9431$   $Mfs( 1 )= 37.5315$

RANGO DE  $Wn$  : .1 --> 2.00101442904 ; INCREMENTO DE  $Wn$  : .1

### Trayectoria de Nyquist ( Sistema Discreto )



## EJEMPLO 3.4

W	PARTE REAL	PARTE IMAGINARIA
.10	-1.188	-9.898
.20	-1.160	-4.803
.30	-1.117	-3.051
.40	-1.063	-2.146
.50	-1.003	-1.588
.60	-.940	-1.211
.70	-.879	-.941
.80	-.821	-.742
.90	-.768	-.590
1.00	-.720	-.472
1.10	-.678	-.380
1.20	-.641	-.306
1.30	-.610	-.245
1.40	-.583	-.195
1.50	-.562	-.153
1.60	-.544	-.116
1.70	-.531	-.084
1.80	-.522	-.054
1.90	-.517	-.027
2.00	-.515	-0.000

## CAPITULO 4

++++  
SIMULACION PARA SISTEMAS DISCRETOS  
DE LAZO CERRADO  
++++

#### 4.1 INTRODUCCION.

Es bien conocido que la computadora digital juega un papel cada vez más importante en el análisis y diseño de los sistemas de control realimentado. Ya que las computadoras digitales no solamente son usadas en la computación y simulación del desempeño de los sistemas de control, sino también en una forma cada vez más frecuente en control digital directo de sistemas en línea.

Un sistema analógico puede ser simulado en la computadora digital, una vez que la dinámica del sistema es aproximada por una función de transferencia en el dominio Z. El análisis usualmente consiste de las dos etapas siguientes :

- a) Representación del sistema de datos continuos por un modelo digital.
- b) Simulación del modelo digital en una computadora.

Existen muchos caminos posibles para representar un sistema de datos continuos por un modelo digital. En general, los siguientes tres métodos son los más utilizados :

- 1) Insertar los dispositivos muestreador y retenedor en el sistema de datos continuos.
- 2) Integración numérica.
- 3) Aproximación a la forma Z.

#### 4.2 FUNCION DE TRANSFERENCIA DE PULSOS DE LAZO CERRADO.

Al evaluar la respuesta transitoria de los sistemas de control de lazo cerrado por una computadora digital, para cambios en la referencia ó cambios en la carga ( disturbios), utilizaremos el método de muestreador y retenedor.

Ahora, asumiendo que la función de transferencia de todos los elementos que constituyen el sistema es conocida, y además que la dinámica del elemento final de control y el sensor están incluidos dentro de la di

námica del proceso.

Es de todos conocido, que los sistemas de orden superior siempre pueden ser aproximados a lo más por un sistema de segundo orden más un tiempo muerto ó retardo por transporte, por lo cual, en la simulación solamente se considera el análisis de los sistemas de primer orden con retardo y sistemas de segundo orden con retardo.

En la figura 4.1, se muestra el diagrama a bloques del sistema de control de datos muestreados de lazo cerrado, donde  $R(S)$  es la señal de referencia,  $D(Z)$  la función de transferencia del controlador digital,  $H(S)$  la función de transferencia del retenedor de orden cero,  $G_p(S)$  la función de transferencia del proceso,  $L(S)$  el disturbio o carga y  $C(S)$  la salida.

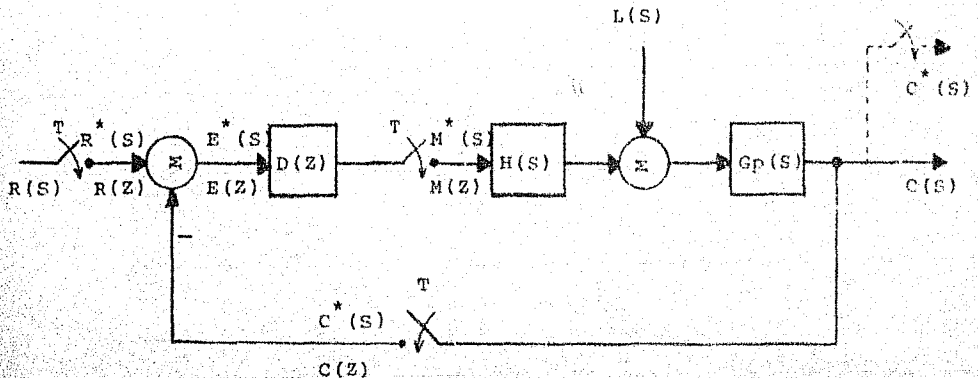


Figura 4.1 Diagrama de bloques de un sistema de datos discretos de lazo cerrado.

Analizando el diagrama de bloques, se obtienen las siguientes relaciones :

$$C(S) = G_p(S)H(S)M^*(S) + G_p(S)L(S)$$

$$E^*(S) = R^*(S) - C^*(S)$$

$$M^*(S) = D^*(S)E^*(S) = D^*(S)[R^*(S) - C^*(S)]$$

sustituyendo  $M^*(S)$  en la primera relación, se tiene que:

$$C(S) = G_p(S)H(S)D^*(S) [R^*(S) - C^*(S)] + G_p(S)L(S)$$

aplicando la transformada  $*$  a la relación anterior, tenemos:

$$C^*(S) = \overline{G_p(S)H(S)}^* D^*(S) [R^*(S) - C^*(S)] + \overline{G_p(S)L(S)}^*$$

$$C^*(S) = \frac{D^*(S) \overline{H(S)G_p(S)}^* R^*(S)}{1 + D^*(S) \overline{H(S)G_p(S)}^*} + \frac{\overline{G_p(S)L(S)}^*}{1 + D^*(S) \overline{H(S)G_p(S)}^*}$$

por lo tanto:

$$C(Z) = \frac{D(Z) \overline{HG_p(Z)} R(Z)}{1 + D(Z) \overline{HG_p(Z)}} + \frac{G_pL(Z)}{1 + D(Z) \overline{HG_p(Z)}}$$

entonces, la salida para un cambio en la referencia -- está dada por:

$$C(Z) = \frac{D(Z) \overline{HG_p(Z)} R(Z)}{1 + D(Z) \overline{HG_p(Z)}} \quad (1)$$

y la salida para un cambio en la carga será:

$$C(Z) = \frac{G_pL(Z)}{1 + D(Z) \overline{HG_p(Z)}} \quad (2)$$

Es conveniente aclarar que la transformada asterisco de  $G_p(S)L(S)$  es  $\overline{G_p(S)L(S)}^*$  y no  $G_p^*(S)L(S)^*$ . Consecuentemente la transformada  $Z$ :

$\mathcal{Z}\{G_p(S)L(S)\} \neq G_p(Z)L(Z)$ , en general. Cuando se aplica la transformada  $Z$  a  $G_p(S)L(S)$  se denotará como  $\overline{G_pL(Z)}$ .

## 4.3 FUNCION DE TRANSFERENCIA DEL CONTROLADOR DIGITAL.

Uno de los controladores más ampliamente usados en el diseño de sistemas de control de datos continuos, es el controlador PID (Proporcional, Integral, Derivativo). Donde la función del control integral es proveer una acción para reducir el error en el estado estable, y el control derivativo provee una acción anticipatoria para reducir los sobrepasos en la respuesta transitoria.

El mismo principio del controlador PID puede ser aplicado al controlador digital, obteniéndose un algoritmo PID digital.

Partiendo de la relación que existe entre la variable manipulada  $m(t)$  y el error  $e(t)$ , se tiene que :

$$m(t) = K_c e(t) + K_i \int_0^t e(\tau) d\tau + K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (3)$$

$$m(t) = K_c \left[ e(t) + \frac{1}{T_I} \int_0^t e(\tau) d\tau + T_D \frac{de(t)}{dt} \right] \quad (4)$$

donde:  $K_i \triangleq \frac{K_c}{T_I}$  ,  $K_d \triangleq T_D K_c$

La ecuación (4), puede ser transformada dentro de una ecuación en diferencias por discretización. La derivada es reemplazada por una diferencia de primer orden, y la integral es aproximada por integración rectangular, por lo tanto :

$$m(k) = K_c \left\{ e(k) + \frac{T_s}{T_I} \sum_{i=0}^k e(i) + \frac{T_D}{T_s} [e(k) - e(k-1)] \right\} \quad (5)$$

$$m(k-1) = K_c \left\{ e(k-1) + \frac{T_s}{T_I} \sum_{i=0}^{k-1} e(i) + \frac{T_D}{T_s} [e(k-1) - e(k-2)] \right\} \quad (6)$$

restando (6) de (5) se tiene :

$$m(k) - m(k-1) = K_c \left\{ e(k) - e(k-1) + \frac{T_s}{T_I} e(k) + \frac{T_D}{T_s} [e(k) - 2e(k-1) + e(k-2)] \right\} \quad \dots (7)$$



aplicando la transformada Z a la ecuación (7) y agrupando, obtenemos la función de transferencia del controlador PID digital :

$$D(Z) = \frac{M(Z)}{E(Z)} = K_c \frac{\left\{ (1+T_s/T_I + T_D/T_s) - (1+2T_D/T_s)Z^{-1} + T_D/T_s Z^{-2} \right\}}{(1-Z^{-1})}$$

.... (8)

#### 4.4 FUNCION DE TRANSFERENCIA DEL RETENEDOR Y PROCESO.

Para obtener la función de transferencia en el dominio Z del retenedor de orden cero y el proceso, sabemos que la función de transferencia en el dominio S, están dadas respectivamente por :

$$H(S) \triangleq \frac{1 - e^{-ST_s}}{S} ; G_p(S) \triangleq K_p \frac{e^{-\theta d s}}{(\tau_1 s + 1)(\tau_2 s + 1)}$$

donde:  $K_p$  es la ganancia del proceso,  $\theta d$  el tiempo muerto,  $(\tau_1$  y  $\tau_2$ ) las constantes de tiempo, y definiendo :

$$\theta d \triangleq N T_s + \theta ; m \triangleq 1 - \frac{\theta}{T_s} ; m = 1 - \left( \frac{\theta d}{T_s} - N \right)$$

la función de transferencia  $C(Z)/M(Z)$ , será :

$$\frac{C^*(s)}{M^*(s)} = \frac{C(Z)}{M(Z)} = HG_p(Z) = Z \left\{ (1 - e^{-ST_s}) K_p \frac{e^{-\theta d s}}{(\tau_1 s + 1)(\tau_2 s + 1)} \right\}$$

... (9)

$$= K_p (1 - Z^{-1}) Z \left\{ \frac{e^{-\theta d s}}{s(\tau_1 s + 1)(\tau_2 s + 1)} \right\}$$

$$= K_p (1 - Z^{-1}) Z^m \left\{ \frac{1}{s(\tau_1 s + 1)(\tau_2 s + 1)} \right\}$$

$$= K_p (1 - Z^{-1}) Z^m \left\{ \frac{1}{s} + \frac{\tau_1}{(\tau_2 - \tau_1)} \frac{1}{(s + 1/\tau_2)} - \frac{\tau_2}{(\tau_2 - \tau_1)} \frac{1}{(s + 1/\tau_1)} \right\}$$

$$\begin{aligned}
 &= K_p(1-z^{-1}) \left\{ \frac{z^{-1}}{(1-z^{-1})} + \frac{\tau_1 e^{-mTs/\tau_1} z^{-1}}{(\tau_2 - \tau_1)(1 - e^{-Ts/\tau_1} z^{-1})} - \right. \\
 &\quad \left. - \frac{\tau_2 e^{-mTs/\tau_2} z^{-1}}{(\tau_2 - \tau_1)(1 - e^{-Ts/\tau_2} z^{-1})} \right\} \\
 \text{HGp}(z) &= K_p \left\{ \frac{[1 + (\tau_1 e^{-mTs/\tau_1} - \tau_2 e^{-mTs/\tau_2}) / (\tau_2 - \tau_1)] z^{-1}}{[1 - (e^{-Ts/\tau_1} + e^{-Ts/\tau_2}) z^{-1} + e^{-Ts/\tau_1} e^{-Ts/\tau_2} z^{-2}]} - \right. \\
 &\quad - \frac{[e^{-Ts/\tau_1} + e^{-Ts/\tau_2}] + [\tau_1 e^{-Ts/\tau_1} (1 + e^{-Ts/\tau_1}) - \dots]}{[1 - (e^{-Ts/\tau_1} + e^{-Ts/\tau_2}) z^{-1} + \dots]} \\
 &\quad \dots - \frac{[\tau_2 e^{-mTs/\tau_2} (1 + e^{-Ts/\tau_2})] / (\tau_2 - \tau_1)}{\dots + e^{-Ts/\tau_1} e^{-Ts/\tau_2} z^{-2}} z^{-2} + \\
 &\quad + \frac{[e^{-Ts/\tau_1} e^{-Ts/\tau_2}] + [\tau_1 e^{-mTs/\tau_1} e^{-Ts/\tau_2} - \dots]}{[1 - (e^{-Ts/\tau_1} + e^{-Ts/\tau_2}) z^{-1} + \dots]} \\
 &\quad \left. \dots - \frac{[\tau_2 e^{-mTs/\tau_2} e^{-Ts/\tau_1}] / (\tau_2 - \tau_1)}{\dots + e^{-Ts/\tau_1} e^{-Ts/\tau_2} z^{-2}} z^{-3} \right\} \quad (10)
 \end{aligned}$$

De una forma similar se procederá a obtener la función de transferencia del proceso y carga, considerándose a dicha carga un escalón unitario (disturbio constante), por lo que :

$$G_p L(z) = \mathcal{Z} \left\{ \frac{K_p e^{-\theta ds}}{(\tau_1 s + 1)(\tau_2 s + 1) s} \right\}$$

por lo tanto :

$$G_{pL}(Z) = K_P \left\{ \frac{[1 + (\tau_1 e^{-mTs/\tau_1} - \tau_2 e^{-mTs/\tau_2}) / (\tau_2 - \tau_1)] Z^{-1}}{(1-Z^{-1}) [1 - (e^{-Ts/\tau_1} + e^{-Ts/\tau_2}) Z^{-1} + e^{-Ts/\tau_1} e^{-Ts/\tau_2} Z^{-2}]} \right. \\
- \frac{[e^{-Ts/\tau_1} + e^{-Ts/\tau_2}] + [\tau_1 e^{-Ts/\tau_1} (1 + e^{-Ts/\tau_2}) - \dots]}{(1-Z^{-1}) [1 - (e^{-Ts/\tau_1} + e^{-Ts/\tau_2}) Z^{-1} + \dots]} \\
+ \frac{[\dots - \tau_2 e^{-mTs/\tau_2} (1 + e^{-Ts/\tau_1})] / (\tau_2 - \tau_1)] Z^{-2}}{\dots + e^{-Ts/\tau_1} e^{-Ts/\tau_2} Z^{-2}} \\
+ \frac{[e^{-Ts/\tau_1} e^{-Ts/\tau_2}] + [\tau_1 e^{-mTs/\tau_1} e^{-Ts/\tau_2} - \dots]}{(1-Z^{-1}) [1 - (e^{-Ts/\tau_1} + e^{-Ts/\tau_2}) Z^{-1} + \dots]} \\
\left. \dots - \frac{[\tau_2 e^{-mTs/\tau_2} e^{-Ts/\tau_1}] / (\tau_2 - \tau_1)] Z^{-3}}{\dots + e^{-Ts/\tau_1} e^{-Ts/\tau_2} Z^{-2}} \right\} \quad (11)$$

En forma general, la señal de referencia en el dominio  $Z$ , puede ser expresada como :

$$R(Z) = \frac{Rn1 + Rn2 Z^{-1} + Rn3 Z^{-2}}{Rd1 + Rd2 Z^{-1} + Rd3 Z^{-2}} \quad (12)$$

seleccionando adecuadamente los coeficientes de la ecuación (12), se puede obtener la representación de las siguientes señales de referencia :

- (a) Impulso.
- (b) Escalón.
- (c) Rampa.

Una vez obtenidas las funciones de transferencia que constituyen la salida del sistema, para cambios en la referencia o en la carga, se procede a realizar los produc-

tos indicados en las ecuaciones (1) y (2), así como los respectivos cocientes por división continuada, obteniéndose una salida de la forma :

$$C(Z) = C(0) + C(T) Z^{-1} + C(2T) Z^{-2} + \dots + C(KT) Z^{-K} \quad (13)$$

en donde :  $C(0)$ ,  $C(T)$ ,  $C(2T)$ , ...,  $C(KT)$  representan los valores de salida correspondientes al tiempo  $KT$ .

#### 4.5 CONSTRUCCION DEL ALGORITMO.

El algoritmo por medio del cual se obtiene la gráfica de la respuesta de un sistema discreto, se compone de los siguientes bloques :

##### A. BLOQUE DE ENTRADA DE DATOS.

Dentro de este bloque se introducen los siguientes datos :

- a)  $(O_d)$  Orden del proceso, puede ser 1 o 2.
- b)  $(K_p)$  Valor de ganancia del proceso.
- c)  $(T_1)$  Valor de la constante de tiempo  $T_1$ .
- d)  $(T_2)$  Valor de la constante de tiempo  $T_2$ .
- e)  $(T_s)$  Valor del período de muestreo.
- f)  $(T_h)$  Valor del tiempo muerto  $\theta_d$ .
- g)  $(K_c)$  Valor de la constante  $K_c$  del controlador.
- h)  $(T_i)$  Valor de la constante de integración del controlador.
- i)  $(T_d)$  Valor de la constante de derivación del controlador.

##### B. BLOQUE PARA CALCULAR EL NUMERO DE TIEMPOS DE MUESTREO Y LOS TERMINOS EXPONENCIALES DEL RETENEDOR Y DEL PROCESO.

Dentro de este bloque, se calcula el mayor número entero de tiempos de muestreo  $(N)$  en  $\theta_d$  :

$$N = \theta_d / T_s \quad \text{ó} \quad N = \text{INT}( T_h / T_s )$$

También se calculan los términos exponenciales siguientes :

$$m = 1 - (\Theta d / T_s - N) \quad \text{ó} \quad M = 1 - \text{INT}(Th / T_s - N) ;$$

$$e^{-T_s / T_1} \quad \text{ó} \quad E1 = \text{EXP}(-T_s / T1) ;$$

$$e^{-m T_s / T_1} \quad \text{ó} \quad Ex = \text{EXP}(-M * T_s / T1)$$

Si la constante de tiempo  $T_1$  es diferente de cero, calcular :

$$e^{-T_s / T_2} \quad \text{ó} \quad E2 = \text{EXP}(-T_s / T2) ;$$

$$e^{-m T_s / T_2} \quad \text{ó} \quad Em = \text{EXP}(-M * T_s / T2)$$

De lo contrario :

$$e^{-T_s / T_2} = 0 \quad \text{y} \quad e^{-m T_s / T_2} = 0$$

#### C. BLOQUE PARA CAMBIO DE CARGA Y CAMBIO DE REFERENCIA.

Dentro de este bloque se pregunta si se va a introducir un cambio de carga o un cambio de referencia.

C.1 Si se va a introducir un cambio de carga, el algoritmo continuará hasta el bloque D.

C.2 Si se va a introducir un cambio de referencia :

$$a) \text{ Para un escalón unitario } R(Z) = \frac{1}{(1-Z^{-1})} ,$$

entonces se hacen las siguientes asignaciones:

$$Rn(1)=1 \quad ; \quad Rd(1)=1 \quad ; \quad Rd(2)=-1$$

donde  $Rn$  es un arreglo que contiene los coeficientes del numerador de la referencia  $R(Z)$  y  $Rd$  es un arreglo que contiene los coeficientes del denominador de la referencia.

b) Para otro tipo de referencia, entonces se pide introducir los coeficientes del numerador Rn y del denominador Rd de la referencia :

$$R(Z) = \frac{Rn(1) + Rn(2) Z^{-1} + Rn(3) Z^{-2}}{Rd(1) + Rd(2) Z^{-1} + Rd(3) Z^{-2}}$$

D. BLOQUE PARA EL POLINOMIO DEL CONTROLADOR D(Z).

En este bloque se calculan y almacenan los tres términos del numerador de la función de transferencia del controlador D(Z) de la ecuación (8).

Para esto, se utilizan los valores de las constantes Kc, Ts, Td y Pi del controlador. Los valores son almacenados en las variables Gn(1), Gn(2) y Gn(3). Los valores de los coeficientes del denominador de D(Z) se almacenan en Gd(1) y Gd(2) :

$$D(Z) = \frac{Gn(1) + Gn(2) Z^{-1} + Gn(3) Z^{-2}}{Gd(1) + Gd(2) Z^{-1}} \quad (15)$$

E. BLOQUE PARA EL POLINOMIO DEL PROCESO Y EL RETENEDOR HGp(Z).

Dentro de este bloque, se calculan y almacenan los valores de los numeradores y denominador común, de los términos entre llaves de la función de transferencia de HGp(Z), mostrada en la ecuación (10).

Los coeficientes de los numeradores se almacenan en Gp(N+2), Gp(N+3) y Gp(N+4). Los coeficientes del denominador común, en G1p(1), G1p(2) y G1p(3) :

$$HGp(Z) = \frac{Gp(N+2)Z^{-1} + Gp(N+3)Z^{-2} + Gp(N+4)Z^{-3}}{G1p(1) - G1p(2)Z^{-1} + G1p(3)Z^{-2}} \quad (16)$$

F. BLOQUE DEL PRODUCTO Y COCIENTE DE LAS ECUACIONES DE SALIDA C(Z).

Dentro de este bloque, se calculan los productos y el cociente de las ecuaciones (1) y (2), para la -

salida a un cambio de referencia ó cambio de carga - respectivamente. Para realizar esto, se cumple con - la siguiente secuencia :

- I) Para un cambio de referencia, continuar con el paso VI.

Para un cambio de carga se consideran las siguientes relaciones :

$$D(Z) = \frac{G_n(Z)}{G_d(Z)} ; G_pL(Z) = \frac{G_p(Z)}{D_u(Z) G_{1p}(Z)} ;$$

$$HG_p(Z) = \frac{G_p(Z)}{G_{1p}(Z)}$$

en donde :  $D_u(Z)$  es el término  $(1-Z^{-1})$  causado por la carga, en la ecuación (11).

- II) Posteriormente, se efectúa la siguiente asignación:

$$L_d(Z) = D_u(Z) G_{1p}(Z)$$

por lo tanto :

$$G_pL(Z) = \frac{G_p(Z)}{L_d(Z)}$$

- III) Ahora, considerando la ecuación (2), tenemos que :

$$C(Z) = \frac{\frac{G_p(Z)}{L_d(Z)}}{1 + \left( \frac{G_n(Z)}{G_d(Z)} \times \frac{G_p(Z)}{G_{1p}(Z)} \right)} \quad (17)$$

multiplicando el numerador y denominador de (17) por el término :

$L_d(Z)G_d(Z)G_{1p}(Z)$  , se tiene que :

$$C(Z) = \frac{G_p(Z)G_d(Z)G_{1p}(Z)}{L_d(Z) [G_d(Z)G_{1p}(Z) + G_n(Z)G_p(Z)]} \quad (18)$$

IV) Ahora, se realizan las siguientes asignaciones :

$$P1(Z) = G_n(Z)G_p(Z)$$

$$P3(Z) = G1_p(Z)G_d(Z)$$

$$P4(Z) = P1(Z) + P3(Z)$$

sustituyendo en la ecuación (18) :

$$C(Z) = \frac{G_p(Z)P3(Z)}{L_d(Z)P4(Z)} \quad (19)$$

V) De lo anterior, se obtienen el numerador y denominador de la ecuación (19) como sigue :

$$P2(Z) = G_p(Z)P3(Z)$$

$$\text{y } D_e(Z) = P4(Z)L_d(Z)$$

con estos valores, continuar en el paso X.

VI) Para un cambio de referencia se consideran las siguientes relaciones :

$$D(Z) = \frac{G_n(Z)}{G_d(Z)} ; HG_p(Z) = \frac{G_p(Z)}{G1_p(Z)} ; R(Z) = \frac{R_n(Z)}{R_d(Z)}$$

VII) Considerando la ecuación (1), tenemos que :

$$C(Z) = \frac{\frac{G_n(Z)}{G_d(Z)} \times \frac{G_p(Z)}{G1_p(Z)}}{1 + \left( \frac{G_n(Z)}{G_d(Z)} \times \frac{G_p(Z)}{G1_p(Z)} \right)} \times \frac{R_n(Z)}{R_d(Z)} \quad (20)$$

multiplicando el numerador y denominador de (20), por el término :

$G_d(Z)G1_p(Z)$  , se tiene lo siguiente :

$$C(Z) = \frac{G_n(Z)G_p(Z)}{G_d(Z)G1_p(Z) + G_n(Z)G_p(Z)} \times \frac{R_n(Z)}{R_d(Z)} \quad (21)$$



VIII) Ahora, se realizan las siguientes asignaciones :

$$P1(Z) = Cn(Z)Gp(Z)$$

$$P3(Z) = G1p(Z)Gd(Z)$$

$$P4(Z) = P1(Z) + P3(Z)$$

sustituyendo en la ecuación (21) :

$$C(Z) = \frac{P1(Z)}{P4(Z)} \times \frac{Rn(Z)}{Rd(Z)} \quad (22)$$

IX) De lo anterior, se obtienen el numerador y denominador de la ecuación (22) como sigue :

$$P2(Z) = P1(Z)Rn(Z)$$

$$\text{y } De(Z) = P4(Z)Rd(Z)$$

X) Una vez obtenidos los valores del numerador y del denominador de la ecuación (1) ó de la ecuación (2), se procede a realizar el cociente :

$$C(Z) = \frac{P2(Z)}{De(Z)} ;$$

una vez realizado el cociente anterior por división larga, se obtiene :

$$C(Z) = C(0) + C(1) Z^{-1} + C(2) Z^{-2} + \dots + C(K) Z^{-K}$$

con lo que se obtiene la respuesta en el tiempo  $KT$ , para  $K=30$  ó  $K=50$  instantes de muestreo (en el programa  $Im=K$ ). Los valores muestreados, se almacenan en el arreglo  $Rs(I)$ .

#### G. BLOQUE PARA IMPRIMIR PARAMETROS.

Este bloque suministra un reporte impreso con los siguientes parámetros :

a) Valor del orden del proceso (od).

- b) Valor de la ganancia del proceso ( $K_p$ ).
- c) Valor de la constante  $T_1$  ( $T_1$ ).
- d) Si el orden del proceso es 2, imprime el valor de la constante  $T_2$  ( $T_2$ ).
- e) En forma tabular, los valores de las constantes  $K_c$ ,  $T_I$ , y  $T_D$  del controlador, para tres diferentes conjuntos de valores de ( $K_{contr}$ , -  
Intg, Deriv).
- f) (1) para cambio de carga; (2) para cambio de referencia.
- g) Si hay cambio de carga o si la referencia es un escalón unitario, pasar al bloque H. De lo contrario, imprimir los coeficientes del numerador  $R_n$ , y del denominador  $R_d$ , de la referencia  $R(Z)$ .

#### H. BLOQUE DE GRAFICACION.

Dentro de este bloque, se realiza lo siguiente :

- i) Se inicia el paquete de graficación (instrucción GINIT).
- ii) Se define la zona de graficación en la pantalla; se definen, escalan y rotulan los ejes de coordenadas.
- iii) Se inicia un ciclo iterativo para graficar sucesivamente cada valor de respuesta  $C(KT)$ , obtenidos en el bloque F, almacenados en el arreglo  $--R_s(I)$ , contra el contador del instante de muestreo:

Graficar :  $Q$  Vs  $R_s(Q+1)$

ó PLOT  $Q, R_s(Q+1)$ , para  $Q= 0, 1, 2, \dots, I_m$

- iv) Se cierra el ciclo iniciado en el paso iii.

#### I. BLOQUE PARA IMPRESION DE LA TABLA.

Este bloque suministra un listado en forma tabular de los siguientes conceptos :

- Instante de Muestreo.
- Valor de Salida  $C_n(KT)$ , para  $n= 1, 2, 3$ .

4.6 LISTADO DEL PROGRAMA SIMDISC.

\*\*\* Programa Simulacion de Sistemas Discretos \*\*\*

```

5  !--- PROGRAMA SIMDISC SIMULACION DE SISTEMAS DISCRETOS DE
10 !--- LAZO CERRADO
15 !--- FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES CUAUTITLAN U.N.A.M.
20 !--- ELABORADO COMO TRABAJO DE TESIS POR :
25 !--- SUSTENTANTE : Felipe Zetina Perez
30 !--- ASESOR      : Ing. Nicolas Calva Tapia
35 !--- ELABORADO EN LA UNIDAD DE COMPUTO DE LA F.E.S.C.
40 DIM Gn(20),Gp(20),Gd(20),Glp(20),Rd(20),Rn(20),F1(20),F2(20)
45 DIM F3(20),P4(20),F5(20),P6(20),De(20),Ln(20),Ld(20),Du(20)
50 DIM Rs(63),Tr(63),Tb(3,63),Kcontr(3),Intg(3),Deriv(3)
55 GINIT
60 Otro=0
65 Icont=0
70 FOR Q=1 TO 3
75 Kcontr(Q)=0
80 Intg(Q)=0
85 Deriv(Q)=0
90 NEXT Q
95 FOR Q=1 TO 63
100 Tb(1,Q)=0
105 Tb(2,Q)=0
110 Tb(3,Q)=0
115 NEXT Q
120 GOSUB 2130
125 GOSUB 1685
130 GOSUB 1755
135 INPUT "VALOR DEL ORDEN DEL PROCESO ",Od
140 IF Od<>1 AND Od<>2 THEN 135
145 ON Od GOTO 150,225
150 GOSUB 2130
155 PRINT "VALORES DE : KP,TAUP1,TSAMP,THETA"
160 INPUT "KP=",Kp
165 PRINT "VALOR DE KP=";Kp
170 INPUT "TAUP1=",T1
175 PRINT "VALOR DE TAUP1=";T1
180 INPUT "TSAMP=",Ts
185 PRINT "VALOR DE TSAMP=";Ts
190 INPUT "THETA=",Th
195 PRINT "VALOR DE THETA=";Th
200 INPUT "TODD CORRECTO (S/N) ?",Pr$
205 IF Pr$<>"S" AND Pr$<>"N" THEN 200
210 IF Pr$="N" THEN GOTO 150
215 T2=0
220 GOTO 330
225 GOSUB 2130
230 PRINT "VALORES DE : KP,TAUP1,TAUP2,TSAMP,THETA"
235 INPUT "KP=",Kp
240 PRINT "KP=";Kp
245 INPUT "TAUP1=",T1
250 PRINT "TAUP1=";T1
255 INPUT "TAUP2=",T2
260 PRINT "TAUP2=";T2
265 INPUT "TSAMP=",Ts

```

```

270 PRINT "TSAMF=";Ts
275 INPUT "THETA=";Th
280 PRINT "THETA=";Th
285 INPUT "> TODO CORRECTO (S/N) ?";Pr#
290 IF Pr#<>"S" AND Pr#<>"N" THEN 285
295 IF Pr#="N" THEN 225
300 IF T1=T2 THEN
305     PRINT TABXY(10,10);"** TAUP1 Y TAUP2";
310     PRINT " DEBEN SER DIFERENTES **"
315     GOTO 245
320 ELSE
325 END IF
330 Icont=Icont+1
335 GOSUB 2130
340 PRINT "VALORES DE : KC, TI, TD; DEL CONTROLADOR"
345 INPUT "KC=";Kc
350 PRINT "VALOR DE KC=";Kc
355 INPUT "TI=";Ti
360 PRINT "VALOR DE TI=";Ti
365 INPUT "TD=";Td
370 PRINT "VALOR DE TD=";Td
375 INPUT "> TODO CORRECTO (S/N) ?";Pr#
380 IF Pr#<>"S" AND Pr#<>"N" THEN 375
385 IF Pr#="N" THEN 335
390 Kcontr(Icont)=Kc
395 Intg(Icont)=Ti
400 Deriv(Icont)=Td
405 Qu=Th/Ts
410 N=INT(Qu)
415 M=1-(Th/Ts-N)
420 E1=EXP(-Ts/T1)
425 L=N+6
430 E2=EXP(-M*Ts/T1)
435 IF T2<>0 THEN
440     E2=EXP(-Ts/T2)
445     Em=EXP(-M*Ts/T2)
450 ELSE
455     E2=0
460     Em=0
465 END IF
470 GOSUB 2130
475 PRINT "[1] CAMBIO DE CARGA ; [2] CAMBIO DE REFERENCIA ;"
480 INPUT "> METER OPCION ";K1
485 IF K1<>1 AND K1<>2 THEN 480
490 INPUT "> TODO CORRECTO (S/N) ?";Pr#
495 IF Pr#<>"S" AND Pr#<>"N" THEN 490
500 IF Pr#="N" THEN 470
505 ---- INICIALIZACION DE LOS POLINOMIOS :
510 GOSUB 1735
515 ---- ESTABLECER EL POLINOMIO PARA LA REFERENCIA :
520 IF K1=1 THEN 745
525 GOSUB 2130
530 INPUT "RESPUESTA PARA UN ESCALON UNITARIO (S/N) ?";K2#
535 K3#="NO"

```

```

540 IF K2<<"S" AND K2<<"N" THEN 525
545 IF K2=="S" THEN
550     K3$="SI"
555     GOTO 730
560 ELSE
565 END IF
570 GOSUB 2130
575 PRINT "INTRODUCIR # DE TERMINOS DEL NUMER.:";
580 PRINT " Y DENOMIN. DE R(Z) :";
585 INPUT "NUMERADOR:";In
590 PRINT "NUMERADOR :";In
595 INPUT "DENOMINADOR :";Id
600 PRINT "DENOMINADOR :";Id
605 INPUT "> TODO CORRECTO (S/N) ?";Pr$
610 IF Pr<<"S" AND Pr<<"N" THEN 605
615 IF Pr=="N" THEN 570
620 IF In>Id THEN
625     Ir=In
630 ELSE
635     Ir=Id
640 END IF
645 L=L-1+Ir
650 GOSUB 2130
655 PRINT "INTRODUCIR COEFS. DEL NUMER., TERMINO X TERMINO:"
660 FOR I=1 TO In
665     INPUT Rn(I)
670     PRINT "RN(";I;")=";Rn(I);
675 NEXT I
680 PRINT
685 PRINT "INTRODUCIR COEFS. DEL DENOMIN., TERMINO X TERMINO:"
690 FOR I=1 TO Id
695     INPUT Rd(I)
700     PRINT "RD(";I;")=";Rd(I);
705 NEXT I
710 INPUT "> TODO CORRECTO (S/N) ?";Pr$
715 IF Pr<<"N" AND Pr<<"S" THEN 710
720 IF Pr=="N" THEN 650
725 GOTO 745
730 Rn(1)=1
735 Rd(1)=1
740 Rd(2)=-1
745 !--- ESTABLECER EL POLINOMIO PARA D(Z):
750 Gn(1)=Kc*(1+Ts/T1+Td/Ts)
755 Gn(2)=-Kc*(1+2*Td/Ts)
760 Gn(3)=Kc*Td/Ts
765 Gd(1)=1
770 Gd(2)=-1
775 !--- ESTABLECER EL POLINOMIO PARA EL PROCESO HB(Z) Y LG(Z):
780 Gp(N+2)=Kp*(1+(T1*Ex-T2*Em)/(T2-T1))
785 Te=(T1*Ex*(1+E2)-T2*Em*(1+E1))
790 Gp(N+3)=-Kp*(E1+E2+Te/(T2-T1))
795 Tp=T1*Ex+E2-T2*Em+E1
800 Gp(N+4)=Kp*(E1+E2+Tp/(T2-T1))
805 G1p(1)=1

```

```

810   G1p(2)=-1*(E1+E2)
815   G1p(3)=E1*E2
820   IF K1=2 THEN 865
825   Du(1)=1
830   Du(2)=-1
835   FOR I=1 TO L
840       Ld(I)=0
845       FOR J=1 TO I
850           Ld(I)=Ld(I)+Du(J)*G1p(I+1-J)
855       NEXT J
860   NEXT I
865   !--- REALIZAR PRODUCTOS :
870   FOR I=1 TO L
875       P1(I)=0
880       FOR J=1 TO I
885           P1(I)=P1(I)+Gn(J)*Gp(I+1-J)
890       NEXT J
895   NEXT I
900   FOR I=1 TO L
905       P3(I)=0
910       FOR J=1 TO I
915           P3(I)=P3(I)+G1p(J)*Gd(I+1-J)
920       NEXT J
925   NEXT I
930   FOR I=1 TO L
935       P4(I)=P1(I)+P3(I)
940   NEXT I
945   IF K1=2 THEN 1015
950   FOR I=1 TO L
955       P2(I)=0
960       FOR J=1 TO I
965           P2(I)=P2(I)+Gp(J)*P3(I+1-J)
970       NEXT J
975   NEXT I
980   FOR I=1 TO L
985       De(I)=0
990       FOR J=1 TO I
995           De(I)=De(I)+P4(J)*Ld(I+1-J)
1000      NEXT J
1005   NEXT I
1010   GOTO 1075
1015   FOR I=1 TO L
1020       P2(I)=0
1025       FOR J=1 TO I
1030           P2(I)=P2(I)+P1(J)*Rn(I+1-J)
1035       NEXT J
1040   NEXT I
1045   FOR I=1 TO L
1050       De(I)=0
1055       FOR J=1 TO I
1060           De(I)=De(I)+P4(J)*Rd(I+1-J)
1065       NEXT J
1070   NEXT I

```

```

1075 FOR I=2 TO L
1080     P2(I)=P2(I)/De(1)
1085     De(I)=De(I)/De(1)
1090 NEXT I
1095 P2(1)=P2(1)/De(1)
1100 De(1)=1
1105!---- TABLA DE VALORES MUSTREADOS :
1110 GOSUB 2130
1115 PRINT "> CUANTOS INSTANTES DE MUESTREO (30,50) : ?"
1120 INPUT Im
1125 IF Im<>30 AND Im<>50 THEN 1120
1130 PRINT TAB(10);"INST.DE MUESTREO     VALOR DE SALIDA"
1135 PRINT TAB(10);"-----"
1140 PRINT
1145 I=0
1150 P2(L+1)=0
1155 Ro=P2(1)
1160 PRINT USING "15X,DDD,16X,SDDDDD.DDDD";I;Ro
1165 Rs(I+1)=Ro
1170 Tb(Icont,I+1)=Ro
1175 FOR J=1 TO L
1180     P2(J)=P2(J+1)-De(J+1)*Ro
1185 NEXT J
1190 I=I+1
1195 IF I<=Im+1 THEN 1155
1200 INPUT "> IMPRIMIR LOS PARAMETROS ? (S/N)",Pr$
1205 IF Pr$="S" THEN GOSUB Imparam
1210 GOSUB Encuentra
1215 Graf:!--- BLOQUE DE GRAFICACION :
1220 IF Otro=1 THEN 1245
1225 Xmax=Im+1
1230 Xmin=0
1235 Ymax=Ls
1240 Ymin=Li
1245 PRINT
1250 PRINT "XMIN=";Xmin,"XMAX=";Xmax
1255 PRINT "YMIN=";Ymin,"YMAX=";Ymax
1260 PRINT
1265 INPUT "> ESCALA DEL EJE Y : ",Escy
1270 PRINT "*** PARA CONTINUAR, PRESIONAR [CONTINUE] ***"
1275 PAUSE
1280 OUTPUT 2 USING "#,K";CHR*(255)&"K"
1285!---- ROTULAR : ENCABEZADO Y EJES :
1290 GRAPHICS ON
1295 CSIZE 6
1300 LORG 6
1305 Xgmax=100*MAX(1,RATIO)
1310 Ygmax=100*MAX(1,1/RATIO)
1315 FOR I=-.25 TO .25 STEP .1
1320     MOVE Xgmax/2+I,Ygmax
1325     LABEL "Respuesta del Sistema"
1330 NEXT I
1335 DEG
1340 LDIR 90

```

```

1345 CSIZE 4
1350 LORG 4
1355 MOVE 5,Ygmax/2
1360 LABEL "Valor de C(KT)"
1365 LDIR 0
1370 MOVE Xgmax/2,.07*Ygmax
1375 LABEL "Instante de Muestreo (KT)"
1380!---- DEFINIR ZONA DE GRAFICACION :
1385 VIEWPORT 10,120,15,90
1390 FRAME
1395 LORG 5
1400 CSIZE 5
1405 WINDOW Xmin,Xmax,Ymin*Escy,Ymax*Escy
1410 AXES 1,.1,0,0,5,1,3
1415 GRID 10,1,0,0
1420!---- COLOCAR LOS VALORES DE LOS EJES :
1425 CLIP OFF
1430 FOR X=Xmin TO Xmax STEP 10
1435     CSIZE 4
1440     LORG 6
1445     MOVE X,Ymin*Escy
1450     LABEL USING "#,K";X
1455 NEXT X
1460 CLIP OFF
1465 CSIZE 4
1470 FOR Y=INT(Ymin*Escy)-1 TO INT(Ymax*Escy)+1
1475     LORG 2
1480     MOVE -1,Y
1485     LABEL USING " #,K";Y
1490 NEXT Y
1495!---- GRAFICAR LOS VALORES DE LA RESPUESTA :
1500 CSIZE 2.5
1505 LORG 5
1510 CLIP ON
1515 FOR Q=0 TO Im
1520     PLOT Q,Rs(Q+1),-1
1525     LABEL "*"
1530     MOVE Q,Rs(Q+1)
1535     BEEP 250,.05
1540 NEXT Q
1545 PAUSE
1550 GRAPHICS OFF
1555 OUTPUT 2 USING "#,K";CHR$(255)&"K"
1560 INPUT "CAMBIAR LOS VALORES DEL CONTROLADOR ? (S/N)",Pr#
1565 IF Pr#="N" THEN : IMPRIMIR TABLA
1570     GOSUB Imprtab
1575     GOTO 2170
1580 ELSE
1585 END IF
1590 IF Icont=3 THEN
1595     GOSUB Imprtab
1600     GOTO 2170
1605 ELSE
1610 END IF

```



```

1615 Otro=1
1620 GOTO 330 ! PEDIR OTROS DATOS DEL CONTROLADOR
1625 Encuentra: !--- ENCONTRAR LIMITES INFERIOR Y SUPERIOR
1630 Ls=-1.E+300
1635 Li=1.E+300
1640 FOR Ok=1 TO Im-1
1645     IF Rs(Ok)>Rs(Ok+1) THEN 1665
1650     IF Rs(Ok)<Li THEN Li=Rs(Ok)
1655     IF Rs(Ok+1)>Ls THEN Ls=Rs(Ok+1)
1660     GOTO 1675
1665     IF Rs(Ok)>Ls THEN Ls=Rs(Ok)
1670     IF Rs(Ok+1)<Li THEN Li=Rs(Ok+1)
1675 NEXT Ok
1680 RETURN
1685 !--- INICIALIZAR VARIABLES:
1690 T1=0
1695 T2=0
1700 Kp=0
1705 Ts=0
1710 Th=0
1715 Kc=0
1720 T1=0
1725 Td=0
1730 E2=0
1735 Em=0
1740 E1=0
1745 Ex=0
1750 RETURN
1755 !--- INICIALIZAR POLINOMIOS
1760 FOR I=1 TO L
1765     Du(I)=0
1770     Ln(I)=0
1775     Ld(I)=0
1780     Gn(I)=0
1785     Gp(I)=0
1790     Gd(I)=0
1795     G1p(I)=0
1800     Rd(I)=0
1805     Rn(I)=0
1810     P1(I)=0
1815     P2(I)=0
1820     P3(I)=0
1825     P4(I)=0
1830 NEXT I
1835 RETURN
1840 Imparam: !--- IMPRESION DE PARAMETROS
1845 PRINTER IS PRT
1850 PRINT TAB(5); "VALOR DEL ORDEN DEL PROCESO :";Od
1855 IF Od=1 THEN
1860 PRINT TAB(5); "VALORES DE :   KP      TAUP1   TSAMP";
1865 PRINT "      THETA"
1870 PRINT USING "13(X),4(XXXX,DD.DDD)";Kp,T1,Ts,Th
1875 ELSE
1880 PRINT TAB(5); "VALORES DE :   KP      TAUP1   TAUP2";

```

```

1885 PRINT " TSAMP THETA"
1890 PRINT USING "13(X),5(XXXX,DD.DDD)";Kp;T1;T2;Te;Th
1895 END IF
1900 PRINT
1905 PRINT TAB(5);"CONTROLADOR : KC TI TD "
1910 FOR Q=1 TO Icont
1915 PRINT TAB(9);"(";Q;")";
1920 PRINT USING "#,2(3X,DDDD.DDD)";Kcontr(Q);Intg(Q)
1925 PRINT USING "2X,DD.DDD";Deriv(Q)
1930 NEXT Q
1935 PRINT
1940 PRINT TAB(5);"[1] CAMBIO DE CARGA;";
1945 PRINT " [2] CAMBIO DE REFERENCIA --->";K1
1950 PRINT
1955 PRINT TAB(5);"RESPUESTA A UN ESCALON UNITARIO ? ";K3#
1960 IF K3#="NO" THEN
1965 PRINT
1970 PRINT TAB(5);"COEFICIENTES DEL NUMERADOR : "
1975 FOR Q=1 TO In
1980 PRINT TAB(5);"RN(";Q;")=";Rn(Q)
1985 NEXT Q
1990 PRINT
1995 PRINT TAB(5);"COEFICIENTES DEL DENOMINADOR : "
2000 FOR Q=1 TO Id
2005 PRINT TAB(5);"RD(";Q;")=";Rd(Q)
2010 NEXT Q
2015 ELSE
2020 END IF
2025 PRINT
2030 PRINT
2035 PRINTER IS CRT
2040 RETURN
2045 Imprtab: !--- IMPRIMIR TABLA
2050 PRINTER IS PRT
2055 PRINT CHR$(12)
2060 PRINT TAB(15);"F . E . S . C U A U T I T L A N";
2065 PRINT " U . N . A . M ."
2070 PRINT
2075 PRINT TAB(10);"INST. DE MUESTREO";TAB(30);
2080 PRINT "SALIDA C1(KT) SALIDA C2(KT) SALIDA C3(KT)"
2085 PRINT TAB(5);RPT$("- ",70)
2090 PRINT
2095 FOR Q=0 TO Im
2100 PRINT USING "#,16X,DD,12X,SDDD.DDD";Q;Tb(1,Q+1)
2105 PRINT USING "2(8X,SDDD.DDD)";Tb(2,Q+1);Tb(3,Q+1)
2110 NEXT Q
2115 PRINT CHR$(12)
2120 PRINTER IS CRT
2125 RETURN
2130 !--- ENCABEZADO Y BORRAR LA PANTALLA :
2135 OUTPUT 2 USING " #,K";CHR$(255)&"K"
2140 PRINT TAB(10);"---- SIMULACION DE UN SISTEMA DISCR";
2145 PRINT "CRETO ---"
2150 PRINT TAB(15);"---- F.E.S. CUAUTITLAN U.N.A.M. ----"
2155 PRINT
2160 GRAPHICS OFF

```

```
2165 RETURN
2170 !--- FIN DEL PROGRAMA
2175 OUTPUT 2 USING "#,K";CHR$(255)&"K"
2180 PRINT TABXY(10,10);"***** FIN DEL PROGRAMA *****"
2185 GCLEAR
2190 END
```

## 4.7 OPERACION DEL PROGRAMA SIMDISC.

Para operar el programa SIMDISC (simulación de sistemas discretos de lazo cerrado), es necesario cargar el programa - tecleando la siguiente instrucción :

LOAD "SIMDISC" (ENTER)

Posteriormente, presionar la tecla (RUN). A continuación, en la pantalla se pide introducir la siguiente información :

EN LA PANTALLATECLEAR

VALOR DEL ORDEN DEL PROCESO	<u>1</u> <u>6</u> <u>2</u> y ENTER
VALORES DE: KP, TAUP1, TAUP2, TSAMP, THETA KP =	el valor de ganancia Kp y ENTER.
TAUP1 =	el valor de la constante y ENTER.
Si el sistema es de orden 2: TAUP2 =	el valor de la constante y ENTER.
Para orden 1 ó 2 : TSAMP =	el valor del tiempo de mues- treo Ts y ENTER.
THETA =	el valor del tiempo muerto θd y ENTER.
) TODO CORRECTO (S/N)?	<u>S</u> para si, <u>N</u> para no y ENTER.
VALORES DE: KC, TI, TD DEL CON- TROLADOR KC =	el valor de la constante Kc y ENTER.
TI =	el valor de la constante T <sub>I</sub> y ENTER.
TD =	el valor de la constante T <sub>D</sub> y ENTER.
) TODO CORRECTO (S/N)?	<u>S</u> ó <u>N</u> y ENTER.

(1) CAMBIO DE CARGA; (2) CAMBIO DE REFERENCIA : ) METER OPCION :	<u>1</u> <u>6</u> <u>2</u> y ENTER.
) TODO CORRECTO (S/N)?	<u>S</u> <u>6</u> <u>N</u> y ENTER.
Si se eligió un cambio de carga, continuar con tabla de valores muestreados. Si se eligió un cambio de referencia :	
DESEA LA RESPUESTA PARA UN ESCALON UNITARIO (S/N)?	<u>S</u> para un escalón unitario y ENTER. <u>N</u> para otra referencia y ENTER.
Si se eligió un escalón unitario, continuar con tabla de valores muestreados. Si se eligió una referencia diferente :	
INTRODUCIR # DE TERMINOS DEL NUMERADOR Y DENOMINADOR DE R(Z) : NUMERADOR :	el número de términos del numerador de R(Z) y ENTER.
DENOMINADOR :	el número de términos del denominador de R(Z) y ENTER.
) TODO CORRECTO (S/N)?	<u>S</u> <u>6</u> <u>N</u> y ENTER.
INTRODUCIR COEFICIENTES DEL NUMERADOR TERMINO X TERMINO: ?	el valor del primer coeficiente de numerador y ENTER.
Esta operación se repite dependiendo del número de términos del numerador de R(Z).	
INTRODUCIR COEFICIENTES DEL DENOMINADOR TERMINO X TERMINO : ?	el valor del primer coeficiente del denominador y ENTER.
Esta operación se repite dependiendo del número de términos del denominador de R(Z).	
) TODO CORRECTO (S/N)?	<u>S</u> <u>6</u> <u>N</u> y ENTER.
J CUANTOS INSTANTES DE MUESTREO (30 6 50):?	el número de instantes de muestreo: <u>30</u> <u>6</u> <u>50</u> y ENTER.

Posteriormente, en la pantalla aparece desplegada una tabla con los valores del instante de muestreo y de la salida  $C(KT)$ .

Después se pregunta :

) IMPRIMIR PARAMETROS ? (S/N)

Si se desea imprimir los parámetros del sistema, asegurarse de que el impresor esté listo, teclear S y ENTER. De lo contrario teclear N y ENTER.

A continuación, aparece en la pantalla la siguiente información :

XMIN = ...                    XMAX = ...

YMIN = ...                    YMAX = ...

donde : XMIN, XMAX son los valores mínimo y máximo del eje horizontal de la gráfica; YMIN, YMAX son los valores mínimo y máximo de la salida  $C(KT)$ , en la gráfica.

En seguida, se pide introducir el factor de escala del eje vertical (valores de  $C(KT)$ ), se recomienda comenzar con un valor de 1.1 :

) ESCALA DEL EJE Y :

Después de teclear el valor de la escala, para continuar, presionar la tecla (CONTINUE)

Con lo anterior, en la pantalla aparece la gráfica -- que muestra la "Respuesta del Sistema".

Si se desea imprimir la gráfica, presionar simultáneamente las teclas :

(SHIFT) (GRAPHICS)

Para continuar, presionar la tecla (CONTINUE).

Posteriormente, se pregunta si se quieren cambiar los valores del controlador :

) CAMBIAR LOS VALORES DEL CONTROLADOR ? (S/N)

Si no se quieren cambiar, teclear N y ENTER, con lo cual, en el impresor saldrá la tabla con los valores del instante muestreado y el valor de salida  $C(KT)$ . Después de la impresión, el programa finaliza. Esto da oportunidad de analizar otro sistema, presionando la tecla (RUN), o de cargar un programa diferente.

Si se desea analizar la salida del mismo sistema, para otros valores del controlador, teclear S y ENTER. Inmediatamente, se pregunta por los nuevos valores del controlador -- ( $K_c$ ,  $T_I$ ,  $T_D$ ). Después de dar estos datos, se debe dar la misma información utilizada para los primeros valores de controlador.

Esta operación se puede repetir sólo dos veces, y como resultado, se obtendrá una gráfica con la respuesta para -- tres valores diferentes del controlador.

Nota: En este último caso, se recomienda realizar la impresión de los parámetros, la gráfica y de la tabla, después de dar el tercer juego de valores del controlador con el objeto de que sólo se obtengan, para los tres juegos de valores en la misma impresión (ver ejemplo 4.5).

Después de la impresión de los parámetros, la gráfica y la tabla, el programa finaliza. Esto da oportunidad de -- analizar otro sistema, presionando la tecla (RUN), ó de cargar un programa diferente.

#### 4.8 EJEMPLOS DE SIMULACION DE SISTEMAS DISCRETOS.

A continuación, se ilustran algunos ejemplos cuyas funciones de transferencia del proceso son :

$$4.1) G_p(S) = \frac{e^{-.76S}}{(S + 0.4)} \quad , \quad T_s = 0.5$$

Controlador:  $K_c = 0.3$ ,  $T_I = 0.5$ ,  $T_D = 0$

Respuesta para: Escalón Unitario.

$$4.2) G_p(S) = \frac{e^{-.76S}}{(S + 0.4) S} \quad , \quad T_s = 0.5$$

Controlador:  $K_c = 0.3$ ,  $T_I = 0.5$ ,  $T_D = 0$

Respuesta para: Cambio de Carga.

$$4.3) G_p(S) = \frac{5}{(S + 1)(S + .5)} \quad , \quad T_s = 0.1$$

Controlador :  $K_c = 0.5$ ,  $T_I = 1$ ,  $T_D = 0$

Respuesta para : Un Impulso.

$$4.4) \quad G_p(S) = \frac{5}{(S+1)(S+.5)} \quad , \quad T_s = 0.1$$

Controlador :  $K_c = 0.5, T_I = 1, T_D = 0$

Respuesta para : Una Rampa.

$$4.5) \quad G_p(S) = \frac{5}{(S+1)(S+.5)} \quad , \quad T_s = 0.1$$

Controlador :

$$1. - K_c = 1, T_I = 1, T_D = 0$$

$$2. - K_c = 1.45, T_I = 1.45, T_D = 0.296$$

$$3. - K_c = 1, T_I = 1000, T_D = 0$$

Respuesta para : Escalón Unitario.

$$4.5.B) \quad G_p(S) = \frac{5}{(S+1)(S+.5)} \quad , \quad T_s = 0.1$$

Controlador :

$$1. - K_c = 0.5, T_I = 1, T_D = 0$$

$$2. - K_c = 0.25, T_I = 1, T_D = 0$$

Respuesta para : Escalón Unitario.

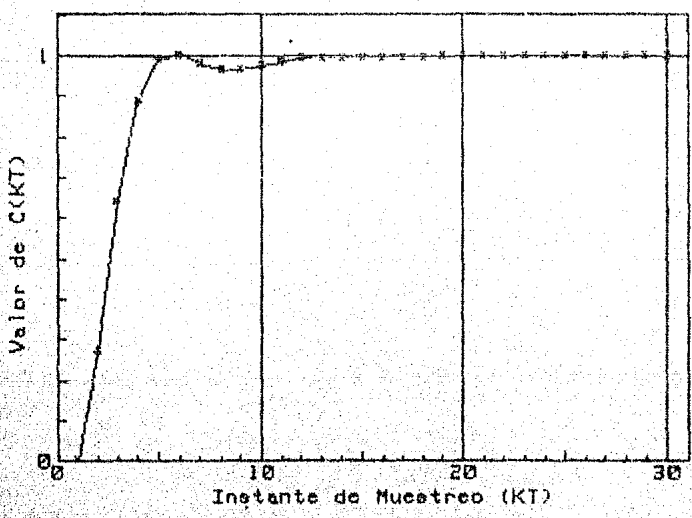


### EJEMPLO 4.1

VALOR DEL ORDEN DEL PROCESO : 1  
VALORES DE : KP      TAUP1      TSAMP      THETA      .760  
                 1.000      .400      .500  
CONTROLADOR : KC      TI      TD  
( 1 )      .300      .500      0.000

[1] CAMBIO DE CARGA; [2] CAMBIO DE REFERENCIA ---> 2  
RESPUESTA A UN ESCALON UNITARIO ? SI

### Respuesta del Sistema



## EJEMPLO 4.1

F. E. S. C U A U T I T L A N U . N . A . M .

INST. DE MUESTREO	SALIDA C1(KT)	SALIDA C2(KT)	SALIDA C3(KT)
0	+0.000	+0.000	+0.000
1	+0.000	+0.000	+0.000
2	+ .271	+0.000	+0.000
3	+ .641	+0.000	+0.000
4	+ .888	+0.000	+0.000
5	+ .993	+0.000	+0.000
6	+1.004	+0.000	+0.000
7	+ .983	+0.000	+0.000
8	+ .968	+0.000	+0.000
9	+ .967	+0.000	+0.000
10	+ .976	+0.000	+0.000
11	+ .987	+0.000	+0.000
12	+ .995	+0.000	+0.000
13	+ .999	+0.000	+0.000
14	+ .999	+0.000	+0.000
15	+ .999	+0.000	+0.000
16	+ .999	+0.000	+0.000
17	+ .999	+0.000	+0.000
18	+ .999	+0.000	+0.000
19	+1.000	+0.000	+0.000
20	+1.000	+0.000	+0.000
21	+1.000	+0.000	+0.000
22	+1.000	+0.000	+0.000
23	+1.000	+0.000	+0.000
24	+1.000	+0.000	+0.000
25	+1.000	+0.000	+0.000
26	+1.000	+0.000	+0.000
27	+1.000	+0.000	+0.000
28	+1.000	+0.000	+0.000
29	+1.000	+0.000	+0.000
30	+1.000	+0.000	+0.000

---

0	+0.000	+0.000	+0.000
1	+0.000	+0.000	+0.000
2	+ .271	+0.000	+0.000
3	+ .641	+0.000	+0.000
4	+ .888	+0.000	+0.000
5	+ .993	+0.000	+0.000
6	+1.004	+0.000	+0.000
7	+ .983	+0.000	+0.000
8	+ .968	+0.000	+0.000
9	+ .967	+0.000	+0.000
10	+ .976	+0.000	+0.000
11	+ .987	+0.000	+0.000
12	+ .995	+0.000	+0.000
13	+ .999	+0.000	+0.000
14	+ .999	+0.000	+0.000
15	+ .999	+0.000	+0.000
16	+ .999	+0.000	+0.000
17	+ .999	+0.000	+0.000
18	+ .999	+0.000	+0.000
19	+1.000	+0.000	+0.000
20	+1.000	+0.000	+0.000
21	+1.000	+0.000	+0.000
22	+1.000	+0.000	+0.000
23	+1.000	+0.000	+0.000
24	+1.000	+0.000	+0.000
25	+1.000	+0.000	+0.000
26	+1.000	+0.000	+0.000
27	+1.000	+0.000	+0.000
28	+1.000	+0.000	+0.000
29	+1.000	+0.000	+0.000
30	+1.000	+0.000	+0.000

## EJEMPLO 4.2

VALOR DEL ORDEN DEL PROCESO : 2

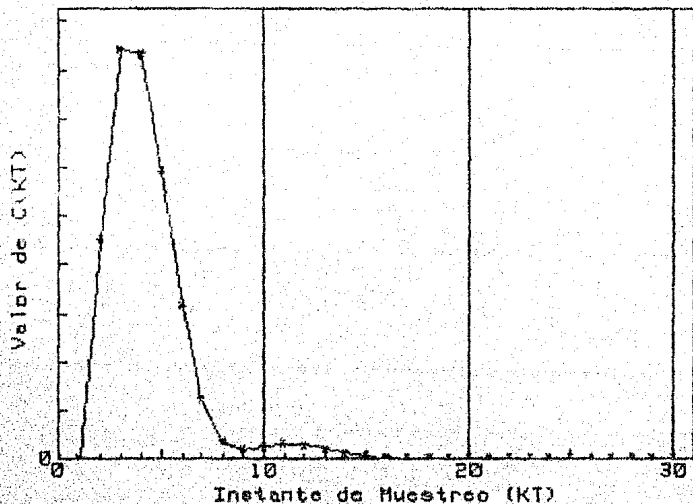
VALORES DE :	KP	TAUP1	TAUP2	TSAMP	THETA	
	1.000	.400	.400	0.000	.500	.760

CONTROLADOR :	KC	TI	TD
( 1 )	.300	.500	0.000

[1] CAMBIO DE CARGA; [2] CAMBIO DE REFERENCIA ---&gt; 1

RESPUESTA A UN ESCALON UNITARIO ?

## Respuesta del Sistema



## EJEMPLO 4.2

F. E. S. CUAUTITLAN U. N. A. M.

INST. DE MUESTREO SALIDA C1 (KT) SALIDA C2 (KT) SALIDA C3 (KT)

INST. DE MUESTREO	SALIDA C1 (KT)	SALIDA C2 (KT)	SALIDA C3 (KT)
0	+0.000	+0.000	+0.000
1	+0.000	+0.000	+0.000
2	+ .451	+0.000	+0.000
3	+ .843	+0.000	+0.000
4	+ .833	+0.000	+0.000
5	+ .592	+0.000	+0.000
6	+ .314	+0.000	+0.000
7	+ .123	+0.000	+0.000
8	+ .035	+0.000	+0.000
9	+ .016	+0.000	+0.000
10	+ .024	+0.000	+0.000
11	+ .030	+0.000	+0.000
12	+ .028	+0.000	+0.000
13	+ .020	+0.000	+0.000
14	+ .011	+0.000	+0.000
15	+ .005	+0.000	+0.000
16	+ .002	+0.000	+0.000
17	+ .001	+0.000	+0.000
18	+ .001	+0.000	+0.000
19	+ .001	+0.000	+0.000
20	+ .001	+0.000	+0.000
21	+ .001	+0.000	+0.000
22	+0.000	+0.000	+0.000
23	+0.000	+0.000	+0.000
24	+0.000	+0.000	+0.000
25	+0.000	+0.000	+0.000
26	+0.000	+0.000	+0.000
27	+0.000	+0.000	+0.000
28	+0.000	+0.000	+0.000
29	+0.000	+0.000	+0.000
30	+0.000	+0.000	+0.000

## EJEMPLO 4.3

VALOR DEL ORDEN DEL PROCESO : 2

VALORES DE :	KP	TAUP1	TAUP2	TSAMP	THETA	
	5.000	1.000		.500	.100	0.000

CONTROLADOR :	KC	TI	TD
( 1 )	.500	1.000	0.000

[1] CAMBIO DE CARGA; [2] CAMBIO DE REFERENCIA ----&gt; 2

RESPUESTA A UN ESCALON UNITARIO ? NO

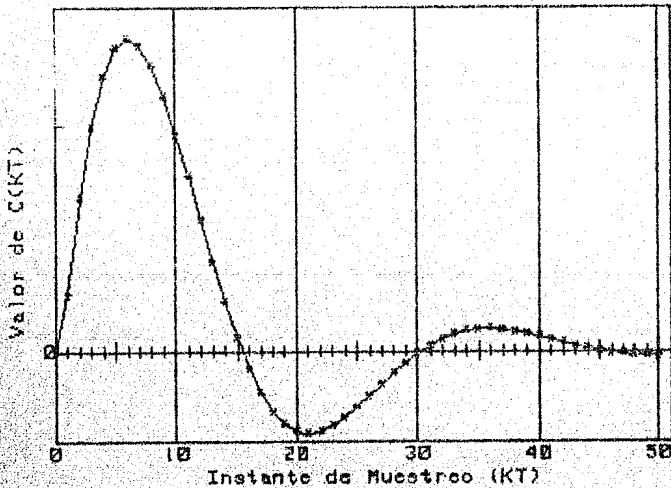
COEFICIENTES DEL NUMERADOR :

RN( 1 ) = 1

COEFICIENTES DEL DENOMINADOR :

RD( 1 ) = 1

## Respuesta del Sistema



## EJEMPLO 4.3

F. E. S. CUAUTITLANU. N. A. M.

INST. DE MUESTREO      SALIDA C1(KT)      SALIDA C2(KT)      SALIDA C3(KT)

INST. DE MUESTREO	SALIDA C1(KT)	SALIDA C2(KT)	SALIDA C3(KT)
0	+0.000	+0.000	+0.000
1	+ .025	+0.000	+0.000
2	+ .067	+0.000	+0.000
3	+ .099	+0.000	+0.000
4	+ .121	+0.000	+0.000
5	+ .134	+0.000	+0.000
6	+ .138	+0.000	+0.000
7	+ .135	+0.000	+0.000
8	+ .126	+0.000	+0.000
9	+ .113	+0.000	+0.000
10	+ .096	+0.000	+0.000
11	+ .078	+0.000	+0.000
12	+ .058	+0.000	+0.000
13	+ .039	+0.000	+0.000
14	+ .022	+0.000	+0.000
15	+ .006	+0.000	+0.000
16	- .008	+0.000	+0.000
17	- .018	+0.000	+0.000
18	- .027	+0.000	+0.000
19	- .032	+0.000	+0.000
20	- .035	+0.000	+0.000
21	- .036	+0.000	+0.000
22	- .035	+0.000	+0.000
23	- .033	+0.000	+0.000
24	- .029	+0.000	+0.000
25	- .025	+0.000	+0.000
26	- .020	+0.000	+0.000
27	- .015	+0.000	+0.000
28	- .010	+0.000	+0.000
29	- .005	+0.000	+0.000
30	- .001	+0.000	+0.000
31	+ .003	+0.000	+0.000
32	+ .005	+0.000	+0.000
33	+ .007	+0.000	+0.000
34	+ .009	+0.000	+0.000
35	+ .010	+0.000	+0.000
36	+ .010	+0.000	+0.000
37	+ .009	+0.000	+0.000
38	+ .007	+0.000	+0.000
39	+ .008	+0.000	+0.000
40	+ .006	+0.000	+0.000
41	+ .005	+0.000	+0.000
42	+ .004	+0.000	+0.000
43	+ .002	+0.000	+0.000
44	+ .001	+0.000	+0.000
45	+0.000	+0.000	+0.000
46	- .001	+0.000	+0.000
47	- .001	+0.000	+0.000
48	- .002	+0.000	+0.000
49	- .002	+0.000	+0.000
50	- .003	+0.000	+0.000

## EJEMPLO 4.4

VALOR DEL ORDEN DEL PROCESO : 2

VALORES DE : KP 5.000 TAUP1 1.000 TAUP2 .500 TSAMP .100 THETA 0.000

CONTROLADOR : KC TI TD  
( 1 ) .500 1.000 0.000

[1] CAMBIO DE CARGA; [2] CAMBIO DE REFERENCIA ---&gt; 2

RESPUESTA A UN ESCALON UNITARIO ? NO

COEFICIENTES DEL NUMERADOR :

RN( 1 )= 0

RN( 2 )= .1

COEFICIENTES DEL DENOMINADOR :

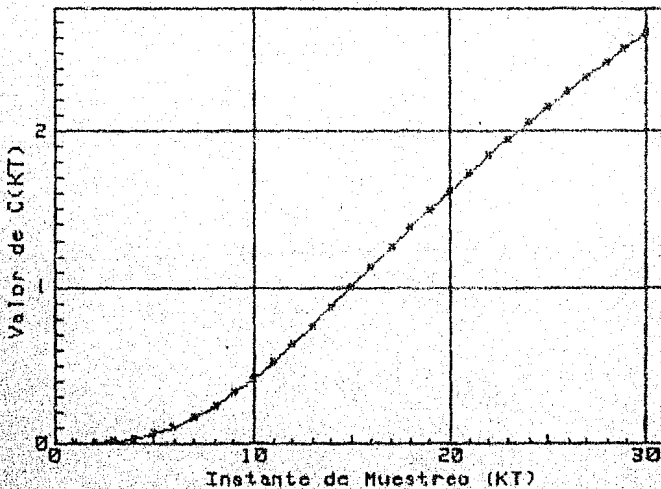
RD( 1 )= 1

RD( 2 )=-2

RD( 3 )= 1

3

## Respuesta del Sistema



## EJEMPLO 4.4

F. E. S. CUAUTITLAN U. N. A. M.

INST. DE MUESTREO	SALIDA C1(KT)	SALIDA C2(KT)	SALIDA C3(KT)
0	+0.000	+0.000	+0.000
1	+0.000	+0.000	+0.000
2	+0.002	+0.000	+0.000
3	+0.012	+0.000	+0.000
4	+0.031	+0.000	+0.000
5	+0.062	+0.000	+0.000
6	+0.107	+0.000	+0.000
7	+0.165	+0.000	+0.000
8	+0.237	+0.000	+0.000
9	+0.322	+0.000	+0.000
10	+0.418	+0.000	+0.000
11	+0.524	+0.000	+0.000
12	+0.637	+0.000	+0.000
13	+0.756	+0.000	+0.000
14	+0.879	+0.000	+0.000
15	+1.004	+0.000	+0.000
16	+1.130	+0.000	+0.000
17	+1.255	+0.000	+0.000
18	+1.379	+0.000	+0.000
19	+1.499	+0.000	+0.000
20	+1.617	+0.000	+0.000
21	+1.730	+0.000	+0.000
22	+1.841	+0.000	+0.000
23	+1.947	+0.000	+0.000
24	+2.051	+0.000	+0.000
25	+2.151	+0.000	+0.000
26	+2.249	+0.000	+0.000
27	+2.345	+0.000	+0.000
28	+2.440	+0.000	+0.000
29	+2.533	+0.000	+0.000
30	+2.626	+0.000	+0.000

---

0	+0.000	+0.000	+0.000
1	+0.000	+0.000	+0.000
2	+0.002	+0.000	+0.000
3	+0.012	+0.000	+0.000
4	+0.031	+0.000	+0.000
5	+0.062	+0.000	+0.000
6	+0.107	+0.000	+0.000
7	+0.165	+0.000	+0.000
8	+0.237	+0.000	+0.000
9	+0.322	+0.000	+0.000
10	+0.418	+0.000	+0.000
11	+0.524	+0.000	+0.000
12	+0.637	+0.000	+0.000
13	+0.756	+0.000	+0.000
14	+0.879	+0.000	+0.000
15	+1.004	+0.000	+0.000
16	+1.130	+0.000	+0.000
17	+1.255	+0.000	+0.000
18	+1.379	+0.000	+0.000
19	+1.499	+0.000	+0.000
20	+1.617	+0.000	+0.000
21	+1.730	+0.000	+0.000
22	+1.841	+0.000	+0.000
23	+1.947	+0.000	+0.000
24	+2.051	+0.000	+0.000
25	+2.151	+0.000	+0.000
26	+2.249	+0.000	+0.000
27	+2.345	+0.000	+0.000
28	+2.440	+0.000	+0.000
29	+2.533	+0.000	+0.000
30	+2.626	+0.000	+0.000



## EJEMPLO 4.5

VALOR DEL ORDEN DEL PROCESO : 2

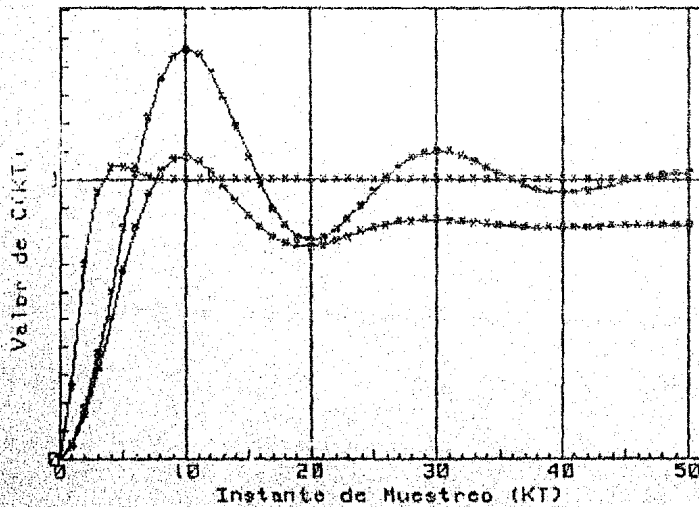
VALORES DE :	KP	TAUP1	TAUP2	TSAMP	THETA	
	5.000	1.000		.500	.100	0.000

CONTROLADOR :	KC	TI	TD
( 1 )	1.000	1.000	0.000
( 2 )	1.450	1.450	.296
( 3 )	1.000	1000.000	0.000

[1] CAMBIO DE CARGA; [2] CAMBIO DE REFERENCIA ---&gt; 2

RESPUESTA A UN ESCALON UNITARIO ? SI

## Respuesta del Sistema



## EJEMPLO 4.5

F. E. S. CUAUTITLANU. N. A. M.

INST. DE MUESTREO	SALIDA C1(KT)	SALIDA C2(KT)	SALIDA C3(KT)
0	+0.000	+0.000	+0.000
1	+0.050	+0.265	+0.045
2	+0.123	+0.700	+0.162
3	+0.375	+0.959	+0.323
4	+0.599	+1.046	+0.502
5	+0.829	+1.047	+0.676
6	+1.043	+1.025	+0.828
7	+1.223	+1.009	+0.948
8	+1.356	+1.000	+1.030
9	+1.436	+0.998	+1.073
10	+1.463	+0.998	+1.083
11	+1.442	+0.998	+1.064
12	+1.382	+0.998	+1.026
13	+1.293	+0.998	+0.976
14	+1.189	+0.998	+0.922
15	+1.081	+0.998	+0.871
16	+0.981	+0.998	+0.827
17	+0.896	+0.998	+0.794
18	+0.833	+0.998	+0.772
19	+0.795	+0.998	+0.761
20	+0.782	+0.998	+0.760
21	+0.791	+0.998	+0.767
22	+0.819	+0.998	+0.779
23	+0.860	+0.998	+0.794
24	+0.908	+0.998	+0.810
25	+0.959	+0.999	+0.828
26	+1.006	+0.999	+0.838
27	+1.046	+0.999	+0.847
28	+1.076	+0.999	+0.853
29	+1.095	+0.999	+0.856
30	+1.101	+0.999	+0.856
31	+1.098	+0.999	+0.853
32	+1.085	+0.999	+0.849
33	+1.066	+0.999	+0.845
34	+1.043	+0.999	+0.840
35	+1.020	+0.999	+0.836
36	+0.998	+0.999	+0.832
37	+0.979	+0.999	+0.829
38	+0.965	+1.000	+0.828
39	+0.956	+1.000	+0.827
40	+0.952	+1.000	+0.828
41	+0.954	+1.000	+0.828
42	+0.960	+1.000	+0.830
43	+0.968	+1.000	+0.831
44	+0.979	+1.000	+0.833
45	+0.990	+1.000	+0.834
46	+1.001	+1.000	+0.835
47	+1.009	+1.000	+0.836
48	+1.016	+1.000	+0.836
49	+1.020	+1.000	+0.836
50	+1.022	+1.000	+0.836

## EJEMPLO 4.5.B

VALOR DEL ORDEN DEL PROCESO : 2

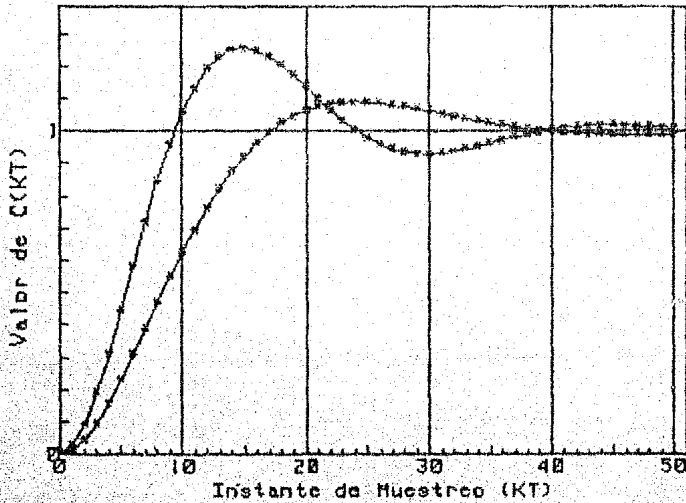
VALORES DE :	KP	TAUF1	TAUF2	TSAMP	THETA	
	5.000	1.000		.500	.100	0.000

CONTROLADOR :	KC	TI	TD
( 1 )	.500	1.000	0.000
( 2 )	.250	1.000	0.000

[1] CAMBIO DE CARGA; [2] CAMBIO DE REFERENCIA ---&gt; 2

RESPUESTA A UN ESCALON UNITARIO ? SI

## Respuesta del Sistema



## EJEMPLO 4.5.B

F. E. S. CUAUTITLANU. N. A. M.

INST. DE MUESTREO	SALIDA C1(KT)	SALIDA C2(KT)	SALIDA C3(KT)
0	+0.000	+0.000	+0.000
1	+0.025	+0.012	+0.000
2	+0.092	+0.046	+0.000
3	+0.191	+0.097	+0.000
4	+0.313	+0.160	+0.000
5	+0.447	+0.232	+0.000
6	+0.585	+0.309	+0.000
7	+0.721	+0.390	+0.000
8	+0.847	+0.470	+0.000
9	+0.960	+0.550	+0.000
10	+1.056	+0.625	+0.000
11	+1.133	+0.697	+0.000
12	+1.192	+0.763	+0.000
13	+1.231	+0.823	+0.000
14	+1.253	+0.876	+0.000
15	+1.259	+0.923	+0.000
16	+1.251	+0.963	+0.000
17	+1.233	+0.997	+0.000
18	+1.206	+1.025	+0.000
19	+1.174	+1.048	+0.000
20	+1.138	+1.065	+0.000
21	+1.102	+1.077	+0.000
22	+1.066	+1.085	+0.000
23	+1.034	+1.090	+0.000
24	+1.004	+1.091	+0.000
25	+0.980	+1.090	+0.000
26	+0.960	+1.087	+0.000
27	+0.946	+1.082	+0.000
28	+0.936	+1.076	+0.000
29	+0.931	+1.070	+0.000
30	+0.930	+1.062	+0.000
31	+0.932	+1.055	+0.000
32	+0.938	+1.047	+0.000
33	+0.945	+1.039	+0.000
34	+0.954	+1.032	+0.000
35	+0.964	+1.026	+0.000
36	+0.973	+1.019	+0.000
37	+0.983	+1.014	+0.000
38	+0.991	+1.009	+0.000
39	+0.999	+1.004	+0.000
40	+1.005	+1.001	+0.000
41	+1.011	+0.998	+0.000
42	+1.014	+0.995	+0.000
43	+1.017	+0.993	+0.000
44	+1.018	+0.992	+0.000
45	+1.018	+0.991	+0.000
46	+1.017	+0.990	+0.000
47	+1.016	+0.990	+0.000
48	+1.014	+0.990	+0.000
49	+1.012	+0.990	+0.000
50	+1.009	+0.991	+0.000

# CONCLUSIONES

+++++

## CONCLUSIONES.

En el desarrollo, construcción y resolución del paquete de "Algoritmos Básicos de Control", se encontraron resultados muy satisfactorios en cuanto a lo esperado, ya que, -- aún en las etapas de desarrollo, fueron adoptados como mecanismos auxiliares en las asignaturas de : Control Analógico, Análisis de Sistemas Discretos, Control Digital Y Elementos de Control Automático; impartidas en la carrera de Ingeniería Mecánica Eléctrica.

Esta satisfactoria adopción, abre una pauta para la implementación de algoritmos computarizados, en aquellas áreas que así lo requieran.

También se observó, que con el equipo HP-9816, ---- que es uno de los mas elementales con los que cuenta la Unidad de Cómputo de la F.E.S.C., es posible implementar dichos algoritmos.

Respecto a los resultados de los análisis realizados por cada uno de los algoritmos, se tiene lo siguiente :

1. Para la respuesta en frecuencia de sistemas continuos y discretos.

1.a. La representación de las Gráficas de Bode, ofrecen una resolución bastante clara de la la respuesta en frecuencia, tanto para un sistema continuo como para uno discreto.

1.b. La velocidad con la que se obtienen los resultados es satisfactoria.

2. Para el lugar geométrico de las raíces de sistemas continuos y discretos.

2.a. La representación gráfica del Lugar Geométrico no tiene tanta resolución como las Gráficas de Bode, esto se debe a que, si se desea dar mayor resolución, aumenta el tiempo de respuesta del programa porque el número de puntos calculados se eleva -- y junto con ello también la cantidad de memoria -- utilizada. Por esta última razón, y por la capacidad del equipo utilizado, sólo se pueden calcular a lo más 2000 puntos para el lugar geométrico.

No obstante, la gráfica aporta información acepta ble para determinar la estabilidad relativa del sistema.

2.b. La velocidad de respuesta del algoritmo, disminuye según el número de puntos a graficar y del número de polos del sistema. Esta dificultad podría salvarse con un equipo de mayor velocidad de proceso o bajo cierta medida, utilizando convenientemente los límites de la ganancia  $K$  y su incremento.

3. Para las gráficas de Nyquist de sistemas continuos y discretos.

3.a. La representación de las Gráficas de Nyquist, --- ofrece una resolución bastante clara. Además, --- ofrece directamente los valores de los márgenes -- de ganancia y fase. También ofrece la oportunidad de comparar ,en la misma gráfica, trayectorias -- con 3 diferentes valores de ganancia.

3.b. La velocidad del programa, disminuye en razón inversa con el número de puntos a calcular. Esta di ficultad puede solventarse, eligiendo convenientemente los valores de la frecuencia máxima y su in



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

nombre  
MA, CONSTANTINA PARRA  
MOLINA  
nombromiento



ACADEMICO  
r.f.c. ingreso  
PAMC-560310 10-IV-80  
expediente expedicion  
78173 19-XI-81

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

CHEQUE No. I-1040233

NOMBRE DEL BENEFICIARIO			REG. FEDERAL	UNION	AÑO	No. CHEQUE
DESCUENTOS			IMPORTE	COD	PROGRAMATICO	
4410103 6 PARRA MA CONSTANTINA			PAMC560310	18 86	1040233	
SERV M ISSSTE			23,480.00	13044410111703		
FONDO PENSION			2,818.00	13044410111903		
SEG PROF INV			820.00	13044410134203		
A PAUNAM 025						
D. VALE TIENDA						
A SUELDOS						
TOTAL DESCUENTOS			TOTAL PERCEPCIONES			
9,766.11			27,118.00	17,351.89		

IMPORTE NETO

VER NOTA AL REVERSO VALE U.N.A.M. \* ( 44101 )

**ISSSTE** INSTITUTO FEDERAL DE SERVICIOS Y PLANIFICACION ECONOMICA Y ADMINISTRATIVA

CONFECCION DE VALORES DE DEPÓSITO EN LA CUENTA DE AHORRO DE LOS SERVIDORES EN EL ISSSTE

NO. DE CUENTA: 4410103675

IMPORTE: \$ 9,766.11

FECHA: 1981

VALIDA EN TODAS LAS CASAS DE CREDITO DEL ISSSTE

RECEIBI DE VALORES DE DEPÓSITO EN LA CUENTA DE AHORRO DE LOS SERVIDORES EN EL ISSSTE

ESTADO DE SERVICIOS: ACREDITADO

FECHA DE EMISION: 1981

ESTADO DE SERVICIOS: ACREDITADO

FECHA DE EMISION: 1981

ESTADO DE SERVICIOS: ACREDITADO

FECHA DE EMISION: 1981



cremento. Como máximo calcula 2000 puntos.

4. Para la respuesta de un sistema discreto.

4.a. La representación gráfica , ofrece una resolución bastante clara. También ofrece la oportunidad de observar, en la misma gráfica, el comportamiento del sistema con tres diferentes valores de un controlador. Esto ayuda para obtener la respuesta del sistema mas apropiada.

4.b. La velocidad del programa , es bastante aceptable.

## BIBLIOGRAFIA

+++++

BIBLIOGRAFIA.

- 1) Digital Computer Process Control.  
Smith, C.L. 1972  
Intex Educational Publisher.
- 2) Modern Control System Theory and Application.  
Shinners. 1972  
Addison Wesley.
- 3) Discrete-Time and Computer Control Systems.  
Cadzow-Martens. 1970  
Prentice-Hall.
- 4) Digital Control Systems.  
Rolf Isermann. 1981  
H.R.W.
- 5) Digital Control of Dynamic Systems.  
Franklin Powell. 1980  
Addison Wesley.
- 6) Digital Control Systems.  
Benjamin C. Kuo. 1980  
H.R.W.
- 7) An Introduction to Dynamics and Control.  
R.J. Richards. 1979  
Longman

- 8) Control and Dynamic Systems.  
Takahashi Rabins Auslander. 1970  
Addison Wesley.
- 9) Ingeniería de Control Moderna.  
K. Ogata. 1974  
Prentice-Hall.
- 10) Theory of Automatic Control.  
A. Netushil. 1976  
GEN. ED.
- 11) Elements of Control Systems Analysis.  
Chen and Haas. 1968  
Prentice-Hall.
- 12) Retroalimentación y Sistemas de Control.  
Distefano-Stubberud-Williams. 1981  
Mc Graw-Hill.
- 13) Análisis de Sistemas Dinámicos y Control Automático.  
R. Canales Ruiz- R. Barrera Rivera. 1977  
LIMUSA.
- 14) BASIC 3.0 Language Reference for The HP 9000  
Series 200.  
Hewlett-Packard Company. 1984
- 15) BASIC 3.0 Graphics Techniques, HP 9000 Series 200.  
Hewlett-Packard Company. 1984