

ESCUELA POLITECNICA NACIONAL

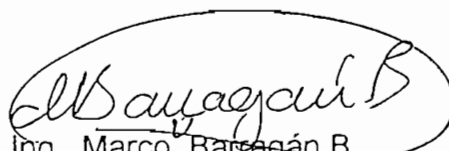
**FACULTAD DE INGENIERIA
ELECTRICA**

**ANALISIS DE ESTABILIDAD DE SISTEMAS
NO-LINEALES CONTINUOS Y DISCRETOS
MEDIANTE LA FUNCION DESCRIPTIVA
UTILIZANDO MATLAB**

RAMIRO CAMPOS MIRANDA

Quito, Marzo del 2000

CERTIFICO QUE EL PRESENTE TRABAJO
HA SIDO REALIZADO EN SU TOTALIDAD POR
EL SEÑOR RAMIRO CAMPOS MIRANDA

A handwritten signature in black ink, enclosed within an oval-shaped border. The signature is written in a cursive style and appears to read 'M. Barregán B.'.

Ing. Marco Barregán B.
DIRECTOR DE TESIS

AGRADECIMIENTO

Un agradecimiento especial al Ing. Marco Barragán por su paciencia, acertada dirección y apoyo para la realización del presente trabajo.

INDICE:

CAPITULO 1: INTRODUCCION

1.1 Generalidades.....	2
1.2 El Programa MatLab V 5.0.....	3
1.3 Referencias.....	7

CAPITULO 2: BASE TEORICA

2.1 Sistemas No Lineales.....	9
2.2 La Función Descriptiva.....	12
2.2.1 Consideraciones Generales.....	12
2.2.2 Definición	13
2.2.3 Funciones Descriptivas de Alinealidades Típicas.....	15
2.2.3.1 Relé Ideal.....	15
2.2.3.2 Relé con Histéresis	17
2.2.3.3 Relé con Zona Muerta.....	18
2.2.3.4 Relé con Pendiente.....	20
2.2.3.5 Alinealidad por Saturación.....	21
2.2.3.6 Relé con Zona Muerta y Pendiente.....	22
2.2.3.7 Saturación con Zona Muerta	22
2.2.3.8 Saturación con Pendiente	23
2.2.3.9 Saturación con Zona Muerta y Pendiente	24
2.2.3.10 Histéresis con Pendiente.....	25
2.2.3.11 Histéresis con Zona Muerta	26
2.2.3.12 Histéresis con Zona Muerta y Pendiente	27
2.3 Criterio de Estabilidad empleando la Función Descriptiva.....	28
2.3.1 El criterio de estabilidad de Nyquist.....	28
2.3.2 Existencia de ciclos límites y criterio de estabilidad	32
2.3.3 Precisión del Método	35
2.4 Sistemas No Lineales Discretos.....	36
2.4.1 Introducción.....	36
2.4.2 Análisis de Estabilidad con la Función Descriptiva	38
2.4.3 Sistemas de control con PC.....	38
2.5 Referencias	41

CAPITULO 3: ESTRUCTURA DEL PROGRAMA

3.1 Estructura del Programa.....	44
3.2 Interface para los Sistemas Continuos.....	46
3.3 Interface para los Sistemas Discretos.....	56
3.4 Referencias.....	60

CAPITULO 4: EJEMPLOS DE APLICACION

4.1 Ejemplos de Aplicación.....	62
4.2 Ejemplos para determinar las limitaciones del programa.....	72
4.3 Referencias.....	81

CAPITULO 5: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 Conclusiones y Recomendaciones.....	83
5.1.1 Respecto a los sistemas no lineales en general y el método de la Función Descriptiva.....	83
5.1.2 Respecto al programa “estabnon” implementado y la versión de MatLab utilizada.....	84
5.1.3. Recomendaciones	85

ANEXOS:

Listado del programa	87
----------------------------	----

Capitulo 1: Introducción.

1.1	Generalidades.....	2
1.2	El programa MatLab V 5.0.....	3
1.3	Referencias.....	7

CAPITULO 1

La necesidad de contar con una herramienta computacional para analizar la estabilidad de los Sistemas no Lineales mediante el empleo de la Función Descriptiva, es importante para complementar el aprendizaje de la materia Control Moderno y Control No-Lineal del p ensum de estudios de la Facultad de Ingeniería Eléctrica de la Escuela Polit cnica Nacional.

Por ello se requirió crear un programa que mediante el empleo de modernas técnicas de programación y el uso de las últimas herramientas matemáticas (MatLab), permita cumplir este objetivo.

Complementariamente a esto se desarrolla un estudio teórico sobre este tema, del cual no se dispone de mucha información ni tampoco de trabajos anteriores.

Los objetivos del presente trabajo son entonces:

- Implementar un programa de análisis de estabilidad de sistemas no-lineales, mediante el empleo de MatLab 5.0.
- Contar con un estudio de la aplicabilidad del criterio de la Función Descriptiva a los sistemas no-lineales tanto continuos como discretos.

El alcance de este programa es contar con un banco de alinealidades presentes en sistemas continuos y discretos y verificar la validez del método de la función Descriptiva.

1.1 Generalidades

Los sistemas analizados en la teoría de control, se pueden clasificar en dos tipos: Sistemas Lineales y Sistemas no lineales.

Los primeros son aquellos cuya ecuación del modelo es lineal. Estos sistemas cumplen con el principio de superposición:

- La respuesta producida por la aplicación simultánea de dos funciones excitadoras distintas es la suma de las dos respuestas individuales.
- La respuesta es proporcional a la señal de excitación.

Los sistemas no lineales son aquellos que están representados por ecuaciones no lineales. En la práctica la mayoría de los sistemas son no lineales, y pueden ser considerados lineales sólo en un pequeño rango de sus características. Sin

embargo algunos sistemas son completamente no lineales para cualquier tipo de señal de entrada, como en el caso de un relé.

La característica principal de los sistemas no lineales es que no cumplen con el principio de superposición y su análisis es muy complicado por ello se busca la determinación de sistemas lineales equivalentes, válidos, solo en ciertos rangos o bajo ciertas condiciones de la señal de entrada.

Este tipo de sistemas serán los que se estudiarán a continuación. Se ha propuesto en este trabajo el método de la función descriptiva para analizar los sistemas no lineales, y su aplicabilidad a diferentes tipos de alinealidades. Para ello se implementa un programa que mediante el empleo del criterio de Nyquist y su extensión analiza la estabilidad de estos sistemas, dicho programa nos permite seleccionar una serie de alinealidades presentes en los sistemas continuos y en los discretos. Los resultados se presentarán en forma gráfica.

Con este objeto se ha creído conveniente dividir la tesis en 5 capítulos:

El primer capítulo comprende: El objetivo del programa, sus generalidades, un breve resumen de la tesis y una breve introducción a MatLab V 5.0.

El segundo capítulo consta de la base teórica en la que se sustenta la tesis, es decir el estudio del método de la función Descriptiva su aplicación y la implementación del método de estabilidad de Nyquist. Se estudia las alinealidades presentes en los sistemas continuos y en los discretos, y la aplicación del criterio que permite establecer su estabilidad.

El tercer capítulo comprende la estructura del programa. Se implementó el programa en MATLAB V 5.0 versión estudiantil. Este capítulo tiene también un manual de procedimiento del programa.

El cuarto capítulo tiene una serie de ejemplos de aplicación para comprobar la validez del programa, aquí se analizan los errores obtenidos y las limitaciones del programa.

Finalmente el quinto capítulo contiene las conclusiones obtenidas y las recomendaciones que se plantean al finalizar el presente trabajo.

1.2 El programa MatLab V 5.0

El programa a utilizarse es el programa MatLab 5.0 versión estudiantil, perteneciente a la casa MathWorks. Se escogió este programa por su versatilidad, alto rendimiento para gráficos y su aplicación cada vez mayor en las últimas ediciones de los libros de texto de Sistemas de Control.

El programa Matlab es utilizado por miles de usuarios en industrias, universidades y centros de investigación. La casa fabricante MathWorks provee al usuario novel una serie de ayudas, consejos y ejemplos de aplicación, así como una lista de los libros publicados que emplean Matlab. El sitio en la Web donde se puede encontrar toda esta información y más es:

<http://www.mathworks.com/support.html>.

Los requerimientos del programa Matlab y por consiguiente de la tesis implementada son los siguientes¹:

- Computadora IBM o compatible con procesador 486 con coprocesador matemático incluido, Pentium o superior. (Pentium II o III).
- Microsoft Windows 95 o superior. Se puede instalar en Windows NT.
- CD-ROM drive.
- Espacio suficiente en disco: 115 MB para el Matlab y 250 MB para los archivos de ayuda.
- Memoria:
8 MB mínimo, 16 MB recomendado.

El programa tiene una serie de librerías (“Toolboxes”) en las cuales se han implementado una serie de programas relacionados con un campo específico, la versión estudiantil viene con tres de ellas:

- Control Toolbox.
- Signal Processing.
- Symbolic Matematic.

La figura 1.1 muestra la pantalla de presentación de Matlab y la figura 1.2 muestra el prompt o campo de trabajo de Matlab.

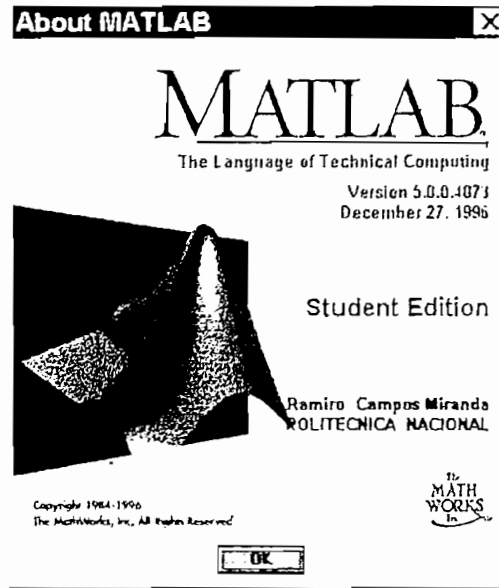


Fig. 1.1 Programa Matlab.

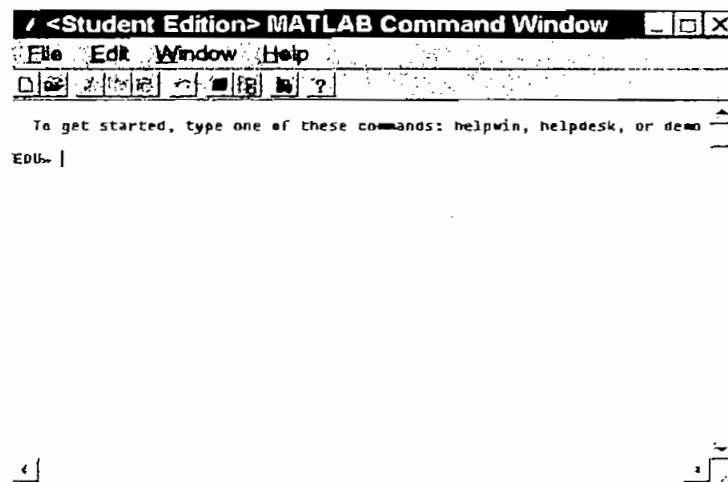


Fig. 1.2 Pantalla de trabajo del programa Matlab.

El programa Matlab, de manera similar a los programas bajo Windows, tiene un menú con una serie de submenús que definen sus funciones básicas.

Toda la ayuda se encuentra en línea y se puede acceder a ella a través de un índice en el menú. Véase figura 1.3

Las operaciones aritméticas sencillas se las puede hacer de manera directa en el espacio de trabajo (prompt), para las operaciones más complicadas existen una serie de comandos cuya lista se encuentra en la ayuda, si se digita uno de estos

comandos aparece la sintaxis respectiva y los parámetros que este requiere. Ver figura 1.4.

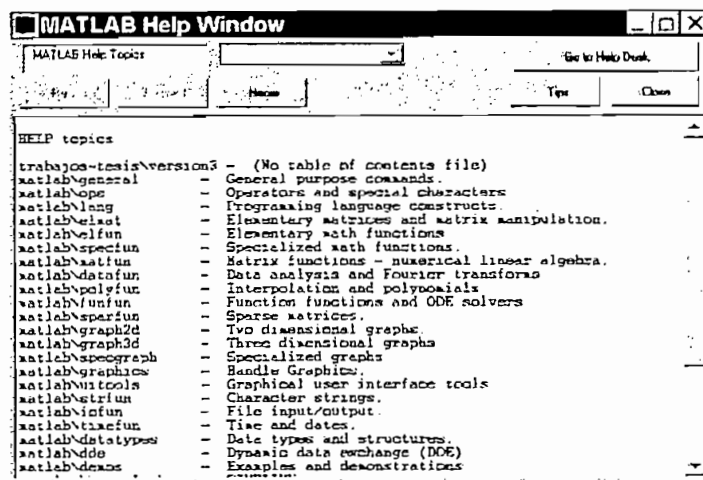


Fig. 1.3 Pantalla de ayuda del Matlab.

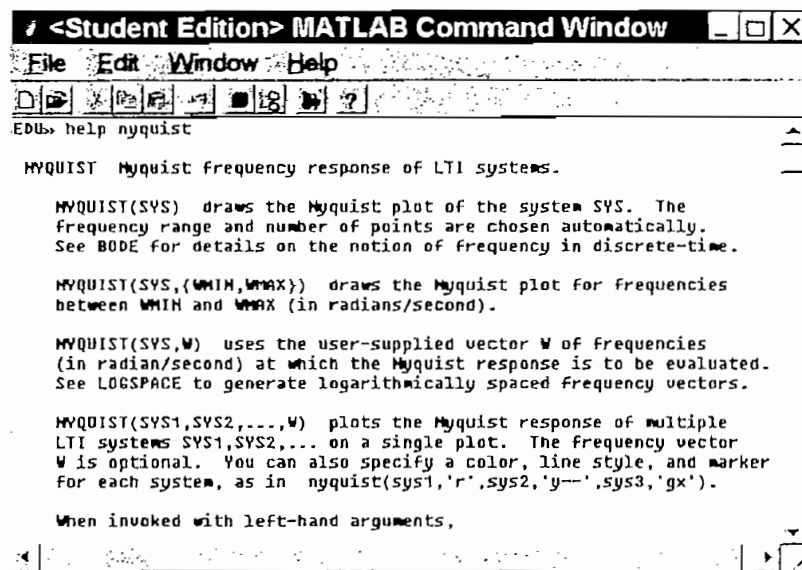


Fig. 1.4 Ayuda que se presenta en la pantalla de trabajo del Matlab, cuando se teclea help seguido del comando (para el ejemplo se ha escrito Nyquist).

Este programa presenta una gran versatilidad para hacer gráficos, (lo cual fue una de las razones para escogerlo como base para la tesis) esto se puede apreciar en la figura 1.5 donde se ve el diagrama de Bode de un sistema dado.

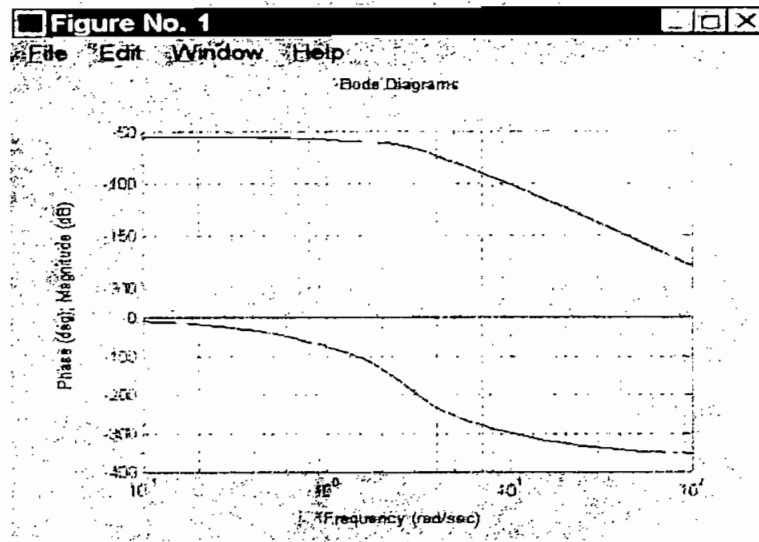


Fig. 1.5 Diagrama de Bode, utilizando Matlab.

Utilizando todas éstas características se diseñó el programa “**estabnon**” cuya estructura y modo de operación se ve en el capítulo 3 y los resultados en el capítulo 4.

1.3 Referencias.

1. HANSELMAN Duane, LITTLEFIELD Bruce, The Student Edition of Matlab, Version 5, User's Guide, Prentice Hall, 1997.

Capítulo 2: Base Teórica.

2.1	Sistemas no Lineales.....	9
2.2	La Función Descriptiva.....	12
2.3	Criterio de Estabilidad empleando la Función Descriptiva.....	28
2.4	Sistemas No Lineales Discretos....	36
2.5	Referencias.....	41

CAPITULO 2

Los métodos de respuesta de frecuencia han sido bien desarrollados y constituyen una poderosa herramienta de control. Sin embargo éstos métodos no pueden ser directamente aplicados a los sistemas no – lineales.

El método de la Función Descriptiva constituye una extensión del método de Nyquist de respuesta de frecuencia para algunos Sistemas no – Lineales. Este, es sólo una aproximación pero es muy utilizado para determinar la existencia o no de ciclos límites y la respuesta de sistemas no – lineales a entradas sinusoidales.

En el presente capítulo se estudia en detalle la Función Descriptiva, y su aplicación para determinar la estabilidad de Sistemas no Lineales.

2.1 Sistemas No-Lineales

La mayoría de los sistemas del mundo real son sistemas no lineales, es decir son sistemas modelados por ecuaciones no lineales, por ejemplo:

$$y = \text{sen } x$$

$$y = x^3$$

Estos sistemas pueden presentar una serie de fenómenos que no se manifiestan en los sistemas lineales como son:

- *Ciclos Límites.* Esta es una característica intrínseca de los sistemas no lineales¹, que aparece en el plano de fase, éstos pueden presentar oscilaciones sin ninguna excitación externa. Estas oscilaciones son llamadas ciclos límites. Este fenómeno puede ser ilustrado por un oscilador dinámico estudiado por Van der Pol en 1920.

La ecuación que representa este oscilador se muestra a continuación:

$$m\ddot{x} + 2c(x^2 - 1)\dot{x} + kx = 0$$

Ecuación (2.1)

Donde m, c y k son constantes positivas. Este sistema puede ser representado como un sistema que conste de una masa un resorte y un amortiguador. Este sistema tiene un coeficiente de amortiguamiento dado por el término $2c(x^2 - 1)$. Para valores grandes de x el coeficiente de amortiguamiento es positivo y el amortiguador remueve energía del sistema. Esto implica que el sistema mecánico (figura 2.3), tiene una tendencia convergente. Para valores

pequeños de x en cambio el coeficiente de amortiguamiento es negativo y el amortiguador añade energía al sistema. Es decir el sistema mecánico tiene una tendencia divergente. Es decir el sistema puede estar oscilando independiente de las condiciones iniciales por que puede estar absorbiendo o entregando energía del medio, dependiendo solo de las condiciones del amortiguador. El esquema físico de este sistema se observa a continuación en la figura 2.1.

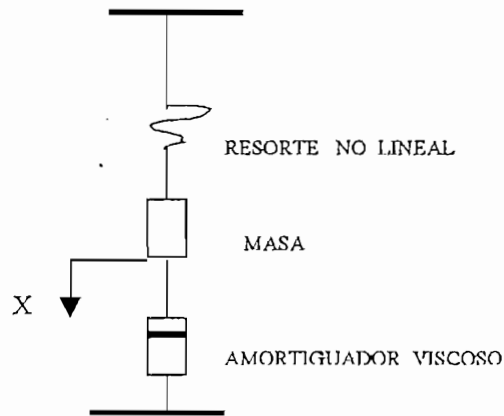


Fig. 2.1 Sistema Mecánico'

La respuesta del oscilador de Van der Pol se puede ver en la figura 2.2, la amplitud de la oscilación es independiente de la condición inicial (x_0). Entonces los ciclos límites constituyen un fenómeno importante en los sistemas no – lineales. Se pueden encontrar en muchas áreas de la ingeniería, pueden ser deseables en ciertos casos e indeseables en otros.

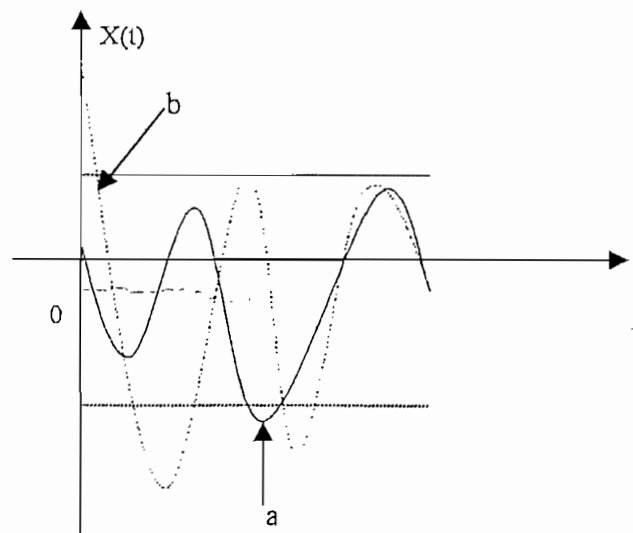


Fig. 2.2 Respuesta del Oscilador de Van der Pol²

- **Caos** Para los sistemas lineales, una diferencia pequeña en las condiciones de entrada inicial causa solamente pequeñas diferencias en la salida. Los sistemas no lineales en cambio pueden presentar un fenómeno llamado

“Caos” que se manifiesta en una extrema sensibilidad a las condiciones iniciales.

La principal característica del Caos es lo impredecible de la salida del sistema, de hecho si se tiene un modelo exacto del sistema no – lineal y una muy precisa computadora, la respuesta del sistema en un largo rango no puede ser predicha³.

Un ejemplo de esta característica se puede apreciar en el sistema no lineal, mostrado a continuación:

Ecuación (2.2)

$$\ddot{x} + 0.1\dot{x} + x^5 = 6\text{sen}(t)$$

Esta ecuación representa un amortiguamiento suave de tipo sinusoidal en una estructura mecánica bajo la acción de una deflección elástica. Se puede notar la presencia de una alinealidad por el término x^5 . La figura 2.3 representa la respuesta del sistema a dos condiciones iniciales³.

Estas condiciones son:

$$\begin{aligned} x(0) = 2, \quad x'(0) = 3 \text{ (línea en azul)} \\ x(0) = 2.01, \quad x'(0) = 3.01 \text{ (línea verde)} \end{aligned}$$

Se ve que las dos respuestas son radicalmente diferentes después de un corto tiempo:

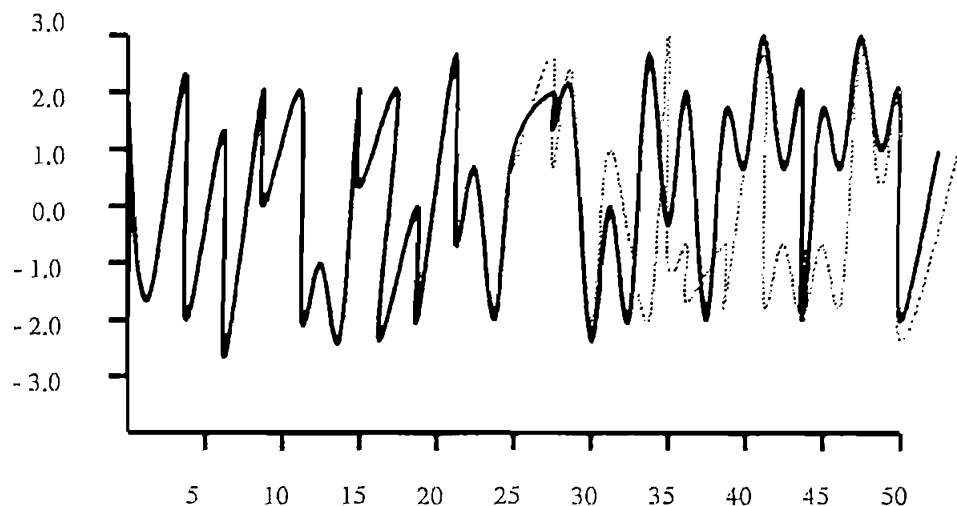


Fig. 2.3 Respuesta caótica de un sistema no – lineal con dos condiciones iniciales próximas pero diferentes³

Algunos ejemplos típicos de sistemas caóticos son las turbulencias presentes en los fluidos mecánicos, vibraciones, etc.

- *Oscilaciones Subarmónicas.* Son aquellas oscilaciones cuya frecuencia es un submúltiplo entero de la frecuencia excitadora; este tipo de oscilaciones, depende de los parámetros del sistema y de las condiciones iniciales. Si se cambia la frecuencia de la señal de entrada desaparece la oscilación subarmónica o bien aparece con un valor w/n donde n es el orden de la oscilación subarmónica.¹

La teoría de sistemas de control lineal no predice estos fenómenos, por ello necesitan ser analizados por métodos gráficos, o analíticos que ayuden a resolver las ecuaciones diferenciales que modelan estos sistemas. Uno de los métodos es el de la Función Descriptiva que se desarrolla a continuación.

2.2 La función Descriptiva.

2.2.1 Consideraciones Generales

El criterio de estabilidad empleando la Función Descriptiva es una extensión del criterio de estabilidad de Nyquist, este método es del tipo semigráfico y presenta algunas ventajas:

- La representación gráfica facilita el análisis y el diseño.
- La complejidad se incrementa medianamente al aumentar el orden del sistema.

Las condiciones para su aplicación se ven a continuación.

Considèrese el sistema de la figura 2.4 :

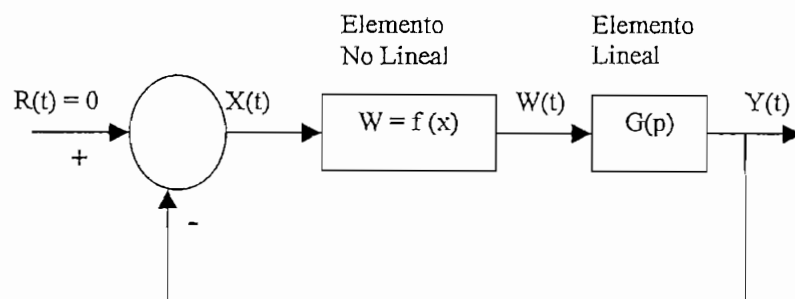


Fig. 2.4 Sistema No - Lineal

En él se representa un sistema con realimentación unitaria en lazo cerrado, en el cual se tiene una parte lineal y una no - lineal. A todo sistema que se pueda reducir a esta forma se le puede aplicar la función descriptiva², siempre y cuando se cumplan las siguientes restricciones:

- Solamente existe un componente no – lineal.

- El componente no – lineal es invariable en el tiempo.
- Si se considera una entrada sinusoidal, de amplitud X , solamente se considera la componente fundamental de la salida.
- La no – linealidad es impar

La primera condición implica que si existe dos o más no – linealidades en el lazo, éstas se pueden reducir a una sola, igual si éstas se encuentran en paralelo.

La mayoría de las no – linealidades son invariantes en el tiempo, un ejemplo de esto lo constituye, la saturación en los amplificadores operacionales. En el caso de que exista una alinealidad variable en el tiempo el criterio de la función descriptiva ya no es válido, porque éste se basa en una extensión del criterio de Nyquist.

La tercera condición es fundamental para poder aplicar el criterio de análisis mediante la función descriptiva. Esta condición de que los armónicos de alto orden pueden ser despreciados en el análisis al comparárselos con la fundamental, exigen, para que esto tenga validez que el sistema lineal tenga propiedades de un filtro pasabajos.⁵

La última condición implica que si se grafica la relación entre la entrada y la salida, ésta debe ser simétrica respecto al origen de coordenadas. Esta condición es introducida con el fin de simplificar los cálculos en la expansión en series de Fourier. En los sistemas no lineales estudiados a continuación se observa que estas condiciones se cumplen.

2.2.2 Definición

La función descriptiva es la relación compleja entre la componente fundamental de la salida de un sistema y la entrada, cuando esta última es sinusoidal.⁵

Ecuación (2.3)

$$N = \frac{Y_1}{X} \phi_1$$

N = Función descriptiva

X = Amplitud de la senoide de entrada

Y_1 = Amplitud de la componente armónica fundamental de la salida.

ϕ_1 = Desplazamiento de fase de la componente armónica fundamental de la salida.

$$y(t) = A_0 + \sum_{n=1}^{\infty} (A_n \cos n\omega t + B_n \sin n\omega t)$$

$$y(t) = A_0 + \sum_{n=1}^{\infty} Y_n \sin(n\omega t + \phi_n)$$

Ecuación (2.4)

donde :

$$A_0 = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} y(t) d(\omega t)$$

y

$$A_n = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} y(t) \cos n\omega t d(\omega t)$$

$$B_n = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} y(t) \sin n\omega t d(\omega t),$$

 $n = 1, 2, \dots$

$$Y_n = \sqrt{(A_n^2 + B_n^2)}$$

$$\phi_n = \tan^{-1} \left(\frac{A_n}{B_n} \right)$$

Dependiendo del tipo de alinealidad, es decir si esta tiene simetría impar la componente A_0 puede ser cero, o puede reducirse a cero.

La componente fundamental es :

$$y_1(t) = A_1 \cos \omega t + B_1 \sin \omega t$$

$$y_1(t) = Y_1 \sin(\omega t + \phi_1)$$

Entonces la función descriptiva⁵ :

Ecuación (2.5)

$$N = \frac{Y_1}{X} \phi_1 = \frac{\sqrt{(A_1^2 + B_1^2)}}{X} \tan^{-1} \left(\frac{A_1}{B_1} \right)$$

El ángulo de desfase entre la entrada y la salida determina el carácter complejo o no de la función descriptiva.

2.2.3 Función Descriptiva de Alinealidades Típicas.

2.2.3.1 Relé Ideal.

Se empieza con una alinealidad que es una de las más comunes como es la alinealidad que caracteriza a un relé, también conocida como alinealidad ON-OFF.

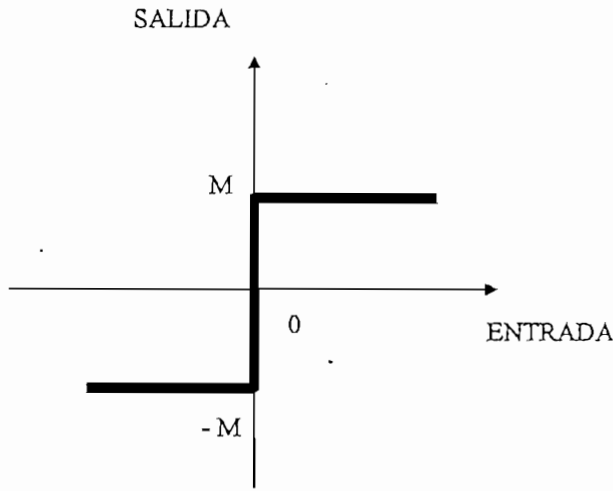


Fig. 2.5 Característica entrada salida, Relé Ideal

La relación de la salida con respecto a la entrada está dada :

$$y : \begin{cases} M, & X > 0 \\ -M, & X < 0 \end{cases}$$

En donde M representa la magnitud de la salida y X es la amplitud máxima de la señal de entrada que es del tipo senoidal :

$$x(t) : X \text{ sen } (\omega t)$$

La curva de entrada-salida, en función del tiempo de la alinealidad conexión-desconexión es la de la figura 2.6:

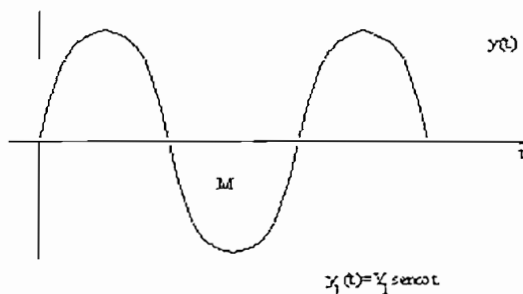


Fig. 2.6 Respuesta en función del tiempo

Para obtener la función descriptiva se desarrolla en series de Fourier la salida $y(t)$ de este elemento :

$$y(t) = A_0 + \sum_{n=1}^{\infty} (A_n \cos n\omega t + B_n \sen n\omega t)$$

Como se ve la salida es una función impar, para este tipo de funciones $A_n = 0$ para todo n , por lo tanto :

$$y(t) = \sum_{n=1}^{\infty} (B_n \sen n\omega t)$$

La componente armónica fundamental de $y(t)$ es :

$$y_1(t) = B_1 \sen \omega t = Y_1 \sen \omega t$$

donde :

$$Y_1 = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} y(t) \sen \omega t d\omega t = \frac{2}{\pi} \int_0^{\pi} y(t) \sen \omega t d(\omega t)$$

reemplazando $y(t) = M$ en esta última ecuación :

$$Y_1 = \frac{2M}{\pi} \int_0^{\pi} \sen \omega t d(\omega t) = \frac{4M}{\pi}$$

$$y_1(t) = \frac{4M}{\pi} \sen \omega t$$

Entonces la función descriptiva N es⁶ :

Ecuación (2.6)

$$N = \frac{Y_1}{X} 0^\circ = \frac{4M}{\pi(X)}$$

En conclusión se ve que la función descriptiva para un elemento si-no (relé común) es una magnitud real y depende únicamente de la amplitud de entrada.

Partiendo de esta alinealidad se puede determinar otras, como se aprecia a continuación.

2.2.3.2 Relé con Histéresis.

El esquema de un relé con zona muerta se muestra a continuación :

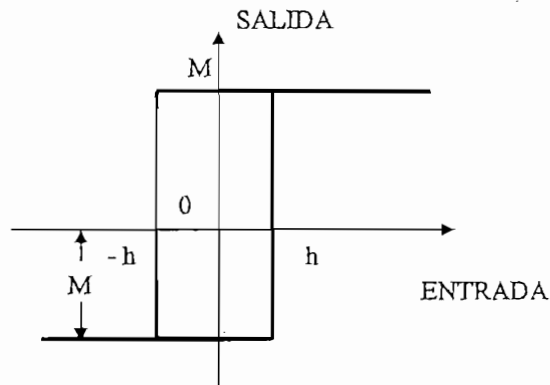


Fig. 2.7 Relé con Histéresis

Para entender el funcionamiento de este tipo de alinealidad supóngase que la entrada se encuentra originalmente en un valor negativo, a medida que se incrementa la señal de entrada, ésta llega a un valor de h y en este momento la salida pasa de $-M$ a un valor de $+M$, manteniéndose en este valor por más que se incremente el valor de entrada. Cuando se decrementa la señal de entrada se llega a un valor de $-h$ y la salida pasa de un valor de $+M$ a uno de $-M$, y se mantiene en este valor aun cuando la entrada disminuya más aún.

La salida es una onda cuadrada pero que se atrasa respecto a la entrada en $\omega t_1 = \text{sen}^{-1}(h/x)$. De acuerdo a esto la función descriptiva de la función no lineal es⁶:

$$N = \frac{4M}{\pi(X)} \left| -\text{sen}^{-1}\left(\frac{h}{X}\right) \right| \quad \text{Ecuación (2.7)}$$

Si se representa en función de h/x en vez de N , porque hN/M es solamente función de h/x . Resultando:

$$\frac{h}{M} N = \frac{4h}{\pi(X)} \left| -\text{sen}^{-1}\left(\frac{h}{X}\right) \right|$$

Las formas de onda de entrada – salida, en función del tiempo se ve a continuación :

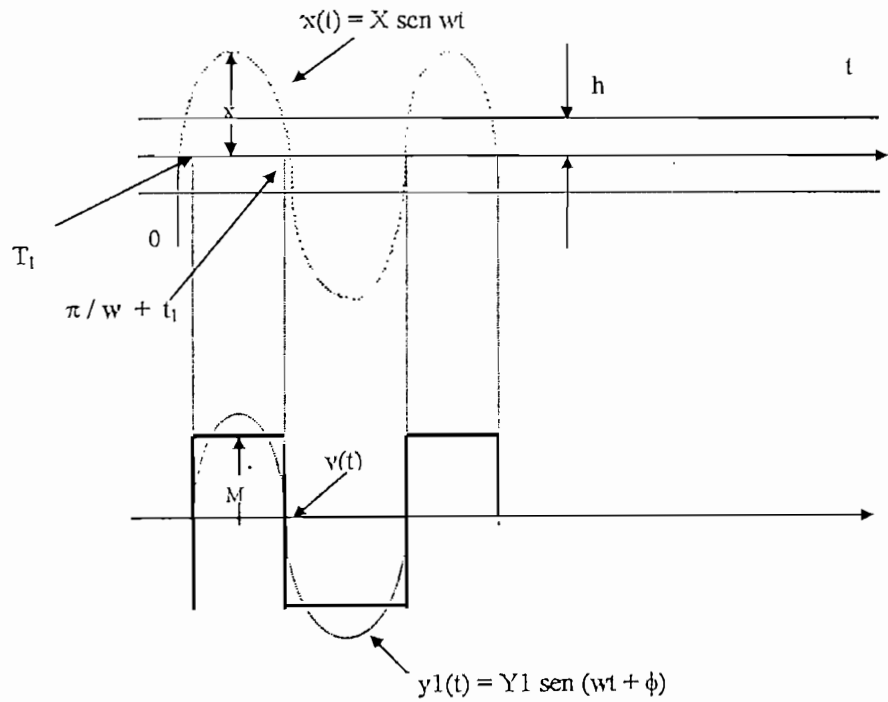


Fig. 2.8 Respuesta en función del tiempo

2.2.3.3 Relé con zona muerta.

La ecuación que representa la entrada respecto a la salida es :

$$y = \begin{cases} M, X > h \\ 0, -h < X < h \\ -M, X < -h \end{cases}$$

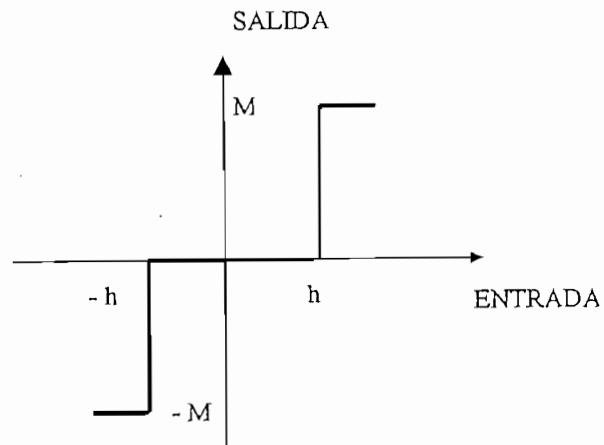


Fig. 2.9 Característica de Transferencia del Relé con Zona Muerta

La función descriptiva solo existe cuando el valor de x es mayor que h en los otros casos la función descriptiva es cero al igual que la salida. La salida en función del tiempo se muestra en la figura 2.10:

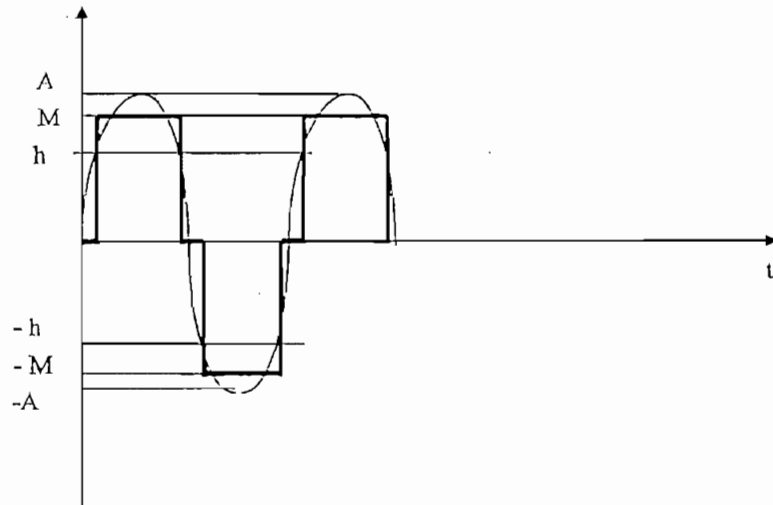


Fig. 2.10 Respuesta en el Tiempo, para el Relé con zona muerta.

Como la salida es una onda impar entonces $A_1 = 0$, el cálculo de B_1 es por consiguiente :

$$h = X \text{ sen}(wt_1)$$

$$\frac{h}{X} = \text{sen}(wt_1)$$

como $wt_1 = \theta_1$ entonces :

$$\theta_1 = \text{sen}^{-1}\left(\frac{h}{X}\right)$$

$$B_1 = \frac{2}{T} \int_0^T (y(t) \text{sen}(wt) dt) = \frac{8M}{T} \int_{-t_1}^{t_1} \text{sen}(w) dt = \frac{8M}{\omega(T)} \left(\cos(\omega t_1) - \cos\left(\omega \frac{T}{4}\right) \right)$$

$$B_1 = \frac{4M}{\pi} \cos(\omega t_1) = \frac{4M}{\pi} \cos \theta_1$$

entonces ⁷:

Ecuación (2.8)

$$N = \begin{cases} \frac{4M}{\pi(X)} \cos \theta_1, X > h \\ 0, X < h \end{cases}$$

2.2.3.4 Relé con Pendiente.

La ecuación que representa la salida respecto a la entrada es :

$$y = \begin{cases} kx + M, & X > 0 \\ kx - M, & X < 0 \end{cases}$$

donde $x = X \text{ sen}(wt)$

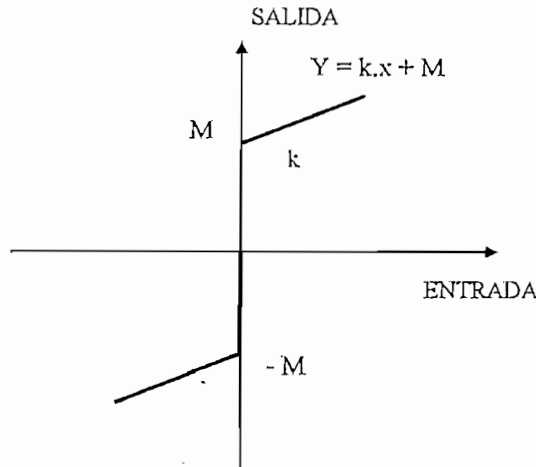


Fig. 2.11 Característica de entrada salida del Relé con Pendiente

La salida al igual que en el caso anterior es una onda impar por tanto $A_1 = 0$, entonces B_1 se obtiene de la siguiente manera :

$$B_1 = \frac{8}{T} \int_0^{\frac{T}{4}} (kX \text{ sen } wt + M) * \text{sen } wtdt = \frac{8}{T} \left[kX \int_0^{\frac{T}{4}} \text{sen}^2(wt)dt + M \int_0^{\frac{T}{4}} \text{sen } wtdt \right]$$

$$B_1 = \frac{8}{T} \left[kX \int_0^{\frac{T}{4}} \left(\frac{1 - \cos(2wt)}{2} \right) dt + \frac{M}{w} \left(\cos 0 - \cos\left(\frac{wT}{4}\right) \right) \right]$$

$$B_1 = \frac{8}{T} \left[\frac{kX}{2} \left(t - \frac{\text{sen } 2wt}{2w} \right) \Big|_0^{\frac{T}{4}} + \frac{M}{w} (1 + 0) \right] = \frac{8}{2Tw} \left[\frac{kX}{2} \left(2w \frac{T}{4} - \text{sen}\left(2w \frac{T}{4}\right) \right) + 2M \right]$$

$$B_1 = \frac{2}{\pi} \left(\frac{kX\pi}{2} + 2M \right) = kX + \frac{4M}{\pi}$$

El resultado de la ecuación anterior es la suma de una no - linealidad cuadrada ($N = 4U/\pi X$) más una sinusoidal ($N = k$)⁸.

Su función de transferencia es:

Ecuación (2.9)

$$N = k + \frac{4M}{\pi X}$$

2.2.3.5 Alinealidad por Saturación.

La alinealidad de Saturación presenta un comportamiento bastante peculiar: Para señales de entrada pequeñas la salida es proporcional a la entrada. Cuando se tiene valores más elevados la salida ya no es proporcional a la entrada y para valores muy elevados la salida se mantiene constante.⁹

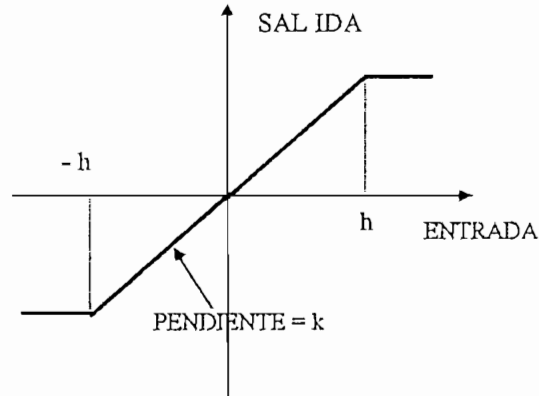


Fig 2.12 Alinealidad por Saturación

De acuerdo a la característica de la salida en función de la entrada se aprecia que para valores menores a h la salida es proporcional a la entrada con una ganancia de M/h , por tanto su función descriptiva será :

$$N = \frac{kX}{X} = k = \frac{M}{h} \quad \text{Ecuación (2.10)}$$

Cuando la entrada tiene un valor mayor que h la salida tendrá un valor constante, por tanto :

Como la onda es impar entonces ⁹:

$$A_1 = 0 .$$

$$B_1 = \frac{8}{T} \left[\int_0^{t_1} kX \text{Sen}^2 \omega t dt + \int_{t_1}^{\frac{T}{4}} M \text{Sen} \omega t dt \right] = \frac{8}{2\omega T} \left[\frac{kX}{2} (2\omega t_1 - \text{sen}(2\omega t_1)) + 2M \cos \theta_1 \right]$$

$$B_1 = \frac{kX}{\pi} (2\theta_1 - \text{sen}(2\theta_1)) + \frac{4M}{\pi(X)} \cos \theta_1$$

$$N = \frac{k}{\pi} (2\theta_1 - \text{sen}(2\theta_1)) + \frac{4M}{\pi(X)} \cos \theta_1$$

Ecuación (2.11)

$$\omega t_1 = \text{sen}^{-1} \frac{h}{X} = \theta_1$$

2.2.3.6 Relé con Zona Muerta y Pendiente.

ECUACION DE LA ENTRADA RESPECTO A LA SALIDA

$$y = \begin{cases} k(x-h)+M, X > h \\ 0, -h < X < h \\ k(x+h)-M, X < -h \end{cases}$$

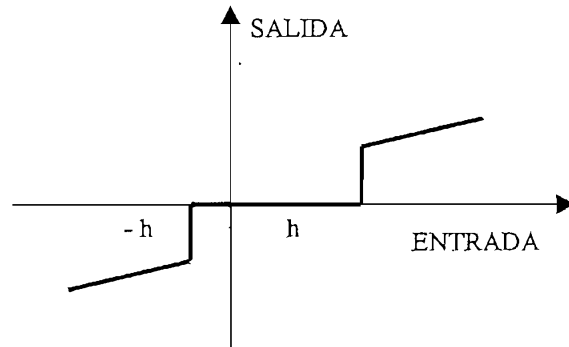


Fig. 2.13 Gráfico de entrada salida de un relé con zona muerta

La función descriptiva de esta alinealidad es la siguiente¹⁰:

Ecuación (2.12)

$$N = \frac{k}{\pi}(\pi - 2\theta_1 + \text{sen}(2\theta_1)) + \frac{4}{\pi(X)}(M - kh)\cos\theta_1$$

$X > h$

2.2.3.7 Saturación con Zona Muerta.

$$y = \begin{cases} M, X > 2 \\ k(x-h_1), h_1 < X < h_2 \\ 0, -h_1 < X < h_1 \\ k(x+h_1), -h_2 < X < -h_1 \\ M, X < -h_2 \end{cases}$$

ECUACION ENTRADA-SALIDA :

donde $x = X \text{ sen } \omega t$

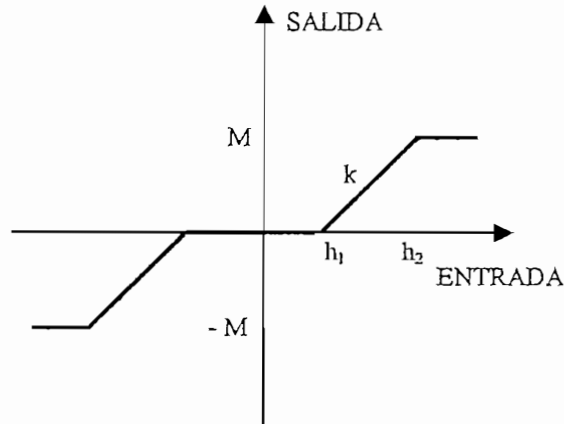


Fig. 2.14 Gráfico de entrada salida de una saturación con zona muerta

La función descriptiva de esta alinealidad es la siguiente:¹¹

$$h_1 \leq X < h_2 :$$

Ecuación (2.13)

$$N = \frac{k}{\pi} (\pi - 2\theta_1 + \text{sen}(2\theta_1)) - \frac{4k}{\pi(X)} h_1 \cos\theta_1$$

$$\omega t_1 = \theta_1; \theta_1 = \text{sen}^{-1} \left(\frac{h_1}{X} \right)$$

$$X > h_2 :$$

$$N = \frac{k}{\pi} (2(\theta_2 - \theta_1) - \text{sen}(2\theta_2) + \text{sen}(2\theta_1)) + \frac{4k}{\pi(X)} h_1 (\cos(\theta_2) - \cos(\theta_1)) + \frac{4}{\pi(X)} M \cos(\theta_2)$$

$$X \text{sen}(\omega t_1) = h_2$$

$$\theta_{n1} = \text{sen}^{-1} \left(\frac{h_n}{X} \right)$$

2.2.3.8 Saturación con Pendiente.

ECUACION ENTRADA-SALIDA :

$$y = \begin{cases} k_0(x-h) + M, & X > h \\ k_1 x, & -h < X < h \\ k_2(x+h) - M, & X < -h \end{cases}$$

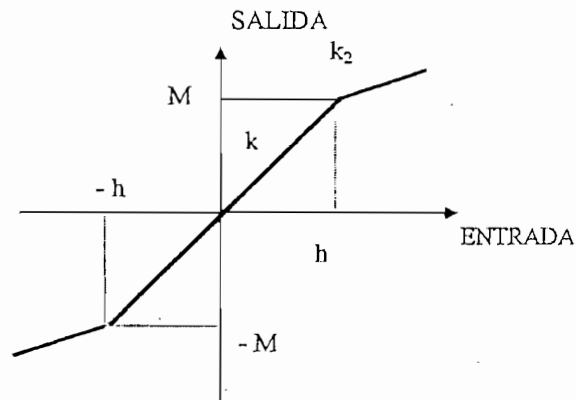


Fig. 2.15 Gráfico de entrada salida de una saturación con pendiente

La función descriptiva de esta alinealidad es la siguiente:¹¹

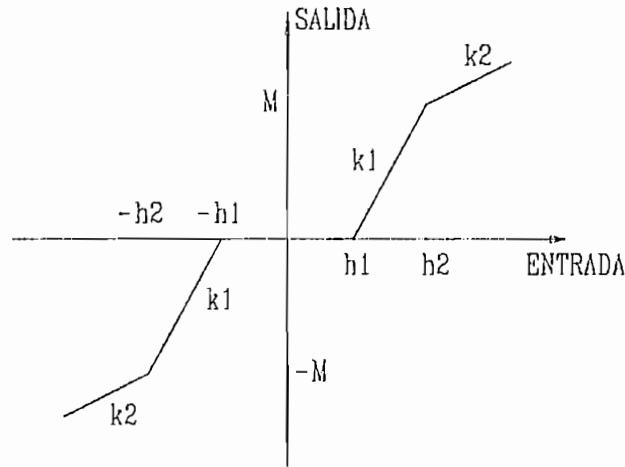
Ecuación (2.14)

$$N = \frac{k_1}{\pi} (2\theta_1 - \text{sen } 2\theta_1) + \frac{k_2}{\pi} (\pi - 2\theta_1 + \text{sen } 2\theta_1) - \frac{4}{\pi(X)} k_2 h \cos \theta_1 + \frac{4M}{\pi(X)} \cos \theta_1$$

2.2.3.9 Saturación con Zona Muerta y Pendiente.

$$y = \begin{cases} k_0(x-h_2)+M, & x > h_2 \\ k_1(x-h_1), & h_1 < x < h_2 \\ 0, & -h_1 < x < h_1 \\ k_1(x+h_1), & -h_2 < x < -h_1 \\ k_2(x+h_2)-M, & x < -h_2 \end{cases}$$

El gráfico de la característica entrada-salida se lo puede apreciar en la figura 2.16.



SATURACION CON ZONA MUERTA Y PENDIENTE

Fig. 2.16 Gráfico de entrada salida de una Saturación con Zona muerta y pendiente.

La función descriptiva de esta alinealidad es la siguiente:

Ecuación (2.15)

$$N = \frac{k_1}{\pi} (2\theta_2 - 2\theta_1 - 2 \operatorname{sen} 2\theta_2 + \operatorname{sen} 2\theta_1) + \frac{4M}{\pi(X)} \cos \theta_2 + \frac{4k_1 h_1}{\pi(X)} (\cos \theta_2 - \cos \theta_1) + \frac{k_2}{\pi} (\pi - 2\theta_2 + \operatorname{sen} 2\theta_2) - \frac{4k_2 h_2}{\pi(X)} \cos \theta_2$$

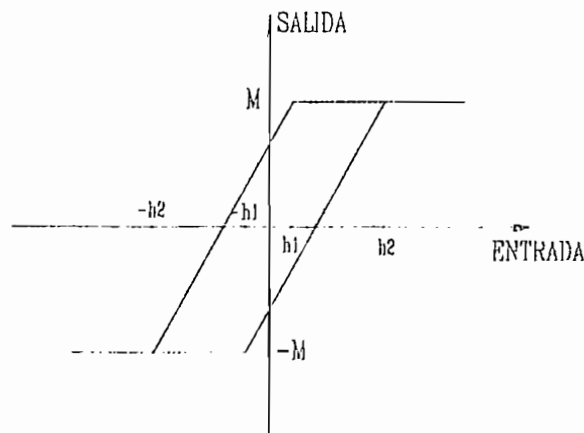
donde

$$\omega t_n = \theta_n,$$

$$X \operatorname{sen} \omega t_n = h_n$$

$$\theta_n = \operatorname{sen}^{-1} \left(\frac{h_n}{X} \right)$$

2.2.3.10 Histéresis con Pendiente.



HISTERESIS CON PENDIENTE

Fig. 2.17 Gráfico de entrada salida de una Histéresis con Pendiente

La Función descriptiva de esta alinealidad es la siguiente¹²:

Ecuación (2.16)

$$K = \frac{2M}{h_2 + h_1}$$

$$N = \frac{K}{2\pi} (2\theta_1 + 2\theta_2 - \text{sen } 2\theta_1 - \text{sen } 2\theta_2) + 2 \frac{(M - Kh_2)}{\pi(X)} (\cos \theta_1 - \cos \theta_2) +$$

$$\frac{2M}{\pi(X)} (\cos \theta_2 + \cos \theta_1) + \frac{K}{2\pi} (\cos 2\theta_1 - \cos 2\theta_2) + \frac{2M}{\pi(X)} (\text{sen } \theta_1 - \text{sen } \theta_2) +$$

$$\frac{2}{\pi(X)} (M - Kh_2) (\text{sen } \theta_2 + \text{sen } \theta_1)$$

Donde

$$w_{1n_1} = \theta_n$$

$$\text{sen}(w_{1n_1}) = h_n$$

$$\theta_n = \text{sen}^{-1} \left(\frac{h_1}{X} \right)$$

2.2.3.11 Histéresis con Zona Muerta.

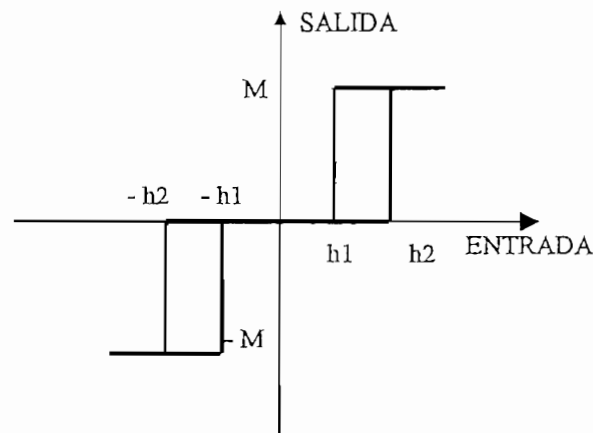


Fig. 2.18 Gráfico de entrada salida de una Histéresis con zona muerta

La función descriptiva de esta alinealidad es la siguiente¹³:

Ecuación (2.17)

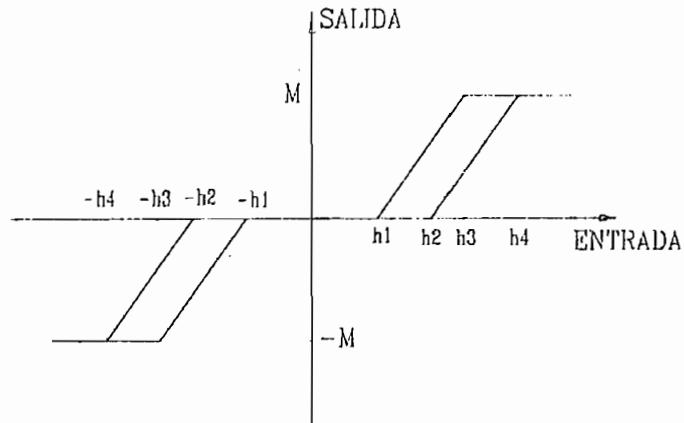
$$N = \frac{2M}{\pi(X)} (\cos \theta_1 + \cos \theta_2), \text{ real}$$

$$\frac{2M}{\pi(X)} (\text{sen } \theta_1 - \text{sen } \theta_2), \text{ imaginaria}$$

$$\theta_1 = \text{sen}^{-1} \left(\frac{h_1}{X} \right)$$

$$\theta_2 = \text{sen}^{-1} \left(\frac{h_2}{X} \right)$$

2.2.3.12 Histéresis con Zona Muerta y Pendiente .



HISTERESIS CON ZONA MUERTA Y PENDIENTE

Fig. 2.19 Histéresis con zona muerta y Pendiente

La función Descriptiva de esta alinealidad es la siguiente¹³:

Ecuación (2.18)

$$K = \frac{M}{h_4 - h_3} = \frac{M}{h_2 - h_1}$$

$$N = \frac{K}{2(\pi)} (2(\theta_2 - \theta_1 + \theta_4 - \theta_3) + \text{sen } 2\theta_1 - \text{sen } 2\theta_2 + \text{sen } 2\theta_3) - \frac{K}{2(\pi)} (\text{sen } 2\theta_4) + \frac{2Kh_3}{\pi(X)} (\cos \theta_4 - \cos \theta_3) +$$

$$\frac{2Kh_1}{\pi(X)} (\cos \theta_2 - \cos \theta_1) + \frac{2M}{\pi(X)} (\cos \theta_4 + \cos \theta_2) + \frac{K}{2(\pi)} (\cos 2\theta_2 - \cos 2\theta_1 + \cos 2\theta_3 - \cos 2\theta_4) -$$

$$\frac{2Kh_3}{\pi(X)} (\text{sen } \theta_4 - \text{sen } \theta_3) - \frac{2Kh_1}{\pi(X)} (\text{sen } \theta_1 - \text{sen } \theta_2) + \frac{2M}{\pi(X)} (\text{sen } \theta_2 - \text{sen } \theta_4)$$

2.3 Criterio de estabilidad empleando la Función Descriptiva

Una vez que se ha visto la definición de la Función Descriptiva, su aplicabilidad y se ha determinado la función de las alinealidades más comunes, se estudiará el criterio de Nyquist y su extensión.

2.3.1 El criterio de Estabilidad de Nyquist.

El criterio de estabilidad de Nyquist es un método semigráfico que permite determinar la estabilidad de un sistema de lazo cerrado en base al análisis de las propiedades de la llamada "Trayectoria o Recorrido de Nyquist" en el dominio de la frecuencia compleja, de la función de transferencia $G(s)H(s)$.

Usualmente la Trayectoria de Nyquist, se convierte en una gráfica de $G(j\omega)H(j\omega)$ en coordenadas polares, cuando ω varía desde 0 hasta ∞ .¹⁴

El criterio de Nyquist presenta algunas características importantes:

- Proporciona información de estabilidad absoluta y relativa de un sistema estable y el grado de inestabilidad de un sistema inestable.
- También proporciona información sobre las características en el dominio de la frecuencia tales como: Margen de Ganancia, Ancho de Banda y otras relevantes en lo que a calidad del sistema, se refiere.
- Es útil para sistemas con retardos puros.

El análisis de estabilidad de Nyquist está basado en un teorema de la variable compleja, denominado el Teorema de la Representación Conforme de Cauchy. Para comprender como se aplica este teorema, considérese, lo siguiente:

La función de transferencia de un sistema de lazo cerrado:

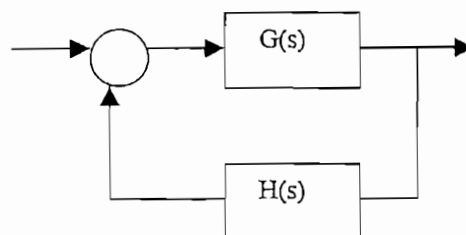


Fig. 2.20 Diagrama de bloques de un sistema en Lazo Cerrado

Donde $G(s)$ es la función de transferencia de la planta, y $H(s)$ es la realimentación. Por tanto la ecuación en lazo cerrado es:

$$M(s) = \frac{G(s)}{1 + G(s)H(s)}$$

Ecuación (2.19)

Función de transferencia de Lazo Cerrado

En donde $G(s)$ puede tomar la forma¹⁵:

Ecuación (2.20)

$$G(s)H(s) = \frac{k(1 + T_1s)(1 + T_2s)\dots(1 + T_ms)}{s^p(1 + T_as)(1 + T_bs)\dots(1 + T_ns)} * e^{-T_r s}$$

Donde T' son los factores del numerador y denominador y pueden ser coeficientes reales o complejos conjugados y T_d es un tiempo de retardo real.

Si se define a la Ecuación característica como el resultado de igualar a cero el denominador de $M(s)$, (ecuación 2.24), se obtiene:

Ecuación (2.21)

$$\Delta(s) = 1 + G(s)H(s) = 0$$

Las raíces de esta ecuación son los ceros de $1 + G(s)H(s)$.

En general para un sistema con lazos múltiples el denominador de $M(s)$ se puede escribir como:

$$\Delta(s) = 1 + L(s) = 0$$

Ecuación (2.22)

En donde $L(s)$ es la forma de la ecuación de lazo y es también de la forma de la ecuación (2.25).

De acuerdo a esto, se definen la Estabilidad:

“Un sistema de Fase no Mínima es Estable si, los polos de la función de transferencia en lazo cerrado o los ceros de $1 + L(s)$ están en el semiplano izquierdo del plano s .

Se presenta a continuación los conceptos que definen al Criterio de Estabilidad de Nyquist:

- *Una función univaluada* se define a la función cuyo gráfico en el plano s (parte real contra su parte imaginaria), tiene un punto y sólo uno,

incluyendo el infinito en el plano $\Delta(s)$. Esta función toma la forma de la ecuación 2.25. Es decir si se escoge arbitrariamente una trayectoria cerrada continua Γ_s en el plano s y esta trayectoria no atraviesa ninguno de los polos de $\Delta(s)$, entonces la trayectoria Γ_Δ mapeada por $\Delta(s)$ en el plano $\Delta(s)$ también es cerrada.

- *Principio del Argumento*, es un principio de la variable compleja que se define como:

Supóngase que se escoge una trayectoria arbitraria cerrada $\Gamma(s)$ en el plano s , de tal forma que no atravesase ninguno de los polos o ceros de $\Delta(s)$, entonces el lugar geométrico correspondiente de Γ_Δ obtenido en el plano $\Delta(s)$ encerrará al origen tantas veces como la diferencia del número de ceros y polos de $\Delta(s)$ que están rodeados por el lugar geométrico $\Gamma(s)$ en el plano s ¹⁶.

En forma de ecuación se enuncia como:

Ecuación (2.23)

$$N = Z - P$$

Donde:

N: Número de veces que el lugar geométrico de Γ_Δ en el plano $\Delta(s)$, encierra al origen del plano.

Z: Número de ceros de $\Delta(s)$ encerrados por el lugar geométrico de Γ_s en el plano s .

P: Número de polos de $\Delta(s)$ encerrados por el lugar geométrico de Γ_s en el plano s .

De acuerdo a esto se tiene tres alternativas:

Si $N > 0$, el lugar geométrico de Γ_s encierra mayor número de ceros que de polos de $\Delta(s)$ en cierta dirección dada.

Si $N = 0$, el lugar geométrico de Γ_s en el plano s encierra el mismo número de polos y ceros, o ningún polo o cero, o simplemente no encierra al origen del plano $\Delta(s)$.

Si $N < 0$, el lugar geométrico de Γ_s encierra más polos que ceros de $\Delta(s)$.

Es decir se tiene:

Ecuación (2.24)

$$N = -P$$

- *La Trayectoria de Nyquist*, se define al lugar geométrico Γ_s en el plano s , como uno que encierra al semiplano derecho entero del plano s . Se toma en cuenta que la trayectoria Γ_s no debe encerrar ningún polo o cero de $\Delta(s)$, esto se aprecia en la figura 2.21:

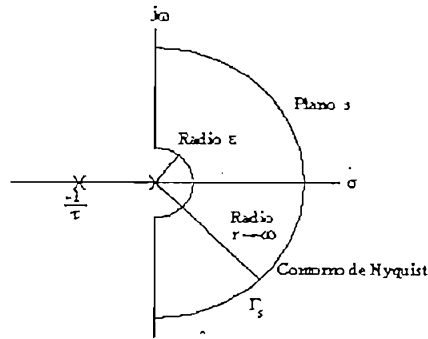


Fig. 2.21 Trayectoria de Nyquist

Cualquier polo $\Delta(s)$ que esté ubicado en el semiplano derecho del plano s será encerrado por la trayectoria de Nyquist.

Los pequeños semicírculos que se muestran en el eje $j\omega$ se dibujan para indicar que la trayectoria debe contornear estos polos y ceros si se encuentran ubicados sobre el eje $j\omega$.

El Criterio de Nyquist es una aplicación directa del principio del argumento, cuando el lugar geométrico Γ_s en el plano s es la trayectoria de Nyquist (Fig. 2.21).¹⁷:

Una vez que se ha especificado la trayectoria de Nyquist, la estabilidad del sistema se puede determinar al graficar el lugar geométrico $\Delta(s) = 1 + L(s)$, cuando s toma valores a lo largo de la trayectoria de Nyquist e investigar el comportamiento del lugar de $\Delta(s)$, con respecto al punto crítico, que en este caso es el origen del plano $\Delta(s)$, que corresponde al punto $(-1, j0)$ en el plano $L(s)$. Para definir la estabilidad de un sistema el Punto Crítico es el punto $(-1, j0)$; por facilidad se prefiere trabajar con $L(s)$.

Es necesario tomar en cuenta que la misma conclusión de estabilidad del sistema en lazo cerrado se obtiene al observar el comportamiento de la trayectoria de $L(s)$, con respecto al punto $(-1, j0)$ en el plano $L(s)$, que con respecto al origen¹⁷.

Tomando la ecuación 2.23 se tiene:

N: Número de veces que se encierra al punto $(-1, j0)$ por la trayectoria de $L(s)$.
 Z: Número de ceros de $1 + L(s)$ que están dentro de la trayectoria de Nyquist (el semiplano derecho del plano s)
 P: Número de polos de $1 + L(s)$ que están dentro de la trayectoria de Nyquist. Se debe tener en cuenta que los polos de $1 + L(s)$ son los mismos que los de $L(s)$.

El requisito de estabilidad establece que Z debe ser igual a cero, es decir se debe verificar la ecuación 2.24.

Para que un sistema en lazo cerrado sea estable, la trayectoria de $L(s)$ debe encerrar al punto $(-1, j0)$, un número de veces igual al número de polos de $L(s)$ que están en el semiplano derecho del plano s y los encierros si los hay deben ser hechos en dirección de las manecillas del reloj. (si Γ_s está definido en sentido contra las manecillas del reloj)¹⁸.

2.3.2 Existencia de Ciclos Límites y criterio de estabilidad.

Considérese el sistema de la figura:

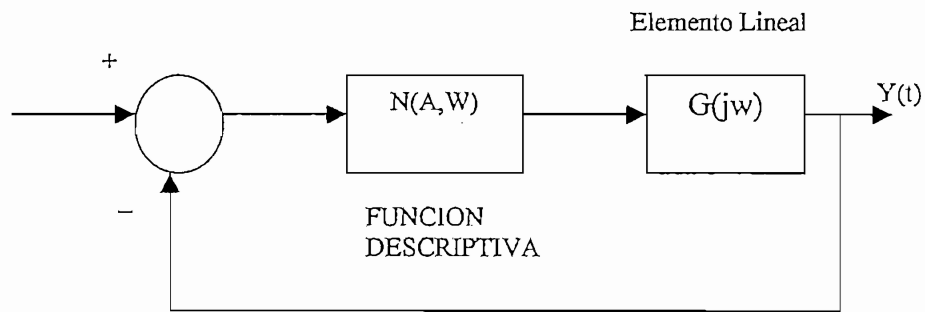


Fig. 2.22 Un sistema No-Lineal

Se considera que en el sistema existe una oscilación de amplitud A y frecuencia w , por tanto las variables en el lazo deberán satisfacer las relaciones:¹⁹

$$x = -y$$

$$w = N(A, w)x$$

$$y = G(jw)w$$

Luego se tiene $y = G(jw)N(A, w) (-y)$, porque $y \neq 0$, esto implica:

$$G(jw)N(A, w) + 1 = 0$$

Ecuación (2.25)

Que se puede escribir:

Ecuación (2.26)

$$G(jw) = -\frac{1}{N(A, w)}$$

La función descriptiva $N(A, w)$ en forma general tiene dos partes una parte real y una imaginaria. El método de aplicar la función descriptiva consiste en dibujar las dos expresiones $G(jw)$ y $N(A, w)$ y en el mismo gráfico encontrar los puntos de intersección de las dos curvas.

Así por ejemplo considérese el caso de que hay una Función Descriptiva que es función de la ganancia solamente, es decir $N(A, w)=N(A)$. Entonces la ecuación 2.31 es:

Ecuación (2.27)

$$G(jw) = -\frac{1}{N(A)}$$

Si se grafica la función de respuesta de frecuencia $G(jw)$ (variando w) y la negativa inversa de esta Función Descriptiva $(-1/N(A))$ (variando A) en el plano complejo, obtenemos una curva similar a la que se muestra en la figura 2.23:

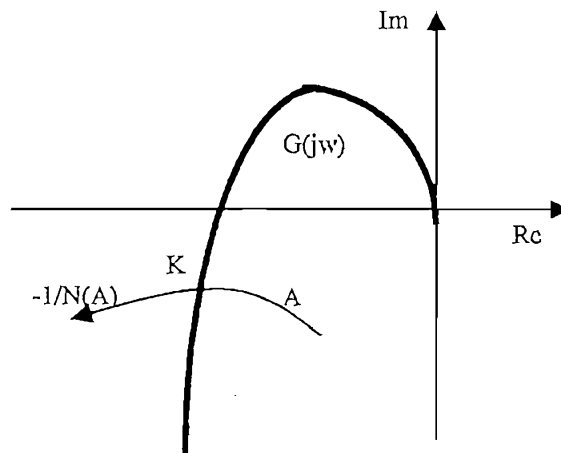


Fig 2.23: Detección de un ciclo límite

El punto K de intersección de las dos curvas es la solución de la ecuación 2.31, representa la existencia de un ciclo límite en el sistema, la amplitud del ciclo límite es A_K es decir el valor de A correspondiente al punto K de la curva $-1/N(A)$. La frecuencia del ciclo límite es w_K correspondiente al punto K de la curva $G(jw)$.¹⁹

Para el caso general si se tiene una serie de frecuencias de oscilación para el sistema propuesto se tendrá una serie de curvas de $-1/N(A)$, es decir cada intersección representará un ciclo límite y habrá tantos como número de puntos de intersección existan, esto se aprecia en la figura 2.24.²⁰

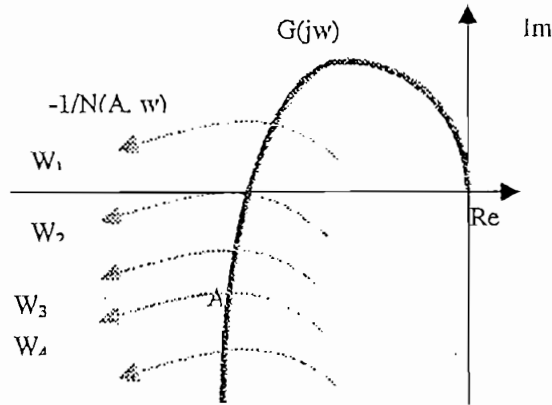


Fig. 2.24: Detección de un ciclo límite para varias frecuencias

El valor de A indica la amplitud del ciclo límite y el valor de w en el punto $(-1, 0)$ indica la frecuencia del ciclo límite.

Considérese el sistema de la figura 2.25, en el están graficados la respuesta de frecuencia y la inversa de la función descriptiva, de acuerdo a esto se ve que el sistema tiene dos ciclos límites.

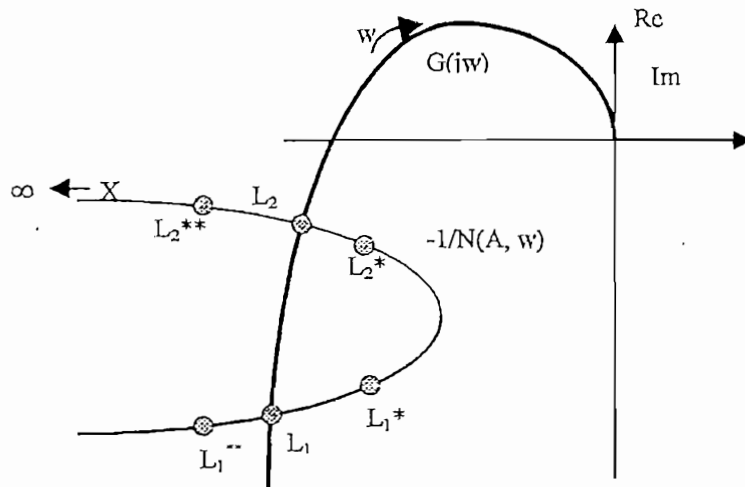


Fig. 2.25: Estabilidad del Ciclo Límite

Analizando el ciclo límite en el punto L_1 se tiene lo siguiente²⁷:

- Este punto tiene un ciclo límite de amplitud A_1 y su frecuencia es w_1 . Si se tiene una perturbación que cause que la amplitud de la señal de entrada del elemento no lineal se incremente levemente, el punto operativo del sistema se desplaza de L_1 a L_1^* . Como el nuevo punto está rodeado por la curva $G(jw)$, y de acuerdo con el criterio extendido de Nyquist el sistema en este punto de operación es inestable y la amplitud de la señal se verá incrementada, por tanto el punto de operación continuará moviéndose a través de la curva $-1/N(A)$ hasta llegar al ciclo límite establecido en el punto L_2 . En cambio si el sistema sufre una perturbación que decremente

la señal de salida, el punto de operación se desplaza al punto L_1^{**} , el lugar de $G(j\omega)$ no rodea al lugar de $-1/N(A)$ y la amplitud de la señal decrecerá y se alejará cada vez más del punto de operación. Es decir el ciclo límite en este punto es inestable, porque presenta características divergentes.

- Un análisis similar (con los puntos L_2^* y L_2^{**}), indica que el ciclo límite en el punto L_2 es estable.

En resumen se puede establecer lo siguiente:

Criterio del ciclo límite: Cada punto de intersección de la curva $G(j\omega)$ y la curva $-1/N(A)$ corresponde a un ciclo límite. Si los puntos cerca de la intersección y alrededor del incremento de A en la curva de $-1/N(A)$ no están rodeados por la curva $G(j\omega)$, entonces el correspondiente ciclo límite es estable, caso contrario el ciclo límite es inestable.²¹

2.3.3 Precisión del Método.

El método de la función Descriptiva tiene algunas limitaciones y es posible que se presenten ciertas imprecisiones:²²

- La amplitud y frecuencia de un ciclo límite no son precisas.
- Un ciclo límite predicho, no existe.
- Un ciclo límite que existe, no es predicho.

La primera de estas imprecisiones es la más común. Generalmente esto depende de que tan bien el sistema no lineal satisface las condiciones para aplicar la Función Descriptiva. Es necesario por tanto para obtener una mayor precisión la simulación del sistema no-lineal.

La ocurrencia de las otras dos imprecisiones son menos frecuentes y pueden ser detectadas examinando la respuesta de frecuencia del elemento no lineal y la posición relativa del diagrama $G(\omega)$ y del diagrama $-1/N$.

Es importante indicar que algunos sistemas no cumplen la condición de filtros pasabajos que es una condición fundamental para aplicar éste criterio.

Las condiciones del gráfico también nos dan una idea de la precisión o no del método. Si el lugar geométrico de $G(j\omega)$ es tangente al lugar de $-1/N$, las conclusiones del método pueden ser erróneas. Esto puede ser producido por la presencia de armónicos de orden alto. Como resultado de esto las imprecisiones dos y tres (de las enumeradas anteriormente) pueden ocurrir. Esto se aprecia en la figura 2.26 a continuación:

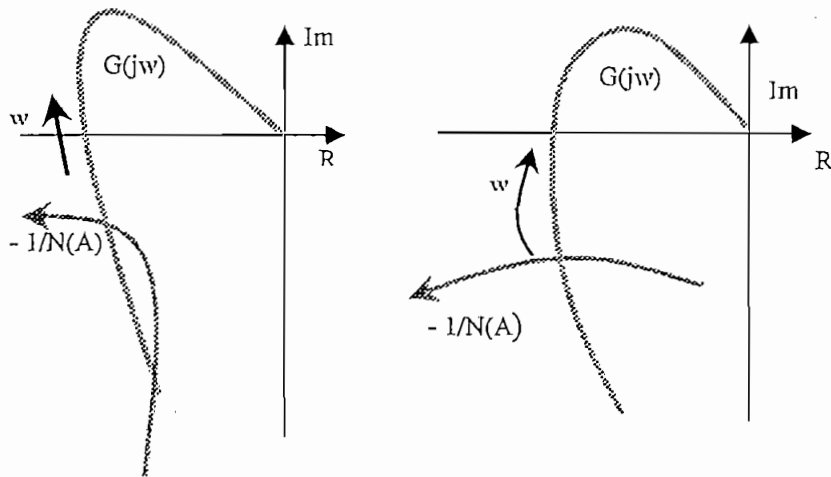


Fig. 2.26: (a).Gráfico de $G(j\omega)$ vs. $-1/N(A)$ que puede presentar errores.
 (b) Gráfico de $G(j\omega)$ vs. $-1/N(A)$ cuyos resultados son adecuados.

2.4 Sistemas No-Lineales Discretos.

2.4.1 Introducción.

Los avances en la tecnología de sistemas digitales han permitido contar con sistemas de control discretos, éstos presentan algunas ventajas sobre los analógicos.²³

- Bajo costo y bajo consumo de energía.
- Poca sensibilidad al ruido y a las variaciones de temperatura y de humedad.
- Alta precisión
- Alta versatilidad, facilidad de hacer cambios.

Estas características, junto al extendido uso de computadoras, han permitido que se implementen sistemas de control discreto.

Un sistema discreto trabaja con señales discretas que se definen como una secuencia de números muestreados. Para el análisis de los sistemas discretos existe la transformada z que es definida para una secuencia $f(k)$ como:²³

Ecuación (2.28)

$$Z[f(k)] = F(z) = \sum_{k=0}^{\infty} f(k)z^{-k}$$

Análogamente a las ecuaciones diferenciales que describen sistemas continuos para los sistemas discretos se tiene las ecuaciones de diferencias..

Si un sistema discreto es definido por la función de transferencia en z:

Ecuación (2.29)

$$T(z) = \frac{b_m z^m + b_{m-1} z^{m-1} + \dots + b_1 z + b_0}{z^n + a_{n-1} z^{n-1} + \dots + a_1 z + a_0}$$

La magnitud de la función de transferencia z evaluada en $z = \exp(j\omega)$ es la relación de la salida sobre la magnitud de la entrada.²⁴

Ecuación (2.30)

$$\frac{B}{A} = |T(z = e^{j\omega})|$$

El ángulo de la función de transferencia en z evaluado en $z = \exp(j\omega)$ es la diferencia de fase entre la entrada y la salida:

Ecuación (2.31)

$$\phi - \theta = |T(z = e^{j\omega})|$$

Estos resultados son similares a la contraparte continua pero la función de transferencia es evaluada en $s = j\omega$.

La función de transferencia discreta $G(z)$ si bien es diferente a la función de transferencia continua, describe la misma planta. Para obtenerla se discretiza la planta que representa el sistema mediante el empleo de un muestreador - retenedor de orden cero. (Zero Order Hold (ZOH)).

De manera similar las señales analógicas producidas por los sensores son digitalizadas a través de un conversor análogo a digital (A/D).

Una vez discretizadas se puede trabajar en el dominio discreto.

En forma similar a los sistemas continuos, los sistemas discretos pueden tener alinealidades muy marcadas en el lazo de control. Por ello se puede implementar métodos de análisis como el de la Función Descriptiva para determinar la estabilidad y predecir la existencia de ciclos límites.

2.4.2 Análisis de estabilidad con la FD.

Considérese el sistema de la figura 2.27.²⁵ en el se ve una función de transferencia en el dominio de z que representa la planta en serie con una alinealidad. Se nota la similitud a la figura 2.4 Las alinealidades presentes en los sistemas discretos son las mismas que en los continuos²⁵, sin embargo en éstos se tiene la presencia de una nueva alinealidad: la de cuantización que no se considera para los sistemas continuos.

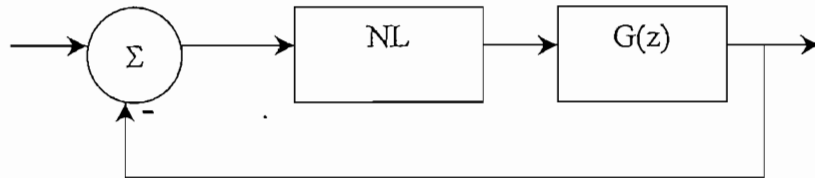


Fig. 2.27: Un Sistema Discreto con una Alinealidad en Serie.

La sección 2.3 estudia el cálculo de la F.D., el criterio de estabilidad es el mismo, lo que varía es la gráfica en el plano complejo, se gráfica en el plano z..

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

$0 < \omega T < 2\pi$

ωT es periódico con un período igual a 2π .²⁵

Si la curva de $G(e^{j\omega T})H(e^{j\omega T})$ interseca a la curva de $-1/N(A)$ el punto de intersección indica la presencia de un ciclo límite y su grado de estabilidad. El método permite de manera similar a los sistemas continuos obtener información acerca de la estabilidad del sistema.

2.4.3 Sistema de control con PC.

Para un sistema de control por computador, se debe considerar el efecto del conversor D/A. La no linealidad que puede representar a este conversor es la alinealidad de cuantización cuya función descriptiva es:²⁶ (ecuación 2.32).

$$Y_c(A) = 0; 0 < A < \frac{\delta}{2}$$

Ecuación (2.32)

$$Y_c(A) = \frac{4(\delta)}{A} \sum_{i=1}^n \sqrt{1 - \left[\frac{2i-1}{2A} \delta \right]^2}; \frac{(2n-1)}{2} \delta < A < \frac{(2n+1)}{2} \delta$$

Se tiene entonces un sistema como el de la figura²⁷:

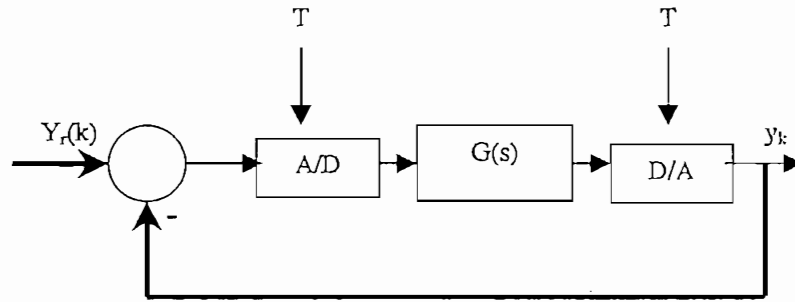


Fig. 2.28: Sistema de control discreto con realimentación de error unitario.

El conversor D/A puede ser modelado de dos maneras:

- Como una saturación ideal con una ganancia de 1 y límites de +/- 1 seguida de un muestreador retenedor de orden cero (Zero-Order-Hold).
- Como una alinealidad de cuantización.

En el primer caso se tiene un sistema como el que se muestra en la figura 2.29.²⁷

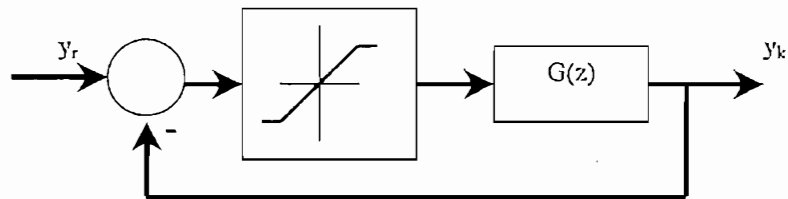


Fig. 2.29 Un sistema discreto con una alinealidad de saturación.

La no linealidad es representada por la función descriptiva (véase figura 2.12). Si se tiene una función de transferencia $G(s)$ dada por:

$$G(s) = \frac{3s^2 + 2s + 1}{s^3}$$

Se puede aplicar el muestreador retenedor de orden cero con un tiempo de muestreo $T = 0.1$ y se obtiene el modelo discreto $G(z)$ que es igual a:

$$G(z) = \frac{0.3102z^2 - 0.5993z + 0.2902}{(z-1)^3}$$

Si se gráfica el diagrama de Nyquist de esta función y en el mismo gráfico se traza el inverso negativo de la función descriptiva, (es decir se gráfica $-1/N$). Se obtiene (Figura 2.30):

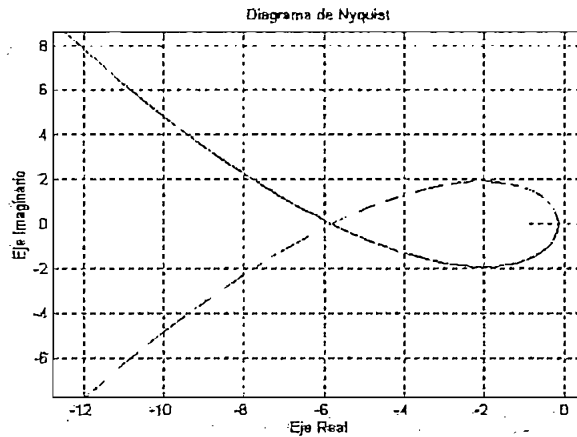


Fig. 2.30 Diagrama de Nyquist y de $-1/N$. Cortesía programa “estabnon”.

Este ejemplo se analiza en el capítulo 3 ejemplo 4. (página 68).

Si se analiza al convertor como una alinealidad de cuantización, se tiene la figura 2.31:²⁷

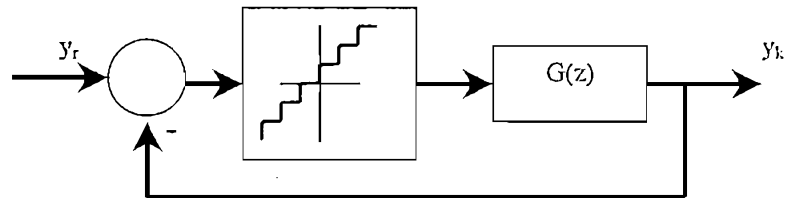


Fig. 2.31 Sistema discreto con alinealidad de cuantización..

La cuantización (cuya función descriptiva es dada por la ecuación 2.32) presenta los siguientes valores al implementar un convertor de 12 bits y con un rango de voltaje de +/- 1.0 V:

$$q = \frac{2V}{2^{12}} = \frac{V}{2^{11}} = 0.00048828$$

La intersección de las dos curvas predice un ciclo límite estable, con una amplitud de $q/2 = 0.000244$ y una frecuencia de 0.1 Hz.. Este ejemplo se analiza también en el capítulo 3. La gráfica 2.32 muestra la característica de la función descriptiva de la alinealidad de cuantización versus el valor de la amplitud normalizada con respecto a q (que es el valor de cada escalón o bit menos significativo).

Como nota final se puede decir que el análisis de estabilidad con la Función Descriptiva, la naturaleza de la intersección de $1/N$ y la función de transferencia de lazo abierto $G(e^{j\omega})$ puede proporcionar información acerca de la precisión del análisis del método de la F.D. El ángulo de intersección de ambas curvas debe ser elevado (si es perpendicular es lo más preciso), para que el método sea exacto. La presencia de armónicos que se obtienen en el cálculo de la Función Descriptiva (F.D.) determina la imprecisión del método si la planta no se comporta como un filtro pasabajos. Afortunadamente la mayoría de sistemas de control, especialmente los servomecanismos se consideran filtros pasabajos.²⁸

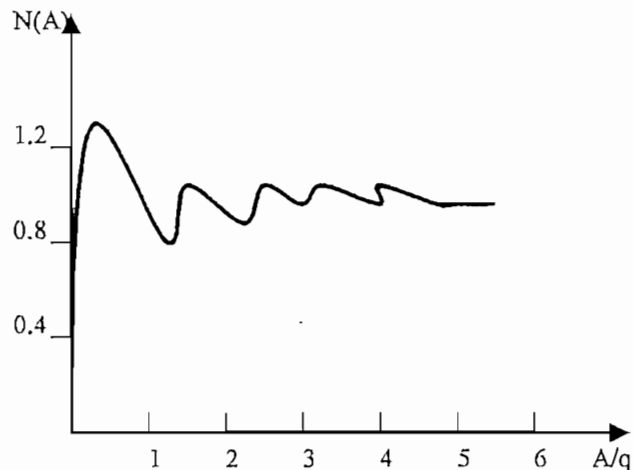


Fig. 2.32 Característica de la Función Descriptiva de la alinealidad de cuantización.²⁸

2.5 Referencias.

1. **OGATA Katsuhiko**, Ingeniería de Control Moderna, pág. 581, Pretince-Hall, primera edición, México 1980.
2. **SLOTINE Jean, LI Weiping**, Applied Nonlinear Control, pág. 9, Pretince-Hall, 1991.
3. **SLOTINE J.**, pág. 11.
4. **SLOTINE J.**, pág. 162.
5. **OGATA K.**, pág. 585.
6. **OGATA K.**, págs. 587 – 588.
7. **CARDENAS Wilmer**, Programa semigráfico para analizar la estabilidad de Sistemas no lineales usando la Función Descriptiva, tesis de ingeniería eléctrica, EPN, Quito 1994, pág. 22.
8. **CARDENAS W.**, págs. 23-24.
9. **OGATA K.**, págs. 592 – 593.
10. **CARDENAS W.**, págs 26.
11. **CARDENAS W.**, págs. 29 – 35.
12. **CARDENAS W.**, pág. 40.
13. **GIBSON John**, Non Linear Automatic Control, págs. 359 –360-361-362.

14. **KUO Benjamin**, Sistemas de Control Automático, pág. 557, Prentice-Hall, México 1996.
15. **KUO B.**, pág. 558.
16. **KUO B.**, pág. 560 - 562.
17. **KUO B.**, págs. 566 - 567.
18. **KUO B.**, pág. 568.
19. **SLOTINE J.**, pág. 182.
20. **SLOTINE J.**, pág. 184.
21. **OGATA K.**, pág. 595.
22. **SLOTINE J.**, págs. 186 - 187.
23. **SANTINA M., STUBBERUD A., HOSTETTER G.**, Discrete Time Systems, Control Handbook, pág. 239 CRC Press, 1996.
24. **SANTINA M.**, pág. 247.
25. **FRANKLIN G., POWELL J., WORKMAN M.**, Digital Control of Dynamic Systems, Addison Wesley 1998 3ra edición, págs 565 566, 567.
26. **FRANKLIN G.**, pág. 569.
27. **FRANKLIN G.**, pág. 566 - 568.
28. **FRANKLIN G.**, pág. 570 - 572.

Capitulo 3: Estructura del Programa.

3.1	Estructura del Programa.....	44
3.2	Interface para los Sistemas Continuos.....	46
3.3	Interface para los Sistemas Discretos	56
3.4	Referencias.....	60

CAPITULO 3

El programa está implementado en MatLab 5.0, versión estudiantil, tiene una estructura modular, por tanto se pueden realizar modificaciones con relativa facilidad; la programación en este tipo de lenguaje es similar a programar en lenguaje C.

Se ha diseñado una serie de pantallas donde el usuario puede interactuar con relativa facilidad, desde el ingreso de datos hasta el cálculo de frecuencias o amplitud. Además se implementó ayudas donde se consideró necesario.

3.1 Estructura del programa

La estructura del programa se ve en la figura 3.1; se diseñó de esta forma para que sea sencilla, fácil de utilizar y versátil.

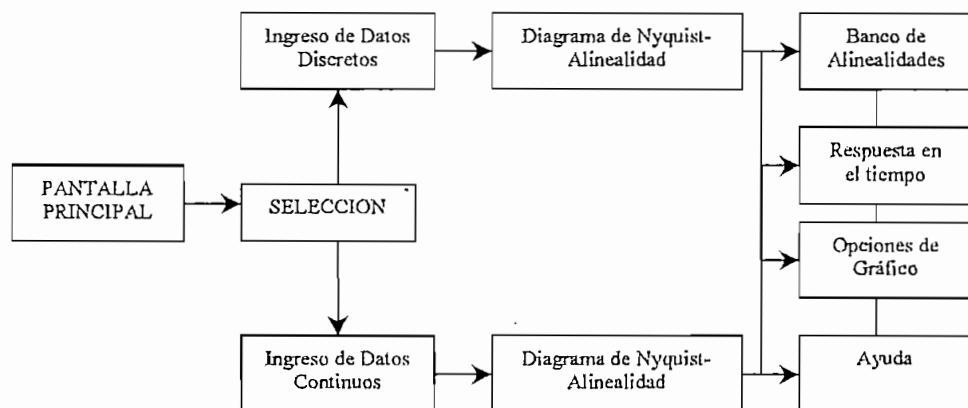


Fig. 3.1 Diagrama de bloques del programa.

De acuerdo a esta estructura se tiene la pantalla principal que se muestra en la figura 3.2. Esta pantalla da paso a una segunda (fig. 3.3) donde se escoge el tipo de sistema que se va a analizar. Se tiene dos alternativas, continuos y discretos.

Todas estas pantallas son de fácil utilización; tienen "botones" de control que permiten al usuario seguir adelante o salir si así lo desea, por lo que no se necesita una mayor explicación.



Fig. 3.2 Pantalla principal: Programa Estabnon.

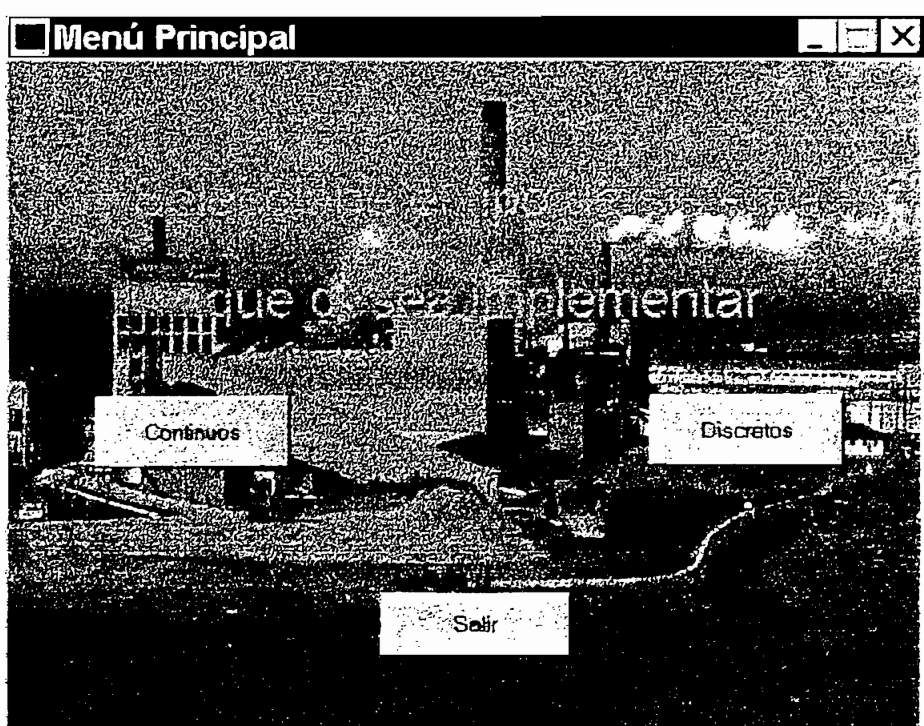


Fig. 3.3 Pantalla de Selección.

3.2 Interface para los sistemas continuos

Si se desea analizar los sistemas continuos se tiene un interface como el que se ve en la figura 3.4. Este permite ingresar los coeficientes de la función de transferencia de la planta del sistema para ser analizada.

La forma de ingresar los coeficientes es en forma descendente. Una vez elegido el sistema que se quiere analizar se presiona el botón de análisis y se pasa a la pantalla de Nyquist.

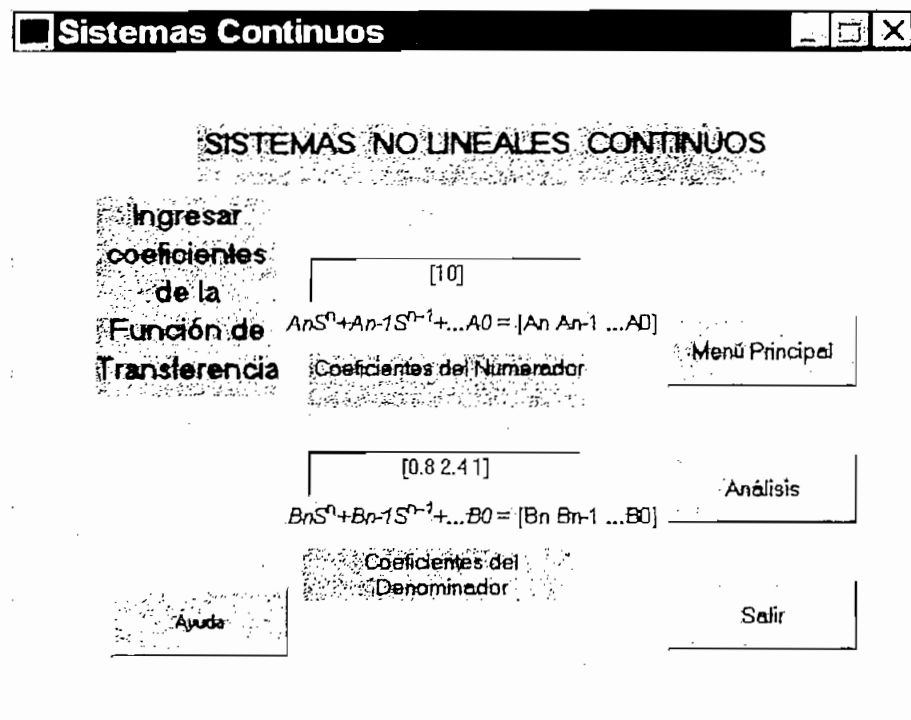


Fig. 3.4 Interface para sistemas no lineales continuos

Se implementó también un botón de ayuda, uno de regreso al menú principal, uno para salir y el botón para análisis.

En el interface se indica claramente la forma de ingresar los coeficientes.

El sistema a ser analizado sigue el esquema de la figura 2.4, y en esta parte se ingresa la función de transferencia. El tipo de alinealidad y el análisis correspondiente se tienen en la pantalla de Nyquist. (fig. 3.5).

En ella se tiene un menú , con 5 opciones:

- Funciones.
- Alinealidades
- Tiempo
- Gráfico
- Ayuda

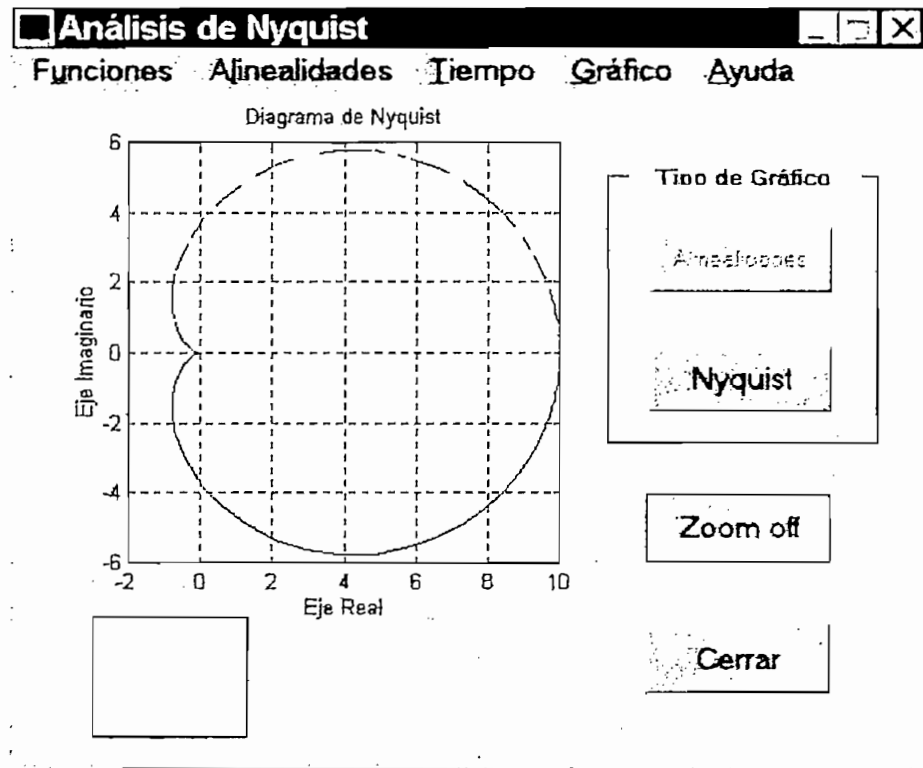


Fig 3.5 Pantalla de Nyquist para los sistemas no-lineales continuos.

Menú Funciones.

Este menú permite ver la función de la planta y por lo tanto cambiarla si así se desea sin ningún problema, o ingresar una compensación al sistema que se multiplicará por la función de transferencia, es decir se ha implementado una compensación en serie. Esto se ve en las figuras 3.6 y 3.7.

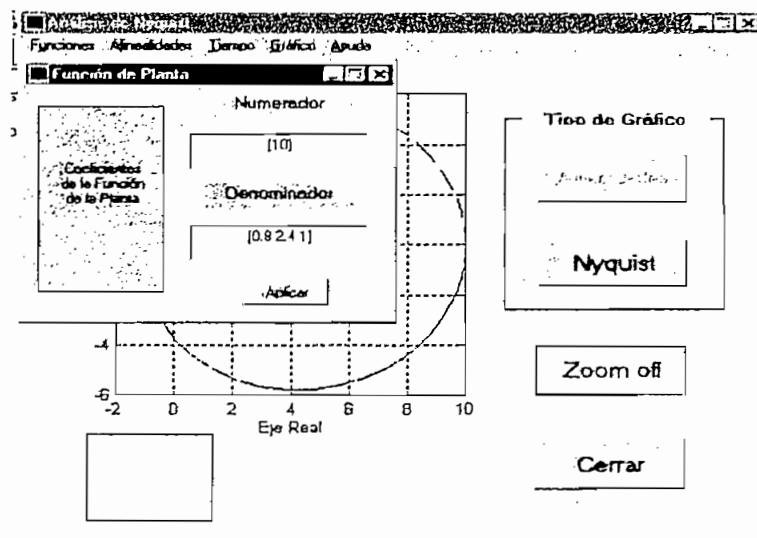


Fig. 3.6 Menú función, Submenú función de la planta.

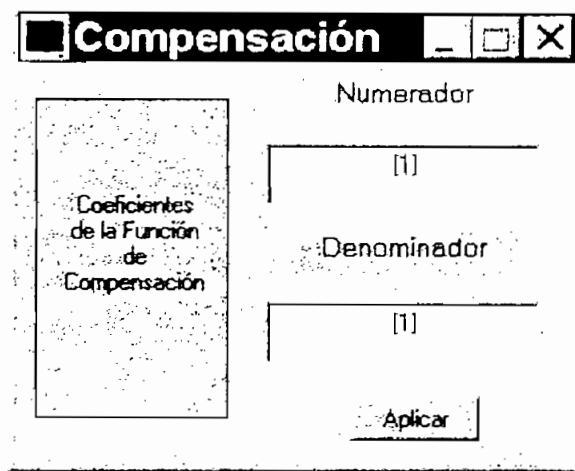


Fig. 3.7 Menú Funciones, submenú Compensación.

Menú Alinealidades.

Este menú proporciona al usuario, escoger un amplio espectro de alinealidades, que son de tres tipos básicos: Relés, Saturaciones e Histéresis.

Cada una de estas alinealidades tienen sus propias características, es decir el programa permite definir los diferentes parámetros de cada una de ellas. Esto se aprecia en las figuras 3.8: Relé con zona muerta, 3.9 Histéresis Ideal y 3.10 Saturación con pendiente.

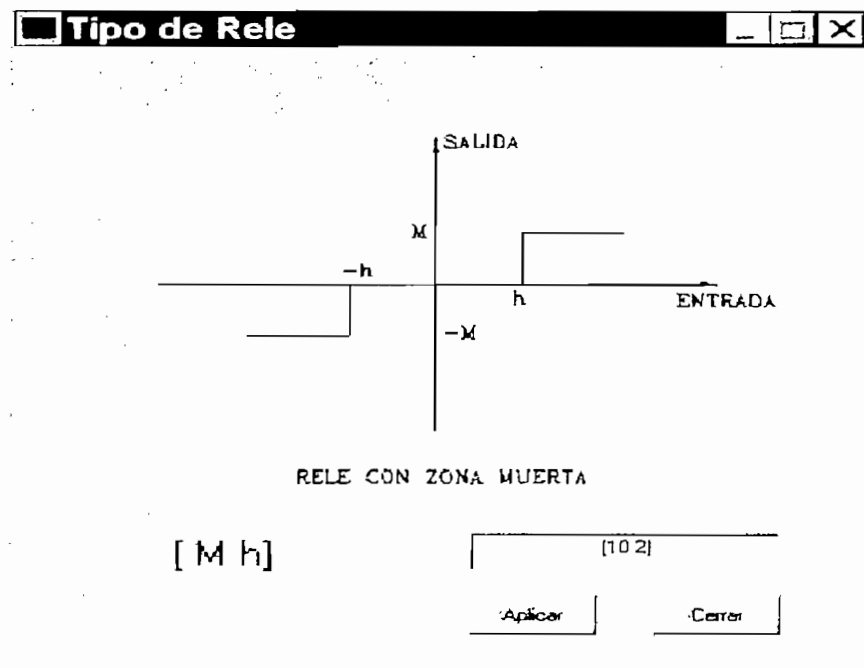


Fig. 3.8 Pantalla de interacción con el usuario para el caso de un Relé con zona muerta.

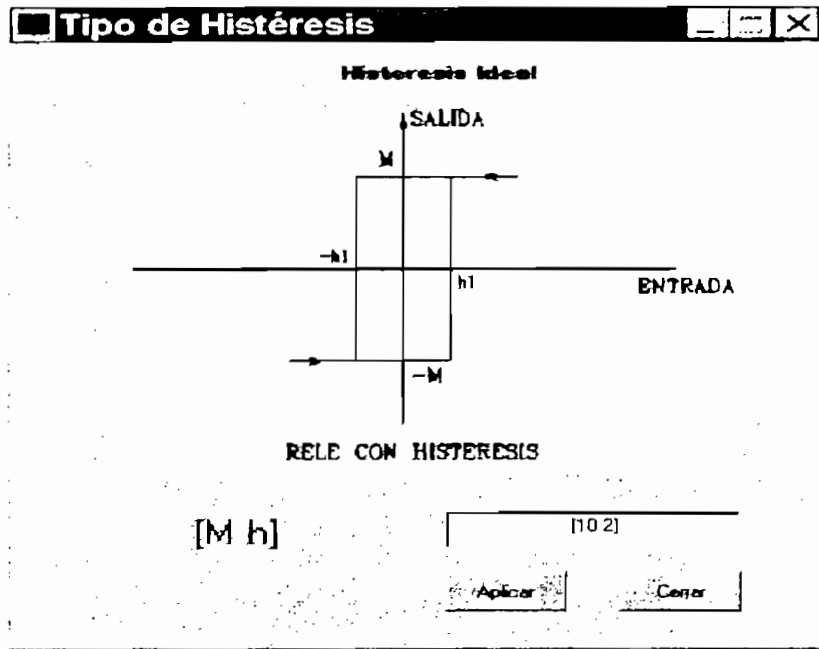


Fig. 3.9 Pantalla de interface para el usuario de la Histéresis Ideal.

En cada una de las interfaces implementadas se aprecian los parámetros que cada una de ellas necesita, dichos parámetros ya están definidos por defecto, pero se pueden cambiar.

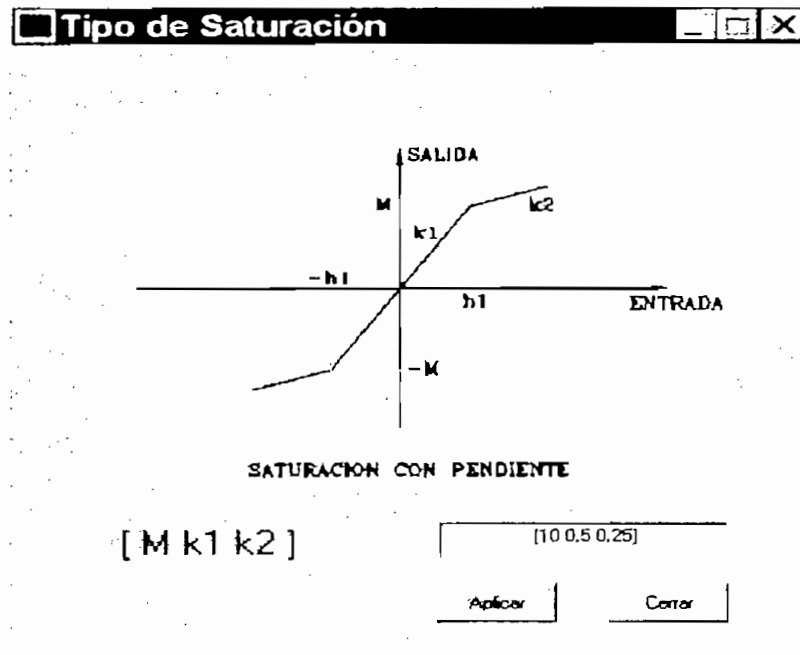


Fig. 3.10 Pantalla de interface para el caso de la saturación con pendiente.

El cuadro de diálogo de cada una de ellas tiene dos botones, el uno permite aplicar la alinealidad, es decir, definirla para colocarla en el lazo, (recuérdese la figura 2.4); el otro cierra la pantalla; si no se activa la opción aplicar el programa no reconoce la alinealidad escogida. El ingreso de los datos no presenta dificultad, la caja de texto tiene una matriz donde se indica como hacerlo. En el caso de que se ingrese un dato que no es un número presenta un mensaje de error. (Fig. 3.11).

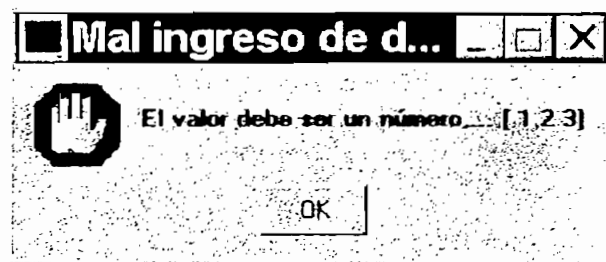


Fig. 3.11 Pantalla indicadora de error , cuando se ingresa un dato que no es un número.

Menú Tiempo.

Este menú se implementó para analizar en el tiempo, tres cosas: la alinealidad, la función de la planta ingresada y el lazo con alinealidad y la realimentación en serie. Se tiene dos respuestas:

- Respuesta a la función paso unitaria .
- Respuesta a la función impulso.

Las opciones están desactivadas hasta que el usuario haya escogido la alinealidad que va a ser colocada en el lazo de realimentación. De esta manera se puede hacer el análisis de Nyquist de la Función de Transferencia (F.T.) de la planta y en el mismo gráfico, trazar el inverso negativo de la Función Descriptiva (F.D.).

Una vez escogida la alinealidad e ingresado el valor de la magnitud de la senoide que define la F.D, recién en ese momento se activan todas las opciones, del menú tiempo. (figura 3.12). Las dos respuestas tienen una pantalla donde se tiene un submenú con dos opciones: Zoom y Utilidades (figura 3.13).

El primero (Zoom) permite ampliar el gráfico para observar detalles y el segundo (Utilidades), llama a una pantalla donde se puede imprimir, importar el gráfico, cortar entre otras opciones de una pantalla estándar de la versión estudiantil de Matlab, versión 5.0.

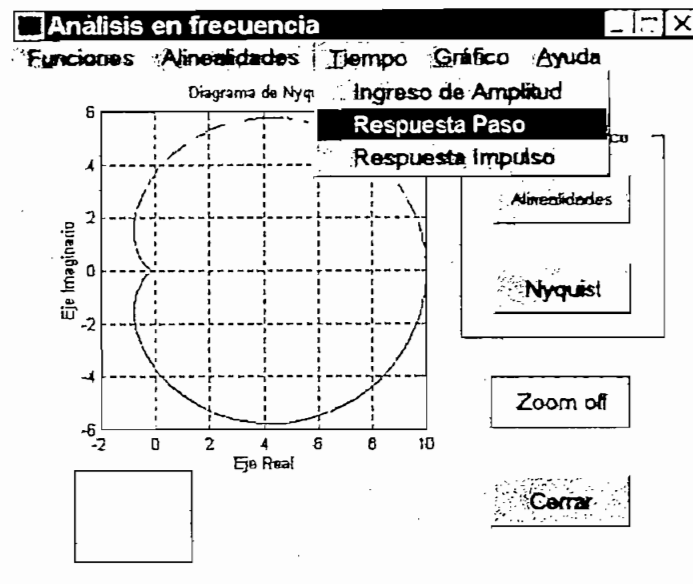


Fig. 3.12 Menú Tiempo con sus tres submenús activos una vez seleccionada la Alinealidad.

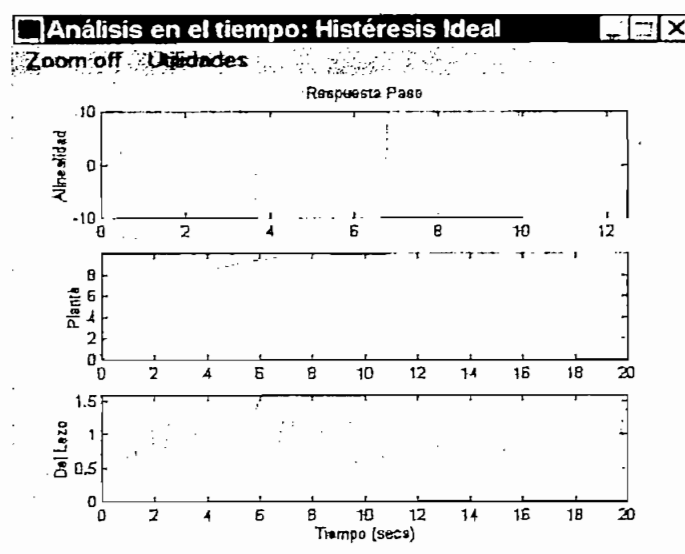


Fig. 3.13 Respuesta en el tiempo para una Alinealidad dada.

En la figura 3.13 se aprecia claramente las dos opciones mencionadas. El interface para la opción utilidades se ve en la figura 3.14.

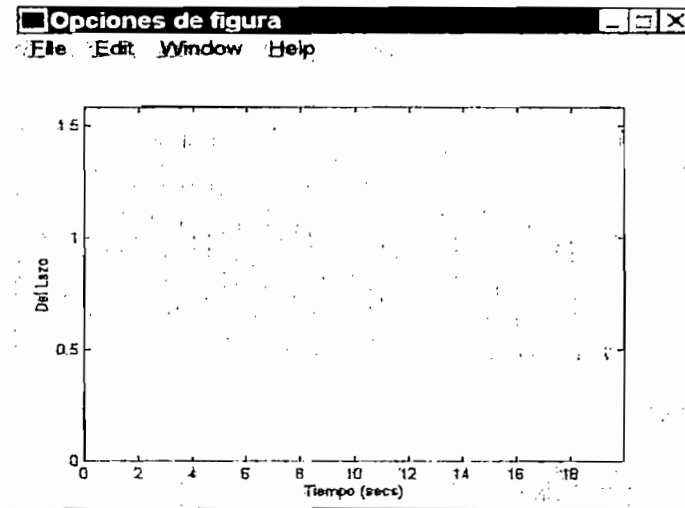


Fig. 3.14 Interface para la opción de respuesta en el tiempo.

Menú Gráfico.

Permite realizar los cálculos de todos los parámetros a ser analizados en la pantalla de Nyquist (figura 3.5). Este menú tiene 2 submenús: Opciones y Utilidades.

- Opciones.- Este submenú tiene cinco opciones que tienen que ver con el gráfico (figura 3.15). La primera proporciona un zoom del gráfico, la segunda y tercera son parámetros de frecuencia y amplitud, el cuarto permite determinar si existen dos o más cruces mediante un gráfico normalizado, y el último permite aumentar la resolución, es decir recalcular valores.

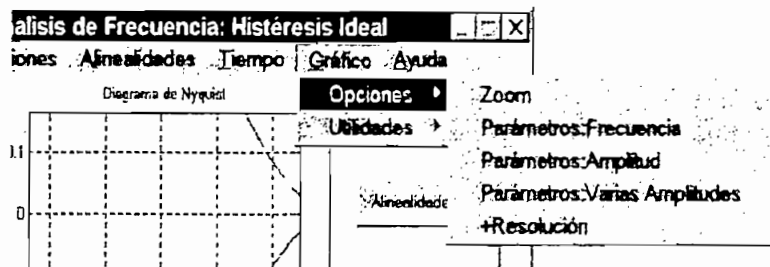


Fig. 3.15 Menú Gráfico, submenú opciones.

En el momento que se selecciona una alinealidad y una vez definidos los valores que ésta toma, el siguiente paso es presionar el botón de aplicar en la pantalla de la alinealidad y no cerrarla. Se ubica con el cursor en la pantalla de Nyquist y en este momento se ha activado el botón de Alinealidad. Se presiona este botón y se espera que en el diagrama de Nyquist se grafique la alinealidad.

Ahora se puede trabajar con las opciones del menú gráfico. Esto se observa en la figura 3.16 donde se aprecia que la curva de Nyquist cambia de color cuando se elige la opción Parámetros : Frecuencia. En el recuadro inferior de la pantalla se ve que aparecen los valores de frecuencia dados por el gráfico de Nyquist.

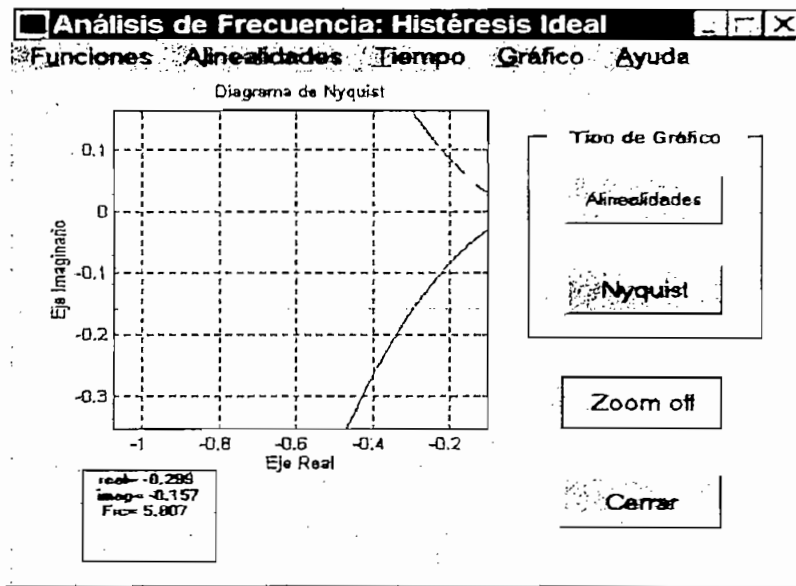


Fig. 3.16 Cuadro de datos en donde aparece el valor de la frecuencia, de acuerdo a la ubicación del cursor.

De manera similar se puede escoger la opción de Parámetros: Amplitud, dada por el gráfico de la Función Descriptiva, (curva $-1/N$, donde N es la Función Descriptiva), para saber el valor de la amplitud del ciclo límite. Esto se aprecia en la figura 3.17.

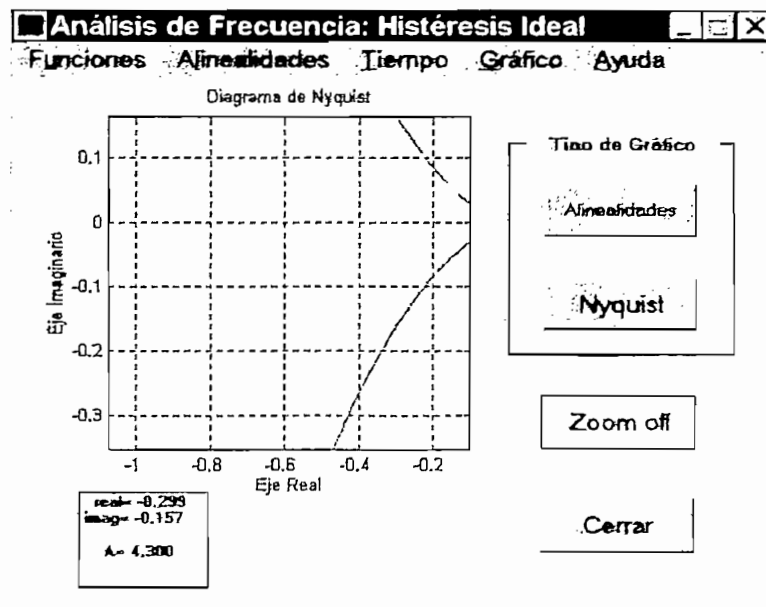


Fig. 3.17 Cuadro de datos con el valor de la amplitud, de acuerdo a la ubicación del cursor sobre la curva de $-1/N$.

La opción, Parámetros: Varias Amplitudes se hizo para el caso de que el gráfico de la Función Descriptiva se interseque dos veces con el diagrama de Nyquist pero siguiendo por el mismo camino, o que la diferencia sea muy pequeña para poder apreciarla; se implementó una pantalla donde se puede ver el gráfico de 2 curvas: por una parte el gráfico de la función $-1/N$ (curva color celeste) y por otra la curva de variación de amplitud (curva color verde), este gráfico presenta la opción de Zoom, de Variación de amplitud y de Resolución. Cuenta también con un botón para cerrar la pantalla. Figura 3.18:

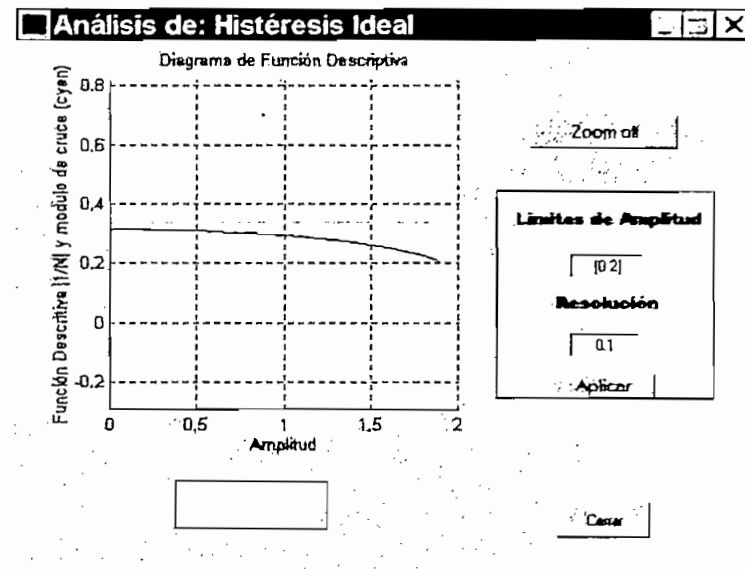


Fig. 3.18 Cuadro correspondiente al submenú : Parámetros varias Amplitudes.

Como se ve en la última pantalla a medida que crece la amplitud de la senoide que define la F.D. no se interseca nuevamente con la curva $-1/N$. Esta última pantalla permite escoger los límites de amplitud y la resolución.

- Utilidades.- Este submenú tiene dos opciones: Utilidades Externas y Búsqueda Gráfica. El primero permite de manera similar al utilidades de el gráfico en el tiempo tener una pantalla en Matlab donde se puede pegar el gráfico, cortarlo y tener todas las opciones del programa.

La opción de Búsqueda Gráfica en cambio fue diseñada para el caso de que el diagrama de Nyquist no se interseque con el gráfico de $-1/N$, y por tanto poder apreciar los dos gráficos en el mismo diagrama. Esto se puede ver en la figura 3.19 donde se aprecia el diagrama de Nyquist y el gráfico de la alinealidad en el mismo, pero con el detalle de que se ha tomado un valor bastante elevado de la amplitud, para la Función Descriptiva, (de hecho la amplitud tiende hacia un valor muy grande). El diagrama de Nyquist entonces tiende a verse aplanado por el valor de la escala.

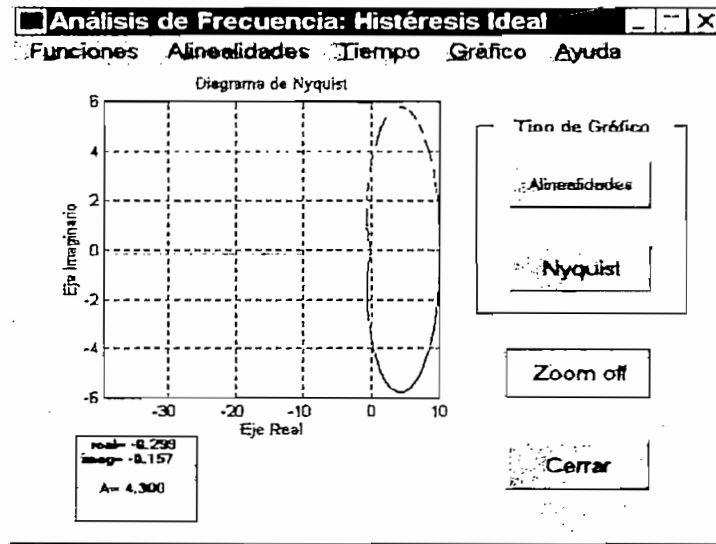


Fig. 3.19 Gráfico del submenú Utilidades donde se aprecia como varía la gráfica de la F.D. para amplitudes bien elevadas. Fijese en la escala en el eje Real.

Menú Ayuda.

Finalmente, se implementó un menú de Ayuda que tiene dos submenús: Ayuda y Acerca de.

El menú ayuda es específico para cada pantalla y llama a una ayuda general de Matlab, donde no solo se tiene información acerca de los menús implementados sino que se tiene acceso a cualquier comando de Matlab con su respectiva explicación.

Esto se ve en la figura 3.20.

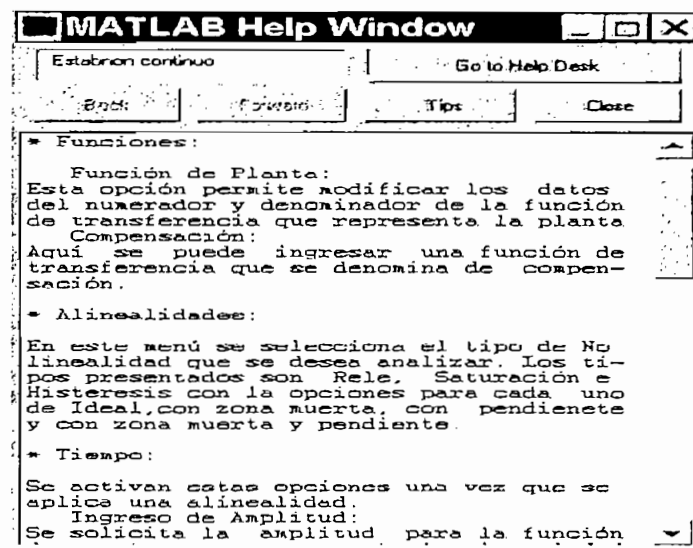


Fig. 3.20 Pantalla de ayuda implementada.

La opción Acerca de, proporciona información acerca del autor y el departamento al que pertenece. Figura 3.21 Esta pantalla es común a las dos pantallas de análisis principales, (Continuos y Discretos).

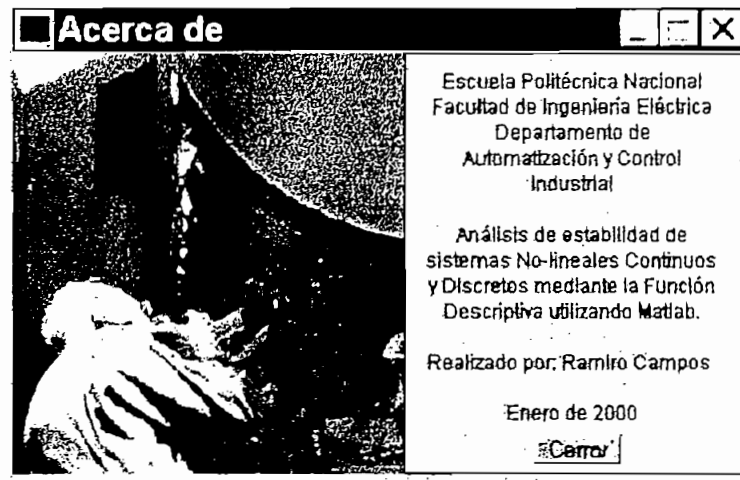


Fig. 3.21 Pantalla Acerca de.

3.3 Interface para los sistemas discretos.

Para analizar los sistemas discretos, se tiene que seleccionarlos en la segunda pantalla que proporciona el programa (figura 3.3). Hecho esto se ingresa a un interfase como el que se muestra en la figura 3.22. En él se ve que se pueden ingresar los coeficientes de la función de transferencia de la planta de dos maneras:

- Directamente en z para lo cual se escoge la opción correspondiente en un recuadro en la parte izquierda de la pantalla.
- En forma de los coeficientes en s , donde se debe ingresar el tiempo de muestreo para el Muestreador Retenedor de Orden Cero (Zero-Order-Hold) implementado, para discretizar la planta.

El ingreso de los coeficientes no representa ninguna dificultad, se debe hacerlo en forma similar al programa CC, (en forma descendente), en cada uno de los campos indicados para el efecto. Se hizo también un control de errores para el caso de que los coeficiente ingresados no sean valores numéricos.

Seleccionado el método de ingreso de la F.T. e ingresada ésta, se presiona el botón análisis y se ingresa a la pantalla de Nyquist discreto que al igual que para los continuos tiene una serie de menús y características que permiten el análisis de los sistemas.

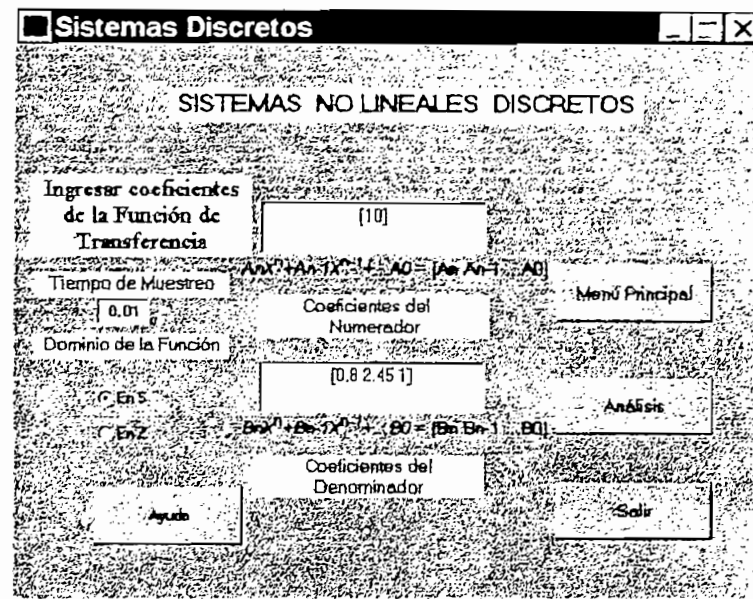


Fig. 3.22 Interface para los sistemas no-lineales Discretos.

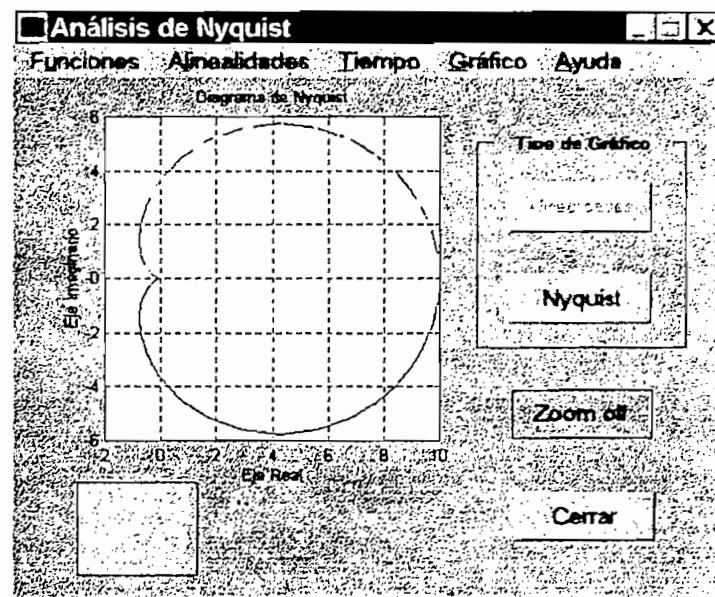


Fig. 3.23 Pantalla de Nyquist para los sistemas no lineales discretos.

La figura 3.23 muestra la pantalla de Nyquist implementada para los sistemas discretos. De acuerdo a ella se ve que se tiene los mismos menús que en la pantalla de Nyquist para los sistemas no lineales continuos, (figura 3.5).

El menú Funciones tiene las mismas opciones que el anterior: Función de transferencia de la planta y compensación, con la particularidad que la compensación debe ser ingresada en el dominio de z .

El menú Alinealidades presenta un esquema similar a los continuos, pero se ha añadido la alinealidad correspondiente a un conversor A/D que es propia de los sistemas Discretos y con la cual se puede implementar un control computarizado. (ver figura 2.33). En la pantalla de interfase desarrollada para esta nueva alinealidad se puede escoger el valor del escalón de cuantización, y el número de bits del conversor. Por defecto se ha puesto un valor de 0.001 y de 12 respectivamente, todo esto se ve en las figuras 3.24 y 3.25.

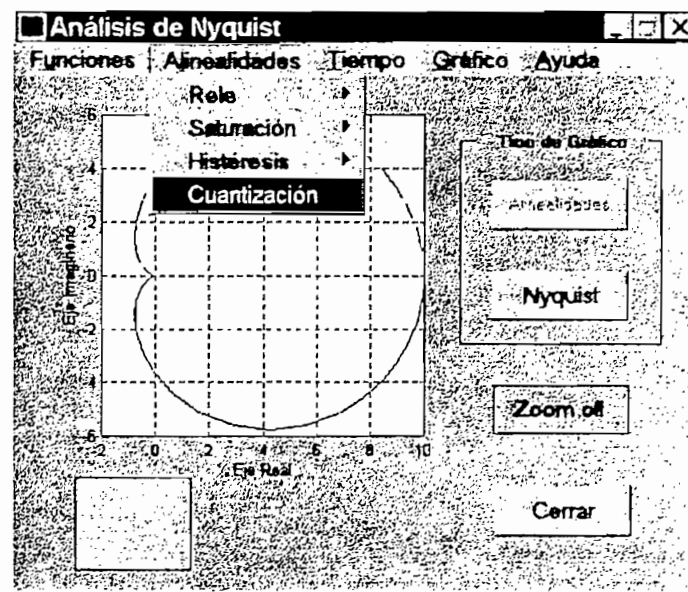


Fig. 3.24 Menú de Alinealidades donde se aprecia la Alinealidad de cuantización.

Las otras alinealidades se presentan tanto en los sistemas no lineales continuos como en los discretos, por ello son las mismas para ambos.¹

El menú de Tiempo es también similar al continuo al igual que las opciones del menú Gráfico. Se debe notar que el diagrama de Nyquist para los sistemas discretos difiere del diagrama de los continuos. (véase sección 2.3).

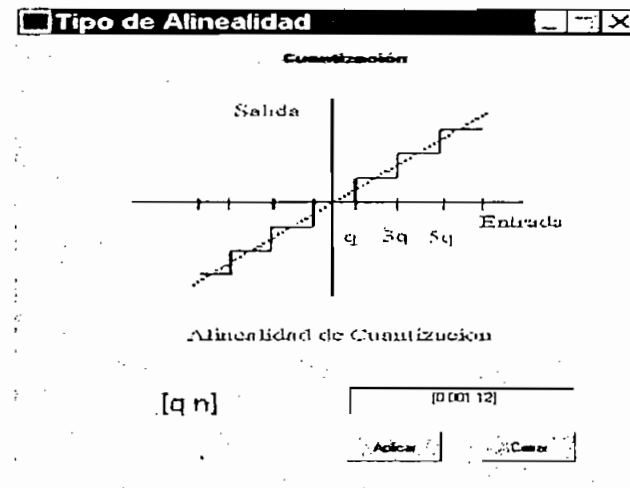


Fig. 3.25 Alinealidad de Cuantización.

El menú Ayuda tiene las dos opciones mencionadas anteriormente con la característica de que se tiene una ayuda propia para la pantalla de Nyquist discreto. Ver figura 3.26.

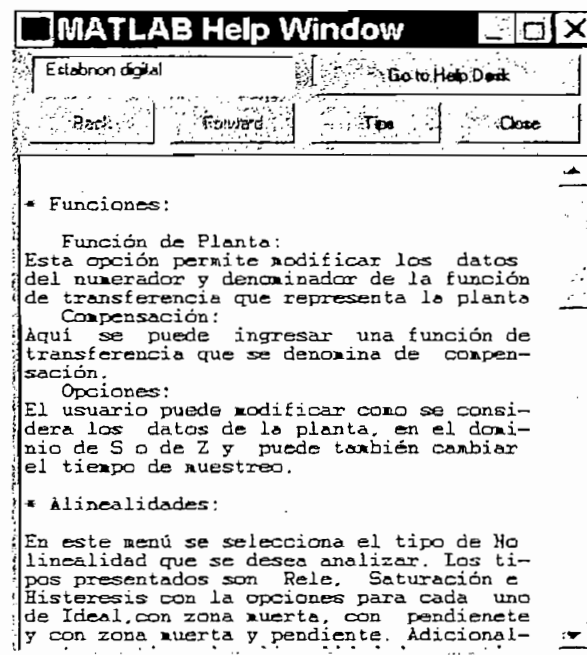


Fig. 3.26 Ayuda implementada para los Sistemas Discretos.

En el capítulo 4 se tiene los ejemplos de aplicación del programa y la verificación de los resultados.

3.4 Referencias.

1. **FRANKLIN G., POWELL J., WORKMAN M.**, Digital Control of Dinamyc Systems, Addison Wesley 1998 3ra edición, págs 565 566, 567.

Capitulo 4: Ejemplos de Aplicación.

- 4.1 Ejemplos de Aplicación.....62
- 4.2 Ejemplos para determinar las limitaciones del programa..... 72
- 4.3 Referencias 81

CAPITULO 4

En este capítulo se verá una serie de ejemplos de aplicación, mediante los cuales se comprueba la validez de los resultados obtenidos y por lo tanto la validez del programa. Se analiza sistemas continuos y discretos.

También se ve las limitaciones del programa y se hace un análisis de los errores obtenidos.

4.1 Ejemplos de Aplicación

- **Ejemplo 1.** El primer ejemplo es un sistema continuo. El esquema del sistema propuesto se lo puede ver en la figura 4.1. Este ejemplo ha sido tomado de Ogata¹.

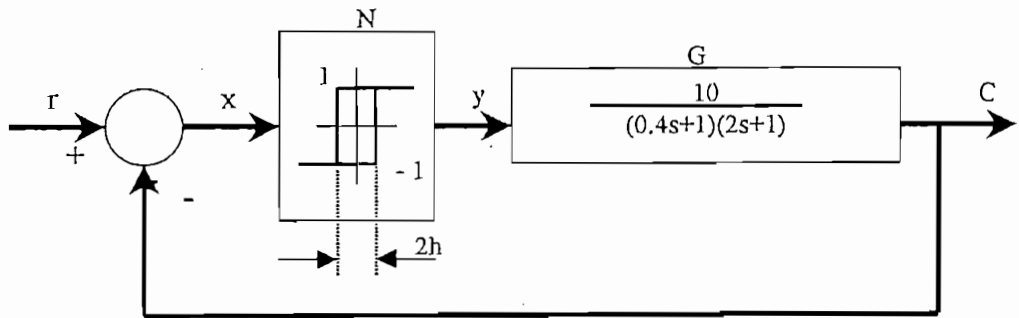


Fig. 4.1 Sistema de control no-lineal.

Los valores del parámetro h (que define el ancho de la Histéresis) son: $h = 0.1$ con este valor el programa presenta los siguientes resultados, ver figuras 4.2 y 4.3.

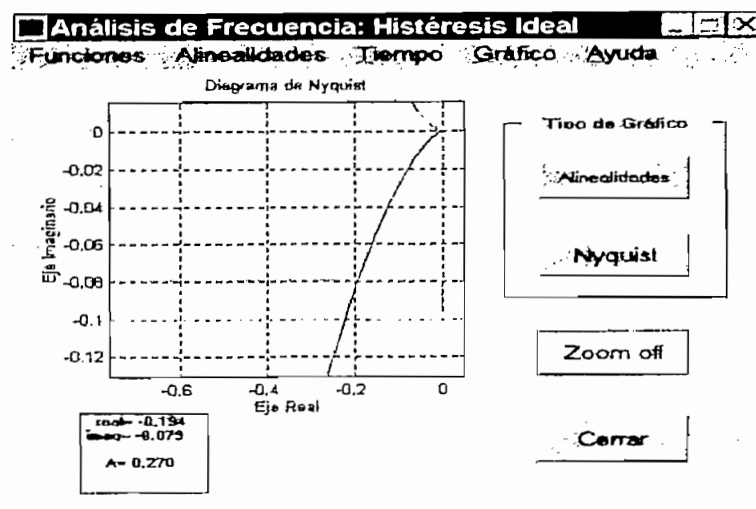


Fig. 4.2 Pantalla de resultados I: amplitud del ciclo límite, ejemplo de la figura 4.1, con el valor de $h = 0.1$.

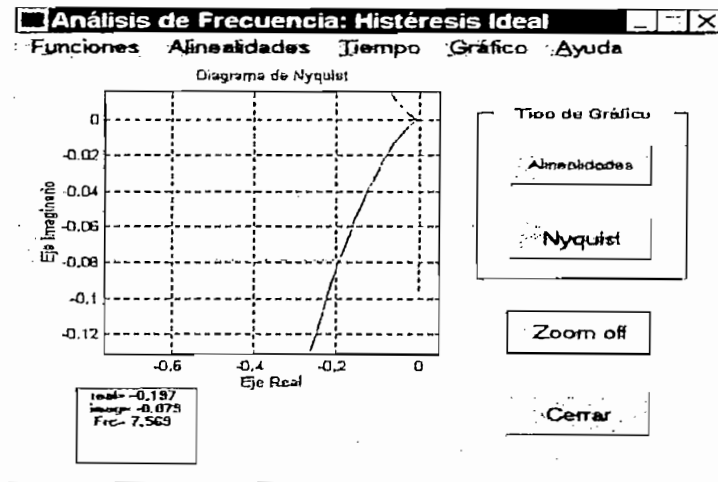


Fig. 4.3 Pantalla de resultados II: Frecuencia del ciclo límite figura 4.1.

Para el caso de un valor de $h = 0.2$ se tienen los siguientes resultados, ver figuras 4.4 y 4.5.

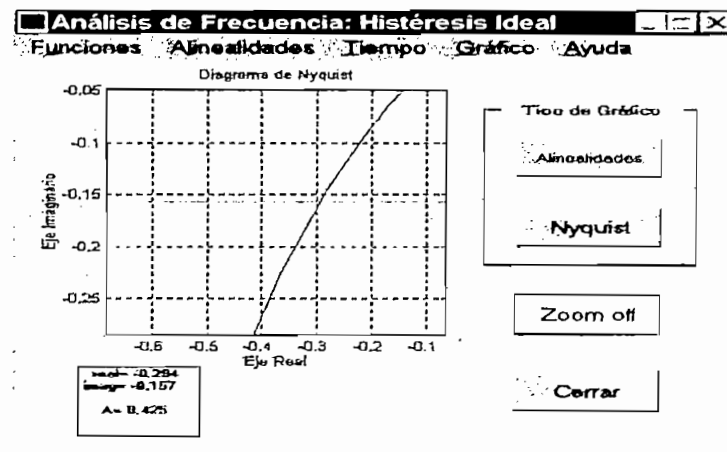


Fig. 4.4 Pantalla de resultados I: Amplitud del ciclo límite para el caso de $h=0.2$.

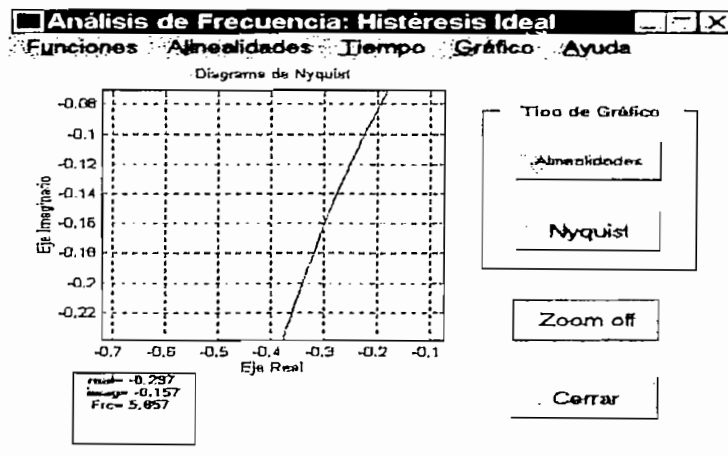


Fig. 4.5 Pantalla de resultados II: Frecuencia del ciclo límite para el caso de $h = 0.2$.

Para el caso de un valor de $h = 0.3$ se tienen los siguientes resultados, ver figuras 4.6 y 4.7.

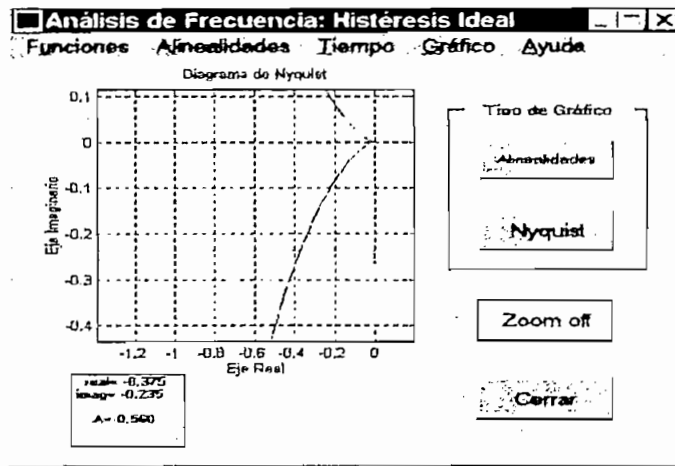


Fig. 4.6 Pantalla de resultados I: Amplitud del ciclo límite para el caso de $h=0.3$.

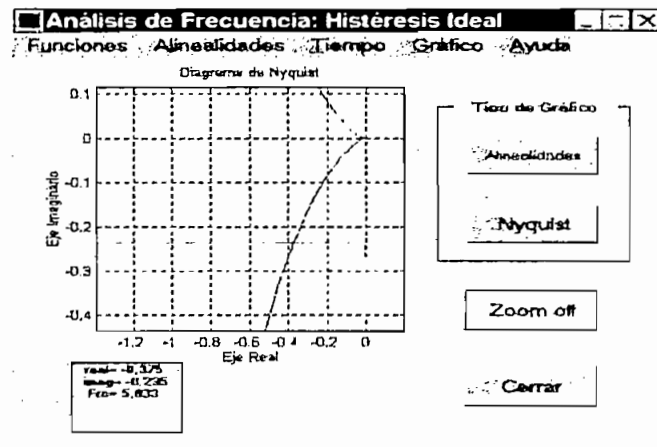


Fig. 4.7 Pantalla de resultados II: Frecuencia del ciclo límite para el caso de $h=0.3$.

Con estos datos se tiene el siguiente cuadro, (Figura 4.8):

Magnitud	Amplitud	Frec.
$H = 0.1$	0.27	7.569
$H = 0.2$	0.425	5.857
$H = 0.3$	0.56	5.033

Fig. 4.8 Resultados obtenidos por el programa estabnon para el ejemplo 1.

El error relativo entre los resultados obtenidos y los dados por Ogata,⁷ se muestra en la figura 4.9

Magnitud	Error - Amplitud[%]	Error - Freq. [%]
H = 0.1	0.00	8.42
H = 0.2	1.20	0.70
H = 0.3	1.75	1.31

Fig. 4.9 Cuadro de Errores relativos entre los resultados obtenidos por el programa estabnon y los dados para el ejemplo 1.

Se concluye que los resultados son bastante precisos en cuanto a magnitud. En cuanto a frecuencia se tiene un mayor error, esto se da cuando el valor de la histéresis es muy pequeño; para estos valores se tiene limitaciones en la resolución del programa debido al número de iteraciones que la versión de Matlab utilizada permite. (Recuérdese que se trabaja con la versión estudiantil). Sin embargo los resultados están dentro de valores aceptables. (Recuérdese también que el método de la F.D. es un método semigráfico y por lo tanto los resultados son aproximados).

- **Ejemplo 2.** Considérese el sistema de la figura 4.10 tomado del libro de Ogata.²

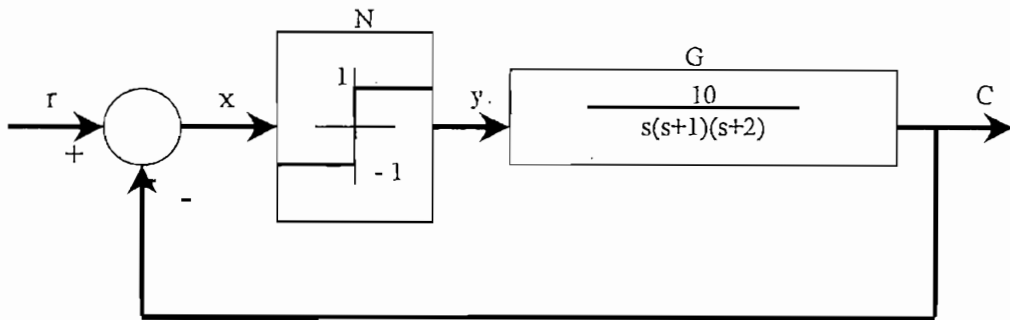


Fig. 4.10 Sistema no - lineal para el ejemplo 2.

Con este ejemplo el programa “estabnon” presenta los siguientes resultados. (ver figura 4.11 y 4.12).

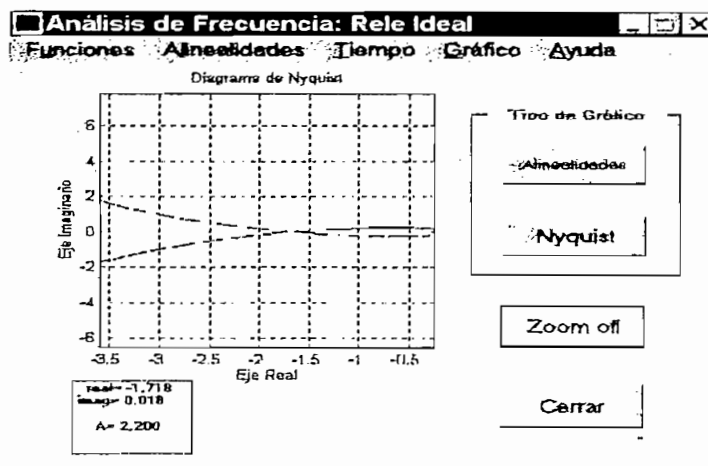


Fig. 4.11 Pantalla de resultados I: Amplitud del ciclo límite para el ejemplo dado.

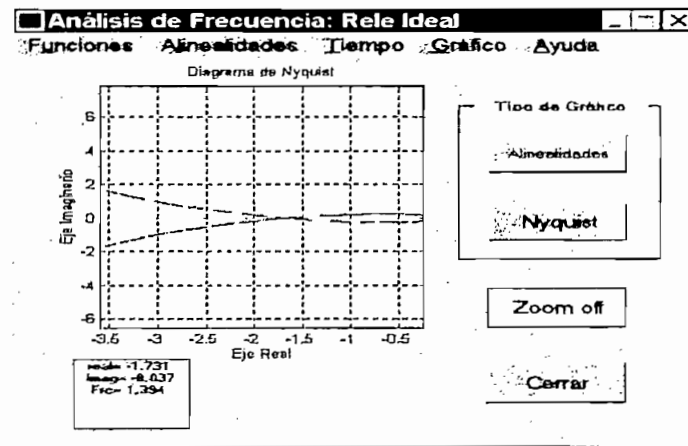


Fig. 4.12 Pantalla de resultados II: Frecuencia del ciclo límite para el ejemplo dado.

Los valores obtenidos por el programa y los dados por la tesis de Cárdenas.³ se muestra en la figura 4.13, con el respectivo valor de error relativo en porcentaje.

Magnitud	Prog. estab.	Tesis C.	Error [%]
Amplitud	2.2	2.122	3.67
Freq.	1.394	1.414	1.41

Fig. 4.13 Cuadro comparativo para los valores obtenidos, para el ejemplo 2.

La figura 4.14 muestra la respuesta en el tiempo del sistema, para una entrada paso unitaria.

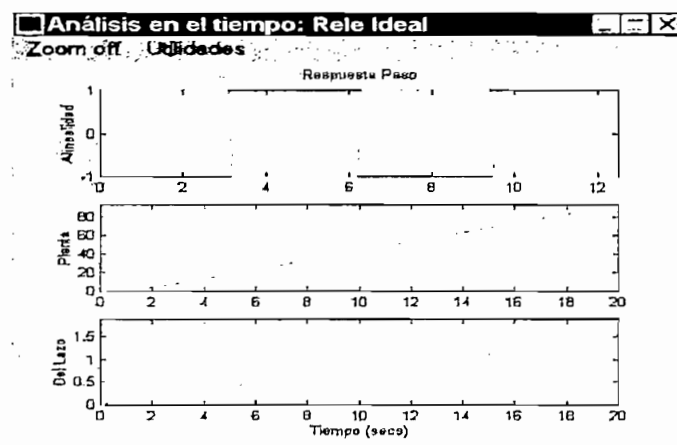


Fig. 4.14 Respuesta en el tiempo para el sistema del ejemplo 2.

Para este caso en particular, se tiene un mayor error en la amplitud, que en la frecuencia, de manera similar al caso anterior, sin embargo los resultados son bastante exactos. Esto permite probar la validez de los resultados y por tanto del programa implementado.

- **Ejemplo 3.** Para este ejemplo se tiene un sistema como se muestra en la figura 4.15.⁴

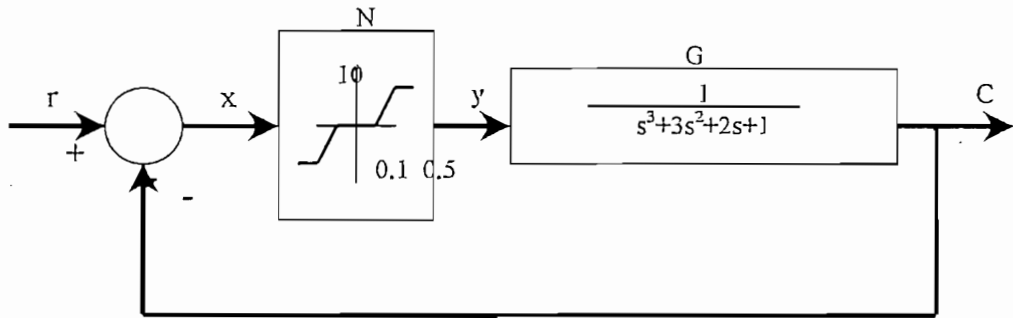


Fig. 4.15 Sistema de control no lineal

En este sistema se tiene una saturación con zona muerta en serie con una planta. Los resultados del programa son los siguientes: (ver figuras 4.16 y 4.17).

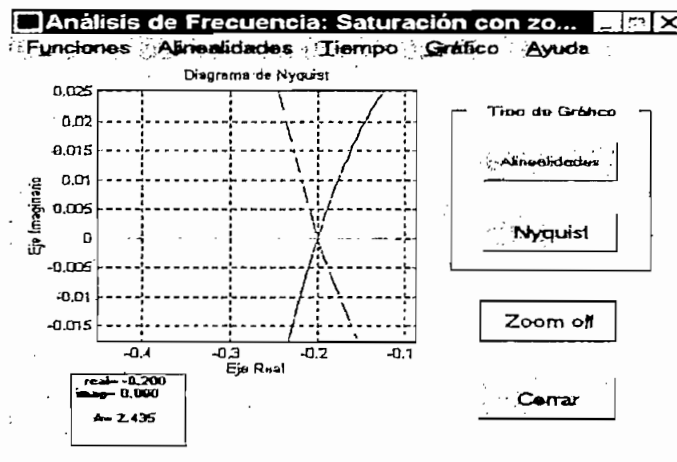


Fig. 4.16 Pantalla I: Amplitud del ciclo límite para el ejemplo de la figura 4.15.

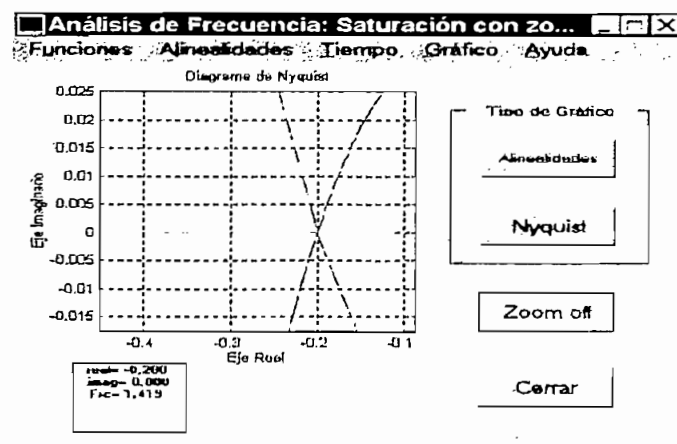


Fig. 4.17 Pantalla II: Frecuencia del ciclo límite para el ejemplo de la figura 4.15.

Los resultados, se ven en la tabla de la figura 4.18:

Magnitud	Prog. estab.	Resultado teor.	Error [%]
Amplitud	2.435	2.526	3.60
Freq.	1.419	1.414	0.35

Fig. 4.18 Tabla de valores con su respectivo error relativo.

Para este ejemplo y de acuerdo a lo obtenido, se ve que el máximo error se produce en el cálculo de la amplitud del ciclo límite. El error en frecuencia es prácticamente despreciable. Los resultados están dentro del rango de aceptación (menor al 5 %).

- Ejemplo 4.** A continuación se tiene un ejemplo de un sistema discreto. En este se considera una función de transferencia continua, $G(s)$, un período de muestreo T para su discretización y se considera una alinealidad de saturación ideal que representa un conversor A/D. Este ejemplo ha sido tomado de Franklin.⁵

La función de transferencia a ser analizada es la siguiente:

$$G(s) = \frac{3s^2 + 2s + 1}{s^3}$$

El conversor puede ser modelado como una alinealidad de saturación con ganancia unitaria y límites de ± 1 . El período de muestreo $T = 0.1$. La planta discretizada mediante un Zero – Order – Hold es:

$$G(z) = \frac{0.3102z^2 - 0.5993z + 0.2902}{(z-1)^3}$$

El esquema del problema es entonces: (véase figura 4.19)⁵

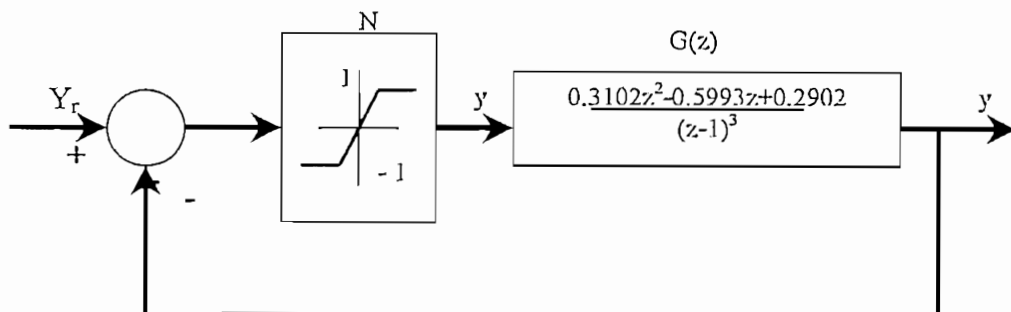


Fig. 4.19 Sistema de control no lineal discreto.

El programa “estabnon” proporciona los siguientes resultados. Véase figuras 4.20, 4.21, 4.22 y 4.23.

En la figura 4.20 se ve el diagrama de Nyquist y casi no se puede apreciar el gráfico de la alinealidad, por lo que es necesario realizar un acercamiento (opción zoom del programa, véase capítulo 3).

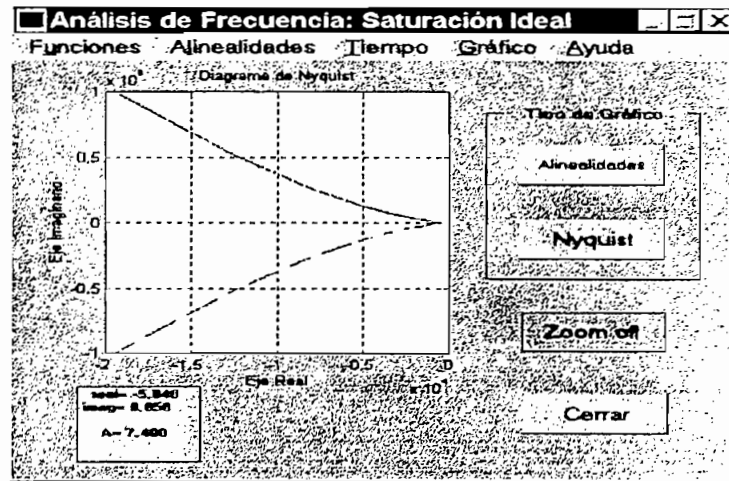


Fig. 4.20 Diagrama de Nyquist y alinealidad para el ejemplo 4. Nótese el diagrama de la alinealidad en el extremo izquierdo de Nyquist. (Se ve como una pequeña línea roja).

Una vez hecho el acercamiento respectivo se puede apreciar el cruce que existe entre el diagrama de Nyquist y la F.D. de la alinealidad. Figura 4.21.

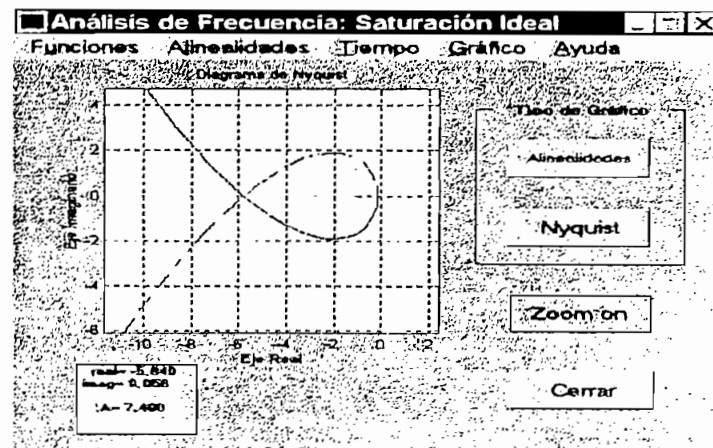


Fig. 4.21 Diagrama de Nyquist y de la F.D. pero con un mayor acercamiento. (opción Zoom).

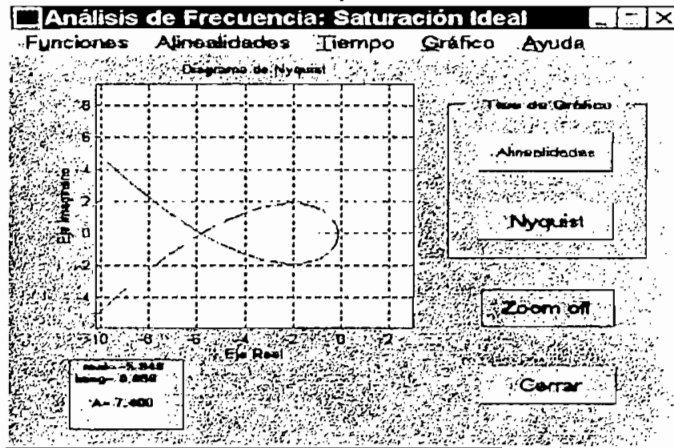


Fig. 4.22 Pantalla de resultados I: Ciclo limite encontrado para el ejemplo 4.

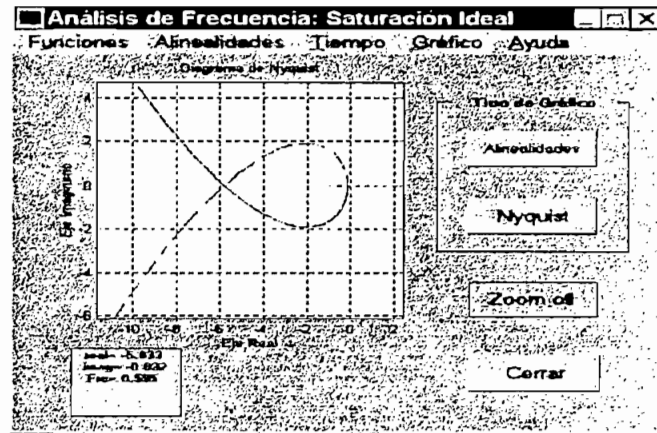


Fig. 4.23 Pantalla de resultados II: Valor de frecuencia encontrado, ejemplo 4.

En la figura 4.24 se presenta la tabla de resultados, comparados con los de la referencia y con su respectivo error relativo en porcentaje.

Magnitud	Prog. estab.	Resultado teor.	Error [%]
Amplitud	7.4	7	5.71
Freq.	0.0947	0.0923	2.60

Fig. 4.24 Tabla de valores con su respectivo error relativo.

Para probar la validez del método de discretización usado en el programa, se ingresó los valores de la función de transferencia directamente en z , usando la opción que fue implementada en el interface de Nyquist discreto. Los resultados obtenidos son: (véase figuras 4.25, 4.26 y 4.27).

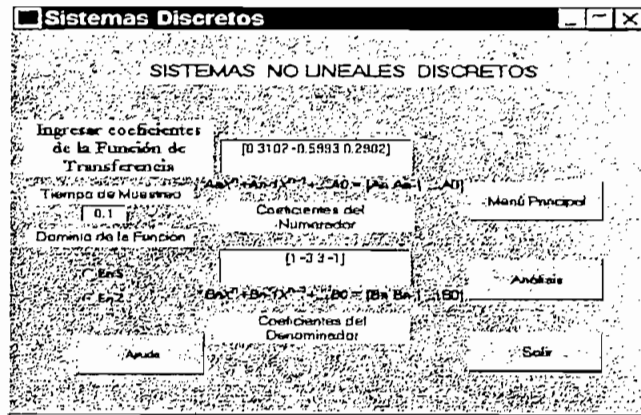


Fig. 4.25 Pantalla de ingreso de datos en z para el ejemplo 4.

Los interfaces de Nyquist digital, implementados para la amplitud y frecuencia son:

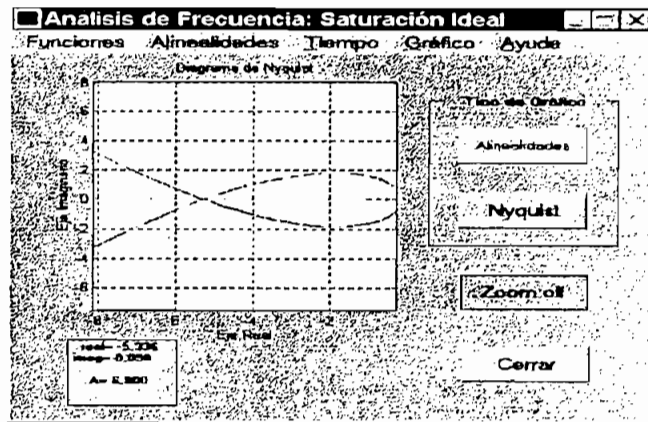


Fig. 4.26 Pantalla de resultados I: Amplitud del ciclo límite.

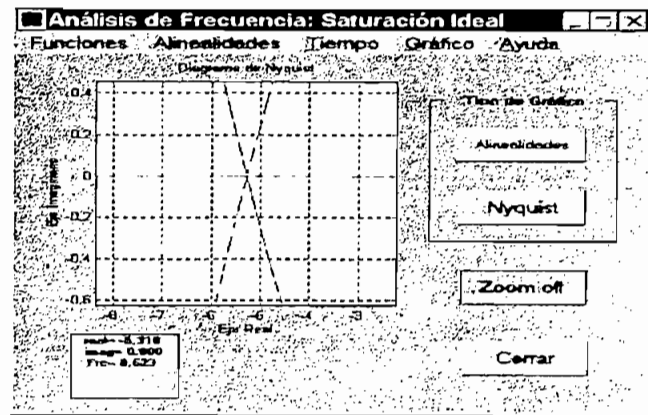


Fig. 4.27 Pantalla de resultados II: Frecuencia del ciclo límite.

Los resultados se muestran en la siguiente tabla. (Figura 4.28):

Magnitud	Prog. estab.	Resultado teor.	Error [%]
Amplitud	6.8	7	2.86
Freq.	0.0992	0.0923	7.47

Fig. 4.28 Tabla de valores con su respectivo error relativo, ejemplo 4.

De acuerdo a estos se concluye que cuando se ingresa los valores en s y luego se discretiza utilizando el programa el error en amplitud es mayor (el doble). Cuando se ingresa los coeficientes en z el error en frecuencia aumenta (2.87 veces). Se debe ingresar los coeficientes exactos en z , en la referencia (4) esto es una aproximación. De todas formas los valores obtenidos son correctos y están dentro del rango de error permisible.

4.2 Ejemplos para determinar las limitaciones del programa.

- **Ejemplo 5.** El primer ejemplo que se va a implementar para ver las limitaciones del programa es un sistema sumamente rápido.⁶ Véase figura 4.29.

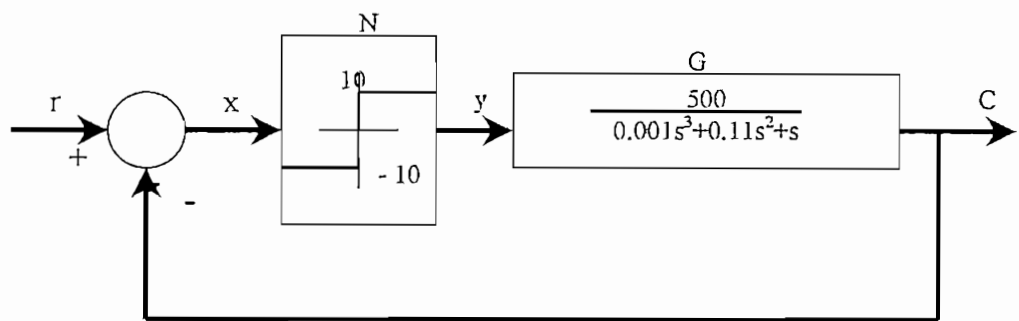


Fig. 4.29 Sistema no lineal On-Off

El diagrama de Nyquist para este sistema con la respectiva gráfica de la F.D. es (Figura 4.30):

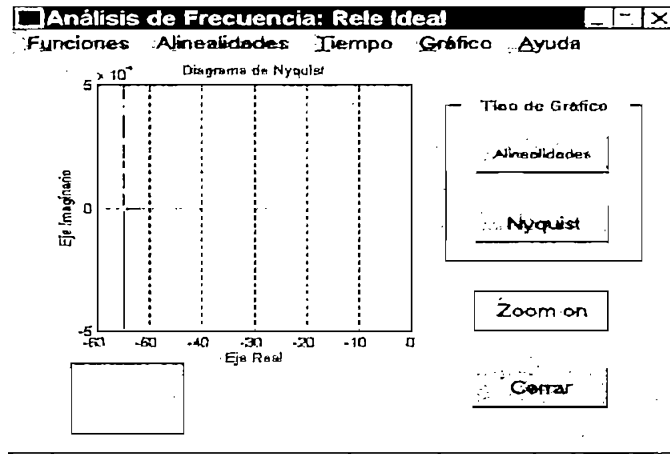


Fig. 4.30 Pantalla de Nyquist continua para el sistema de la figura 4.28.

Aplicando la opción zoom y calculando el valor del ciclo límite y la frecuencia del mismo se tiene. (Véase figuras 4.31 y 4.32).

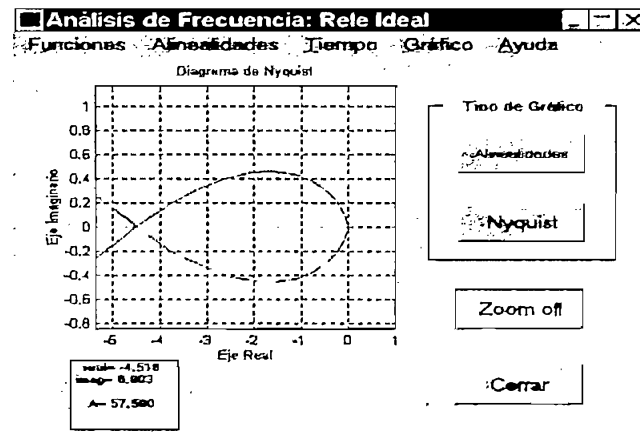


Fig. 4.31 Cálculo del valor de amplitud del ciclo límite encontrado.

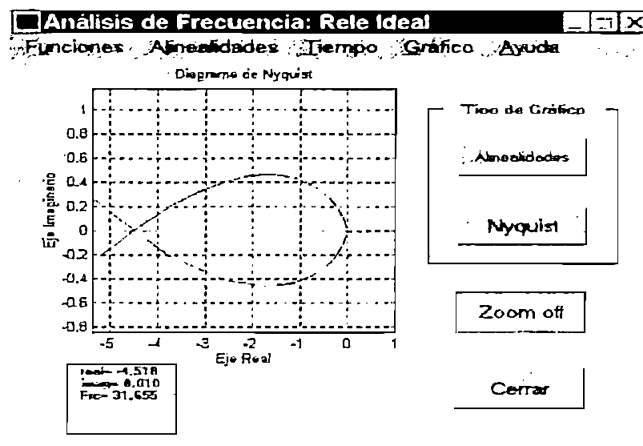


Fig. 4.32 Cálculo del valor de frecuencia del ciclo límite encontrado.

Si se analiza la respuesta en el tiempo se tiene lo siguiente. (Véase figura 4.33):

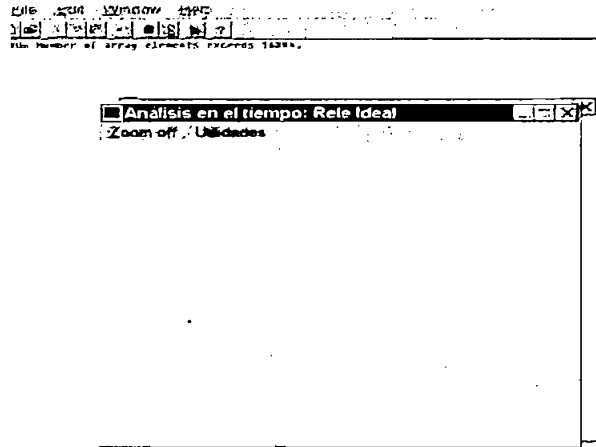


Fig. 4.33 Pantalla que muestra el programa debido a que los cálculos exceden la capacidad del Matlab Estudiantil.

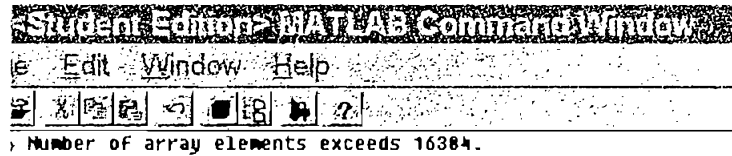


Fig. 4.34 Ampliación de la pantalla anterior donde se muestra el mensaje que se presenta en el Prompt de Matlab.

En este ejemplo en particular la limitación del programa se tuvo en la respuesta en el tiempo, donde se tuvo que los cálculos realizados superaron el máximo de arreglos permitidos por la versión del programa. En el caso del cálculo de la amplitud del ciclo límite y su frecuencia no se tuvo problema.

- **Ejemplo 7.** Para este ejemplo se tiene un sistema como el que se muestra en la figura 4.35.⁶

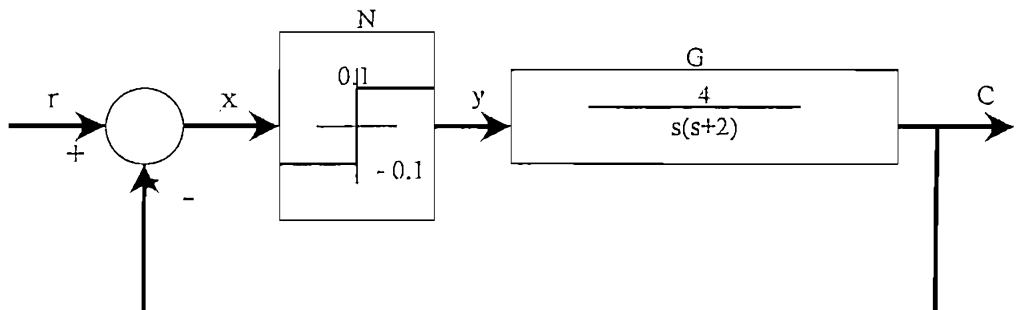


Fig. 4.35 Sistema no lineal con alinealidad tipo relé.

Para este ejemplo los resultados son: (véase figuras 4.36 y 4.37).

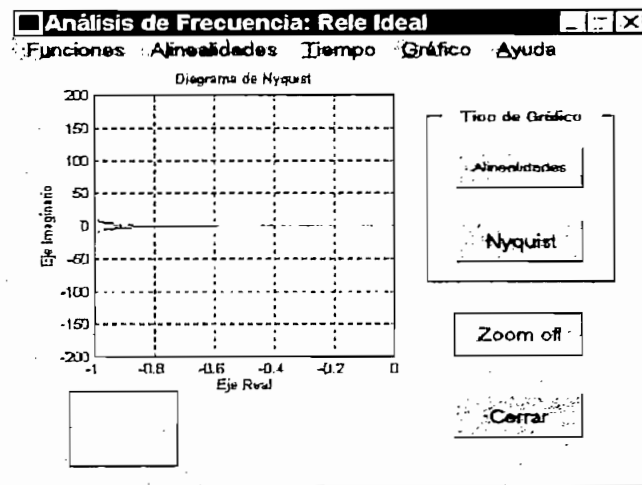


Fig. 4.36 Pantalla de resultados para el ejemplo 7.

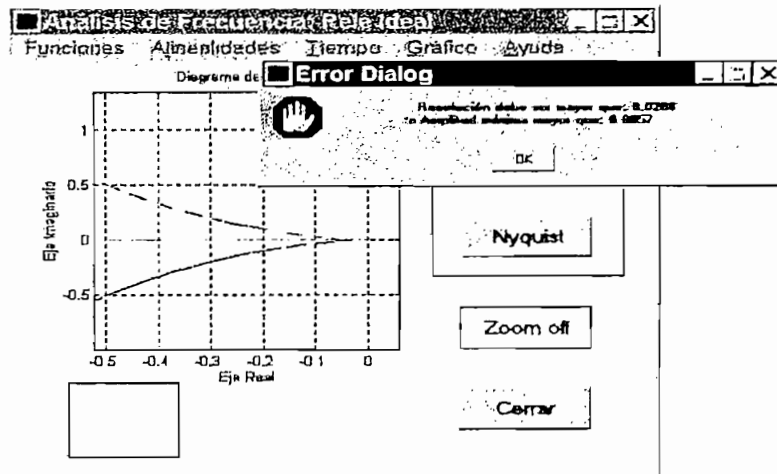


Fig. 4.37 Pantalla que muestra un cuadro de error cuando se hizo zoom y se quiso aumentar los valores de resolución del ejemplo 7.

Al hacer un zoom del gráfico y luego proceder a incrementar la resolución del mismo se obtuvo la pantalla que se muestra en la figura 4.37 y que indica el límite máximo de puntos (en este caso dado por la resolución de la gráfica de la F.D.) que el programa puede calcular. Si se excede de este número esta versión de Matlab (V 5.0 versión estudiantil), entregará el mensaje de limitación ya visto.

Para el cálculo de la frecuencia sin embargo no se obtuvo este mensaje de error los valores calculados por "estabnon" son: (véase figura 4.38).

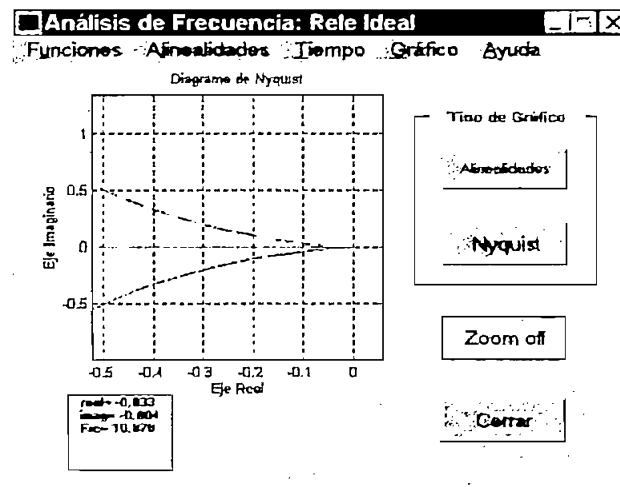


Fig. 4.38 Valor de frecuencia obtenido por el programa para el ejemplo 7.

Cuando se calculó el valor de la frecuencia, se tuvo el problema del punto exacto de intersección de las 2 curvas. Al hacer un zoom para apreciar mejor el punto se recalculan los valores automáticamente. Para este ejemplo es necesario realizar una serie de acercamientos hasta que se llega al límite de puntos impuesto por el programa. Por ello se utilizó el cursor lo más cerca posible del punto de unión de las dos curvas. Los valores de frecuencia proporcionados por el diagrama de Nyquist se incrementan rápidamente, cada vez que se acerca al origen, por tanto al ubicar el cursor en una posición los resultados difieren de los que se obtienen al ubicarlo en una posición ligeramente diferente.

Esta limitación del programa viene por la característica de la planta y de la alinealidad que determina que el punto de cruce de las dos curvas sea muy cercano al origen. Como el programa dibuja Nyquist y la F.D. de la alinealidad en un rango de valores apreciables (es decir dibuja completamente a Nyquist) cuando se hace sucesivos acercamientos para determinar el punto de intersección y como cada acercamiento involucra un nuevo recálculo de límites y por lo tanto se incrementa el número de iteraciones empleadas, se llega rápidamente a los límites de la versión de Matlab utilizada.

Para este mismo ejemplo que es bastante peculiar se introdujo una red de adelanto para mejorar su respuesta transitoria. Esta red es:

$$G_c(s) = \frac{4.675 * (s + 2.9)}{(s + 5.4)}$$

Al multiplicar esta compensación por la función de transferencia original (véase figura 4.35), se tiene una nueva función de transferencia cuyo valor se es:

$$G_2 = \frac{18.7 * (s + 2.9)}{s(s + 2)(s + 5.4)}$$

Los resultados con esta nueva planta y con la misma alinealidad son los siguientes. (véase figuras 4.39 y 4.40).

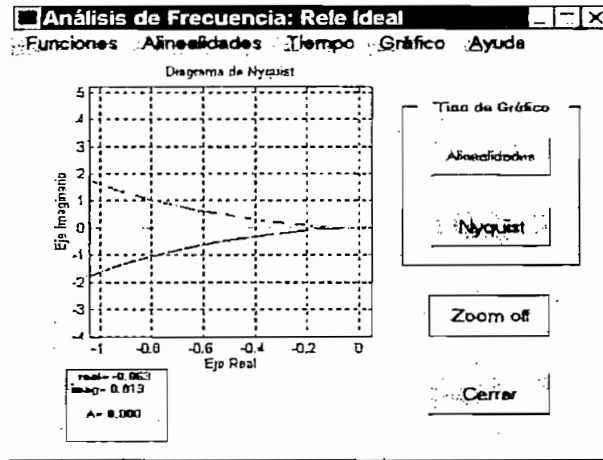


Fig. 4.39 Pantalla de resultados I: Amplitud del ciclo límite, ejemplo 7.

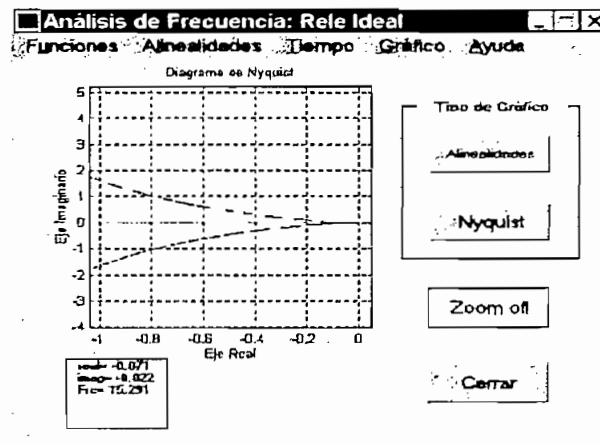


Fig. 4.40 Pantalla de resultados II: Frecuencia del ciclo límite, ejemplo 7.

De los resultados se desprende que el sistema tiene un ciclo límite estable, (el diagrama de Nyquist no rodea al diagrama de $-1/N$), con una amplitud que tiende a cero y una frecuencia que tiende a un valor muy elevado.

Finalmente para ver las limitaciones del programa cuando se analiza un sistema discreto, en el ejemplo 8.

- **Ejemplo 8.** Sea el sistema de la figura 4.41, donde se ha considerado una alinealidad de cuantización.⁷

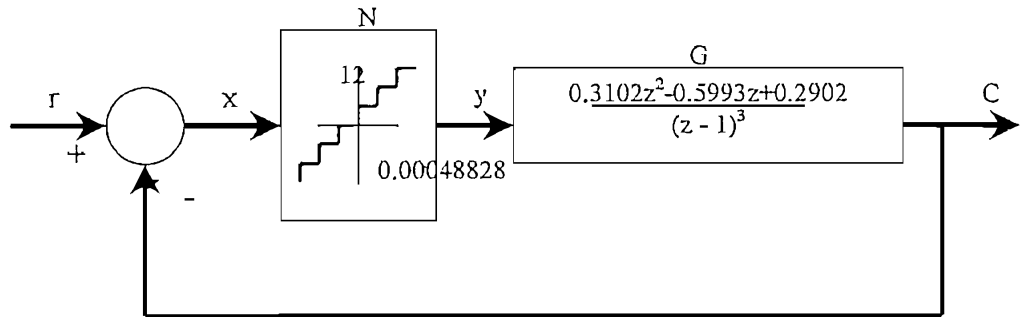


Fig. 4.41 Sistema no lineal discreto con alinealidad de cuantización.

El programa “**estabnon**” presenta los siguientes resultados (ver figuras 4.42 y 4.43):

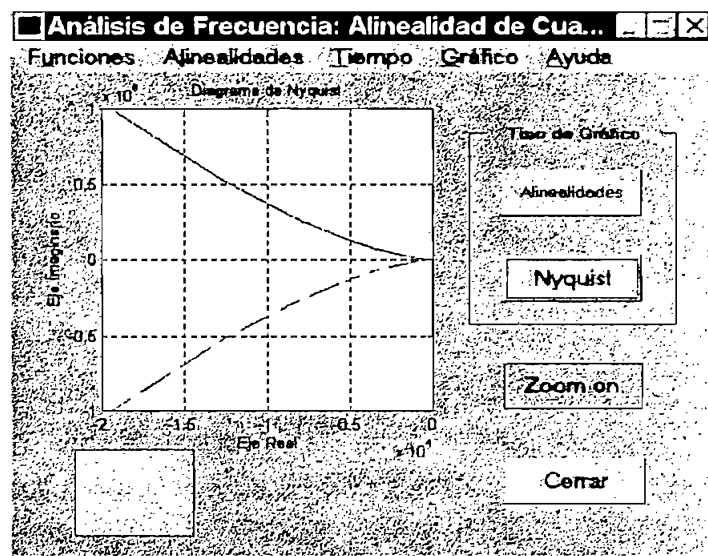


Fig. 4.42 Pantalla de Nyquist de resultado para el problema 8.

Como se ve en el diagrama de Nyquist no se aprecia la gráfica de la F.D. esto se debe a que “**estabnon**” gráfica Nyquist en un amplio rango de frecuencias y las características de la alinealidad son muy pequeñas, por lo que se hace necesario una ampliación de la pantalla donde se pueda ver ambas funciones. Esto se logra con la opción Zoom, pero recuerde que al hacer cada vez un zoom se recalcula los nuevos valores de acuerdo a los límites de la región seleccionada para el zoom.

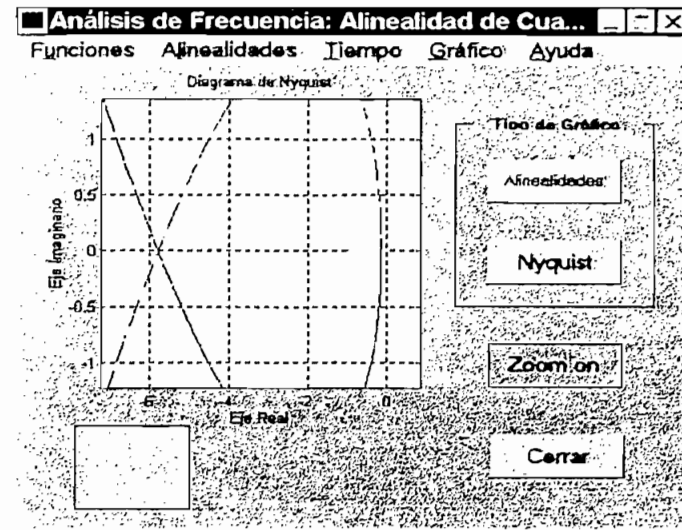


Fig. 4.43 Pantalla ampliada de Nyquist donde se aprecia el gráfico de $-1/N$, nótese la escala y compárese con la perteneciente al gráfico 4.42.

Una vez ampliado el gráfico adecuadamente, se procede a incrementar la resolución del gráfico y se obtiene la presencia de dos ciclos límites cuya frecuencia y amplitud se va a calcular. (véase figuras 4.44, 4.45 y 4.46):

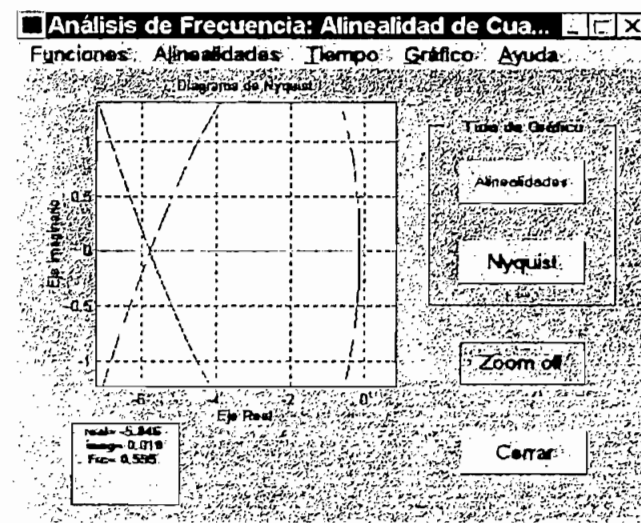


Fig. 4.44. Detección del primer ciclo límite con su valor de frecuencia.

Una vez detectada el valor de la frecuencia del primer ciclo límite se procede a ver su amplitud. Sin embargo cuando se trata de encontrar esta se tiene problemas con el número de iteraciones.

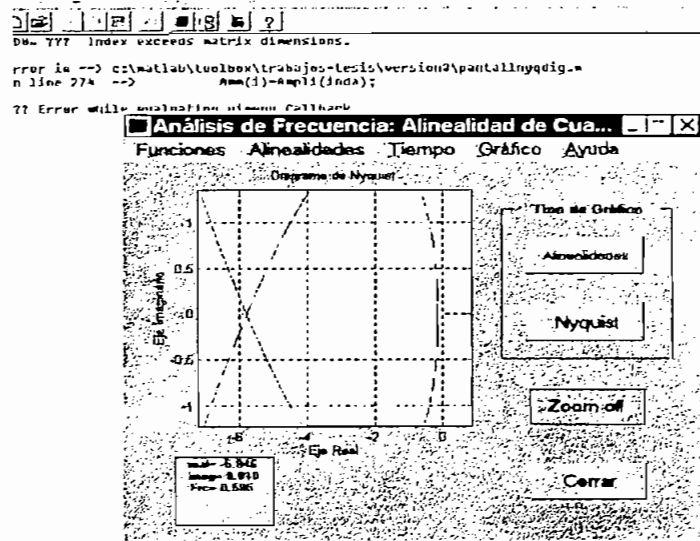


Fig. 4.45 Error producido en el prompt del Matlab por las limitaciones del programa.

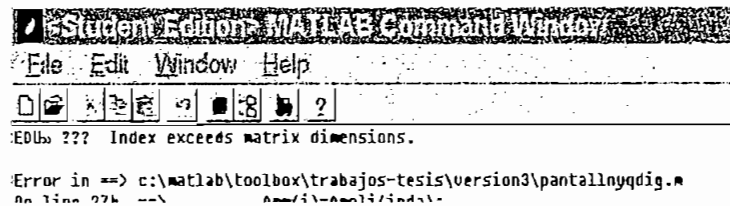


Fig. 4.46 Vista en detalle del error que aparece en el prompt.

Para el cálculo de la frecuencia del segundo ciclo límite no se tiene mayor dificultad. (véase figura 4.47):

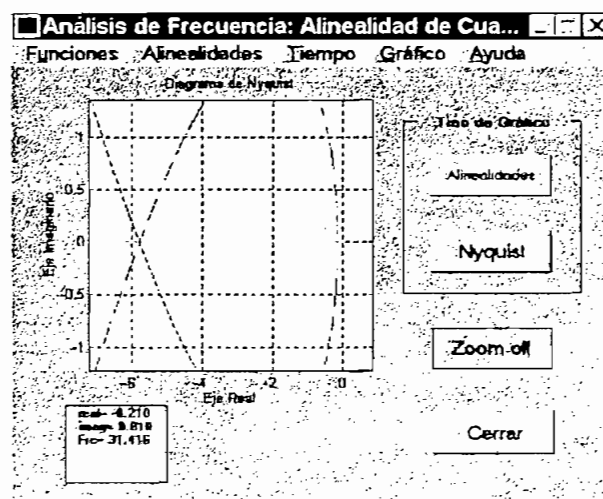


Fig. 4.47 Cálculo de la frecuencia del segundo ciclo límite.

Para el caso del cálculo de la amplitud se tiene un error similar al anterior. De esto se desprende que el programa “**estabnon**” tiene límites de resolución dados por la limitación de la versión de Matlab utilizada, estos límites son especialmente críticos cuando se calcula el valor de la amplitud del ciclo límite con la gráfica de $-1/N$.

Como corolario se concluye que el programa implementado cumple los objetivos de la tesis. Los ejemplos para ver la limitación del programa han sido seleccionados para ello es decir son ejemplos que tienen valores muy pequeños de ciertos parámetros o son muy rápidos o tienen un tiempo de establecimiento sumamente grande, de esta manera se puede ver las limitaciones y se analiza las causas de ellas.

4.3 Referencias.

1. **OGATA Katsuhiko**, **Ingeniería de Control Moderna**, pág. 598, Prentice-Hall, primera edición, México 1980.
2. **OGATA K.**, pág. 610.
3. **CARDENAS Wilmer**, Programa semigráfico para analizar la estabilidad de Sistemas no lineales usando la Función Descriptiva, tesis de ingeniería eléctrica, EPN, Quito 1994, págs. 126-128.
4. **CARDENAS W.**, pág. 141.
5. **FRANKLIN G., POWELL J., WORKMAN M.**, Digital Control of Dynamic Systems, Addison Wesley 1998 3ra edición, págs 566, 567.
6. **CARDENAS W.**, págs. 136-140.
7. **FRANKLIN G.**, págs. 568,569,570,571.

Capitulo 5: Conclusiones y Recomendaciones.

5.1 Conclusiones y Recomendaciones. 83

CAPITULO 5

5.1 Conclusiones y Recomendaciones.

Una vez implementado el programa, verificados los resultados y analizadas las limitaciones de éste se puede concluir y recomendar lo siguiente:

5.1.1 Respecto a los sistemas no lineales en general y el método de la Función Descriptiva (F.D.).

- Los sistemas lineales constituyen idealizaciones o aproximaciones en un pequeño rango de los sistemas no lineales. Por ello es tan importante el análisis de estabilidad para estos sistemas. Así, el método de la Función Descriptiva, si bien es lineal y aproximado, es ideal para la identificación de la existencia de ciclos límites y proporciona una herramienta útil cuando se quiere analizar sistemas con alinealidades en el lazo.
- Este método es aplicable si los sistemas son considerados como filtros pasabajos. El grado de incertidumbre del método depende de la magnitud de los armónicos de alto orden (más allá de la magnitud fundamental), que se presenten a la salida de la no linealidad. Un pequeño contenido armónico implica una alta precisión del método. Por lo tanto, a la salida de la planta, el contenido armónico debe disminuir. Por ello es importante que las plantas se comporten como filtros pasabajos. La mayoría de los sistemas de control, especialmente los servomecanismos, tienen este comportamiento.
- El método de la Función Descriptiva presenta limitaciones cuando:

Se analizan funciones de transferencia que son muy rápidas en su tiempo de estabilización.

Las funciones de transferencia presentan características de respuesta de frecuencia que, al ser graficadas en el plano complejo junto con la inversa de la función descriptiva, ambos diagramas (el de Nyquist y el de $-1/N$) se cruzan casi tangencialmente. Esto puede ocasionar imprecisiones en los cálculos de las amplitudes y frecuencias de los ciclos límites si éstos existieran o no. Inclusive se pueden determinar ciclos límites que en la realidad no existen, o no se puede predecir otros que si los hay.

- Para los sistemas discretos el método presenta las mismas limitaciones que para los continuos. Sin embargo, se añade el hecho de que al ingresar los coeficientes directamente en z (es decir si ya se tiene discretizada a la planta) se puede introducir un error adicional que se

produce por efecto de los valores de los coeficientes que no siempre son enteros. Este error adicional se manifiesta en la respuesta de frecuencia de la planta. Estas pequeñas imprecisiones dependen del tiempo de muestreo utilizado y del tipo de discretizador de la planta. (Generalmente las plantas se las discretiza mediante un Zero-Order-Hold).

5.1.2 Respecto al programa “estabnon” implementado y la versión de Matlab utilizada.

- El programa “estabnon” implementado presenta un excelente rendimiento en lo que se refiere a la respuesta en frecuencia. De hecho el empleo del lenguaje Matlab constituye una poderosa herramienta que permite trazar el diagrama de Nyquist en su totalidad lo que proporciona una visión completa en el dominio de la frecuencia del sistema. Esto constituye una ventaja para el usuario, pero a la vez exige del programa que tenga mayores opciones, como la obligatoriedad de tener un incremento de la pantalla para ver en detalle los gráficos o sus intersecciones. Junto a esta característica ha sido necesario implementar una opción de recálculo de valores para poder mantener una precisión del programa.
- La respuesta de amplitud tuvo un muy buen desempeño. Sin embargo, su rendimiento es menor en la respuesta en frecuencia, debido a la característica ya mencionada. El programa muestra el diagrama de Nyquist en su totalidad y por tanto necesita opciones de zoom y recálculo. Esto incrementa el número de operaciones que tiene que realizar el Matlab y si, junto a esto, ocurre que la gráfica de $-1/N$ (la inversa de la F.D.) es muy pequeña, o los parámetros de las alinealidades son bastante reducidos, se necesita realizar muchos incrementos que pueden producir que el programa alcance el número máximo de iteraciones que permite la versión de Matlab usada. Los errores cometidos por esto, sin embargo, son totalmente aceptables, (menores al 5 %) y los ejemplos donde se presentan estos casos, tienen características extremas que han servido de pauta para probar las limitaciones de programas anteriores. Comparativamente, el programa tuvo un rendimiento superior a éstos, y constituye hasta el presente la mejor versión que se tiene de un programa semigráfico para analizar estabilidad de sistemas no-lineales utilizando el criterio de la Función Descriptiva.
- Se implementó también una nueva herramienta para analizar la existencia de ciclos límites producidos por algunas alinealidades, cuyo gráfico se cruza dos o tres veces por la misma trayectoria, con el diagrama de Nyquist. Esto se hizo para mejorar las características del programa y tener una versión profesional del mismo.

5.1.3 Recomendaciones.

- Se recomienda el uso de la versión profesional de Matlab para futuros programas. Las razones para implementarlo en la versión estudiantil fueron:
 - Disponibilidad de la versión estudiantil y no la profesional cuando se planteó el tema.
 - La versión estudiantil de Matlab es prácticamente igual a la profesional, a no ser por la limitación en el número de arreglos que ésta puede manejar y que se torna importante solo en casos extremos.
 - Esta versión tiene un costo relativamente bajo (USD 100), por lo que es de mayor acceso para los estudiantes. Además no requiere licencia como la versión profesional.
 - El único inconveniente detectado es la diferencia existente entre las dos versiones en lo que se refiere al comando “*guide*”, que permite la creación de pantallas de interface para el usuario. La versión profesional no reconoce la interface creada en colores en la versión estudiantil.
 - Los archivos tipo “*m*” que contienen la lógica del programa son los mismos para ambas versiones. Por tanto, se podría crear un nuevo interface o utilizar una parte de los archivos implementados, para que, con los algoritmos desarrollados, se realicen nuevas aplicaciones. Esto es posible gracias a la versatilidad y estructura modular del programa.
- Se recomienda también implementar un interface con el programa Simulink. Con esto se obtendría un máximo rendimiento de los programas que se disponen en el laboratorio y se podría, como se mencionó, utilizar los algoritmos creados (ubicados en los archivos tipo “*m*”) para nuevas y variadas aplicaciones.
- El trabajo de tesis ha cumplido los objetivos propuestos inicialmente. Se ha implementado un programa que presenta una alta precisión (la mejor hasta ahora obtenida), en un ambiente de Windows fácil de usar y versátil, mediante el empleo de la última versión de un programa que se está empleando muy asiduamente en la teoría de control.

ANEXO:

Listado del Programa.

```

function compensar(accion)

FigHandle=findobj(allchild(0),'flat','Tag','compensar');

if nargin<1,

    if isempty(FigHandle),
        global numcomp dencomp
        iniciofigura(FigHandle);
    else
        figure(FigHandle);
    end
else
    switch accion
    case 'Aplicar'
        global numcomp dencomp
        Figamang=findobj(gcf,'Tag','EditText1');
        A=get(Figamang,'String');
        y=mesagderror(A);
        if y==1,
            return
        end
        numcomp=eval(A);
        Figamang=findobj(gcf,'Tag','EditText2');
        A=get(Figamang,'String');
        y=mesagderror(A);
        if y==1,
            return
        end
        dencomp=eval(A);
        delete(FigHandle);
    otherwise
    end
end

function iniciofigura(FigHandle)

global numcomp dencomp

if (isempty(numcomp)|isempty(dencomp)), %-----Muestra en caracteres de los datos
ya recibidos
    numcomp=1;dencomp=1;
end

numer=mat2str(numcomp);
if sum(findstr(numer,[''])==0,
    numer=strcat(['',numer,'']);
end
denor=mat2str(dencomp);
if sum(findstr(denor,[''])==0,
    denor=strcat(['',denor,'']);
end

load compensar

a = figure('BackingStore','off', ...

```

```

'Color',[0.8 0.8 0.8], ...
'Colormap',mat0, ...
'MenuBar','none', ...
'Name','Compensación', ...
'Resize','off',...
'NumberTitle','off', ...
'PointerShapeCData',mat1, ...
'Position',[499 262 278 202], ...
'Tag','compensar');
b = uicontrol('Parent',a, ...
'Units','points', ...
'BackgroundColor',[1 1 1], ...
'Position',[92.25 96.75 102 24], ...
'String',numer,...
'Style','edit', ...
'Tag','EditText1');
b = uicontrol('Parent',a, ...
'Units','points', ...
'BackgroundColor',[1 1 1], ...
'Position',[92.25 36.75 102 24], ...
'String',denor, ...
'Style','edit', ...
'Tag','EditText2');
b = uicontrol('Parent',a, ...
'Units','points', ...
'BackgroundColor',[0.75 0.75 0.75], ...
'Position',[6 16.5 72 121.5], ...
'Style','frame', ...
'Tag','Framel');
b = uicontrol('Parent',a, ...
'Units','points', ...
'BackgroundColor',[0.75 0.75 0.75], ...
'Position',[16.5 37.5 52.5 84.75], ...
'String','
Coeficientes de la Función de Compensación',
...
'Style','text', ...
'Tag','StaticText1');
b = uicontrol('Parent',a, ...
'Units','points', ...
'Callback','global numcomp dencomp;compensar Aplicar',...
'Position',[123.75 8.25 48 16.5], ...
'String','Aplicar', ...
'Tag','Pushbutton1');
b = uicontrol('Parent',a, ...
'Units','points', ...
'BackgroundColor',[0.8 0.8 0.8], ...
'FontSize',10, ...
'Position',[101.25 128.25 84.75 18], ...
'String','Numerador', ...
'Style','text', ...
'Tag','StaticText3');
b = uicontrol('Parent',a, ...
'Units','points', ...
'BackgroundColor',[0.752941 0.752941 0.752941], ...
'FontSize',10, ...
'Position',[101.25 69.75 84.75 18], ...
'String','Denominador', ...
'Style','text', ...
'Tag','StaticText2');

```

```

function datosdis(accion)
%
%
%
%
%
%
%
%

FigHandle=findobj(allchild(0),'flat','Tag','grafdatosdis');

if nargin<1,

    if isempty(FigHandle),
        global numcomp dencomp tms tpds
        iniciofigura(FigHandle);

    else
        figure(FigHandle);
    end
else

    switch accion
    case 'Aplicar'
        global tms tpds                %% Ingreso de la amplitud
        Figamang=findobj(gcf,'Tag','EditText1');
        A=get(Figamang,'String');
        tms=eval(A);
        botonuno=findobj(gcf,'Tag','Radiol');
        tpds=get(botonuno,'Value');
        delete(FigHandle);
    case 'seleccion1'
        botondos=findobj(gcf,'Tag','Radio2');
        set(botondos,'Value',0);
    case 'seleccion2'
        botonuno=findobj(gcf,'Tag','Radiol');
        set(botonuno,'Value',0);
    otherwise
    end

end

```

```

function iniciofigura(FigHandle)

```

```

global tms tpds
if tpds==1
    vall=1;
    val2=0;
else
    vall=0;
    val2=1;
end

```

```

load compensar

```

```

a = figure('BackingStore','off', ...
    'Color',[0.8 0.8 0.8], ...
    'Colormap',mat0, ...
    'MenuBar','none', ...

```

```

'Name', 'Opciones de Discretización', ...
'NumberTitle', 'off', ...
'Resize', 'off', ...
'PointerShapeCData', mat1, ...
'HandleVisibility', 'callback', ...
'Position', [499 262 278 202], ...
'Tag', 'grafdatosdis');
b = uicontrol('Parent', a, ...
'Units', 'points', ...
'BackgroundColor', [1 1 1], ...
'Position', [120 100 80 24], ...
'String', tms, ...
'Style', 'edit', ...
'Tag', 'EditText1');
b = uicontrol('Parent', a, ...
'Units', 'points', ...
'BackgroundColor', [0.75 0.75 0.75], ...
'Position', [6 16.5 90 120.5], ...
'Style', 'frame', ...
'Tag', 'Framel');
b = uicontrol('Parent', a, ...
'Units', 'points', ...
'BackgroundColor', [0.75 0.75 0.75], ...
'Position', [16.5 37.5 70.95], ...
'FontSize', 12, ...
'String', 'Tiempo de Muestreo
Dominio de la Función de Planta', ...
'Style', 'text', ...
'Tag', 'StaticText1');
b = uicontrol('Parent', a, ...
'Units', 'points', ...
'Callback', 'global tms tpds;datosdis Aplicar', ...
'Position', [123.75 8.25 48 16.5], ...
'String', 'Aplicar', ...
'Tag', 'Pushbutton1');
b = uicontrol('Parent', a, ...
'Units', 'points', ...
'BackgroundColor', [0.75 0.75 0.75], ...
'Position', [135 60 51 25], ...
'Callback', 'datosdis seleccion1', ...
'String', 'En S', ...
'Style', 'radiobutton', ...
'Tag', 'Radiol', ...
'Value', val1);
b = uicontrol('Parent', a, ...
'Units', 'points', ...
'BackgroundColor', [0.75 0.75 0.75], ...
'Position', [135 40 51 25], ...
'Callback', 'datosdis seleccion2', ...
'String', 'En Z', ...
'Style', 'radiobutton', ...
'Tag', 'Radio2', ...
'Value', val2);

```

```

function disgraftmp(resp)

%disgraftmp Permite obtener la respuesta en el tiempo (a la función de excitación paso o
impulso)
%           de las funciones de transferencia de la planta, compensación y
alinealidad. Estas
%           funciones se encuentran en la aplicación pantalnyqdig del programa
estabnon
%           Usos:
%           resp='paso', respuesta paso
%           resp='impulso', respuesta al impulso
%
%           Ramiro Campos Nov. 1999

global numcon dencon numcomp dencomp datorele datos amplitud tms tpds tsim

%---- Inicio de figura

Figurast tiempo=findobj(allchild(0),'flat','Tag','graftiemp');

if isempty(Figurast tiempo),
    inifigura(Figurast tiempo)
else
    figure(Figurast tiempo);
end

%-----Datos de las funciones
if (isempty(numcomp) | isempty(dencomp)),
    syscmp=tf(1,1,tms);
else
    syscmp=tf(numcomp,dencomp,tms);
end

if tpds==1
    syspl=tf(numcon,dencon);
    sysdpl=c2d(syspl,tms,'zoh');
elseif tpds==0
    sysdpl=tf(numcon,dencon,tms);
end

sys=sysdpl*syscmp;           %--- Sistema compensado digital de la planta

[y,z,t]=grafalineal(datorele,datos,amplitud); %--- Señal en el tiempo de la alinealidad

N=fundescripamp(datorele,datos,amplitud);
systot=N*sys;
systotal=feedback(systot,1);
tdur=0:tms:tsim;
switch resp
    % Respuestas en el tiempo de las funciones, a la excitación paso
    case 'paso'
        [pla,tt]=step(sys,tdur);           % Respuesta de la Planta Compensada
        [C,D]=step(systotal,tdur);       % Respuesta Total
    case 'impulso'
        [pla,tt]=impulse(sys,tdur);       % Respuesta de la Planta Compensada
        [C,D]=impulse(systotal,tdur);    %% Respuesta de la Compensación
    otherwise
        end

%-----Gráficos-----

ud.TimeHistoryAxis = subplot(311);           % Inicio de variables
gráficas

```



```

ud.TimeHistoryInputLine = plot(0,0,'m','EraseMode','None');
ud.TimeHistoryTitle = get(ud.TimeHistoryAxis,'Title');

ud.TransPlantaAxis = subplot(312);
ud.TransPlantaInputLine = plot(0,0,'m','EraseMode','None');
ud.TransPlantaTitle = get(ud.TransPlantaAxis,'Title');

ud.TransCompAxis = subplot(313);
ud.TransCompInputLine = plot(0,0,'m','EraseMode','None');
ud.TransCompTitle = get(ud.TransCompAxis,'Title');

if min(y)==max(y),          %%% Limites del gráfico en Y del diagrama de la
alinealidad
    ymin=-1;ymax=1;
else
    ymin=min(y);
    ymax=max(y);
end

set(ud.TimeHistoryAxis,...      %% Respuesta de la Alinealidad
'Visible','on',...
'Xlim',[min(t) max(t)],...
'Ylim',[ymin ymax]);

set(ud.TimeHistoryInputLine,...
'XData',t,...
'YData',y);

switch resp
case 'paso'
    set(ud.TimeHistoryTitle,...
        'String','Respuesta Paso');
case 'impulso'
    set(ud.TimeHistoryTitle,...
        'String','Respuesta Impulso');
otherwise
end

xl = get(ud.TimeHistoryAxis,'Xlabel');
set(xl,...
    'String','');
xl = get(ud.TimeHistoryAxis,'Ylabel');
set(xl,...
    'String','Alinealidad');

set(ud.TransPlantaAxis,...      %% Respuesta de la Planta Compensada
'Visible','on',...
'Xlim',[min(tt) max(tt)],...
'Ylim',[min(pla) max(pla)]);

set(ud.TransPlantaInputLine,...
'XData',tt,'YData',pla);
set(ud.TransPlantaTitle,...
    'String','');
xl = get(ud.TransPlantaAxis,...
    'Xlabel');
set(xl,'String','');
xl = get(ud.TransPlantaAxis,'Ylabel');
set(xl,...
    'String','Planta');

set(ud.TransCompAxis,...      %% Respuesta Total

```

```

'Visible', 'on', ...
'Xlim', [min(D) max(D)], ...
'Ylim', [min(C) max(C)];

set(ud.TransCompInputLine, ...
    'XData', D, ...
    'YData', C);
set(ud.TransCompTitle, ...
    'String', '');
xl = get(ud.TransCompAxis, 'Xlabel');
set(xl, ...
    'String', 'Tiempo (secs)');
yl = get(ud.TransCompAxis, 'Ylabel');
set(yl, ...
    'String', 'Del Lazo');

```

```
function inifigura(Figurast tiempo)
```

```
global datorele cons
```

```

cons=1;
datoali=tipoalin(datorele);
titulo=['Análisis en el tiempo: ' datoali];

```

```

a = figure('Color', [0.61 0.8 0.71], ...
    'IntegerHandle', 'off', ...
    'MenuBar', 'none', ...
    'Resize', 'off', ...
    'NumberTitle', 'off', ...
    'Name', titulo, ...
    'Position', [120 120 560 420], ...
    'Tag', 'grftiemp');

```

```

c = uimenu('Parent', a, ... %----- Menu Tiempo de muestreo
    'Callback', 'global cons ;if cons==1, zoom
on;obmenu=findobj(gcf, 'Tag', 'meseure');set(obmenu, 'Label', 'Zoom
off');cons=not(cons);else, zoom
off;obmenu=findobj(gcf, 'Tag', 'meseure');set(obmenu, 'Label', 'Zoom
on');cons=not(cons);end;', ...
    'Label', 'Zoom on', ...
    'Tag', 'meseure');

```

```

b = uimenu('Parent', a, ... %----- Menu Utilidades
    'Label', 'Ut&ilidades', ...
    'Tag', 'Ampliacion');

```

```

c = uimenu('Parent', b, ... %----- Menu Gráfico del tiempo: Alinealidad
    'Callback', 'grftgde alin;', ...
    'Label', 'Alinealidad', ...
    'Tag', 'alineal');

```

```

c = uimenu('Parent', b, ... %----- Menu Gráfico del tiempo: Sistema
compensado
    'Callback', 'grftgde comp;', ...
    'Label', 'Sistema Compensado', ...
    'Tag', 'compensado');

```

```

c = uimenu('Parent', b, ... %----- Menu Gráfico del tiempo: Sistema Total
    'Callback', 'grftgde total;', ...
    'Label', 'Lazo Cerrado', ...
    'Tag', 'lazocerrado');

```



```

    mens1=sprintf('
%4.4f', (xtick));
    mens2=sprintf('
que: %4.4f', (xmin+3*xtick));
    mens=[mens1 mens2];
    errordlg(mens);
    y=1;
    return

```

Resolución debe ser mayor que:

o Amplitud máxima mayor

```

end
X=xmin:xtick:amax;
sx=length(X);
inx=find(X>datos(2));
for i=1:inx(1),
    fds(i)=ninf;
end
for i=inx+1:sx,
    t1=asin(datos(2)/X(i));
    fdd(i)=4*datos(1)*cos(t1)/(pi*X(i));
    fds(i)=-1/fdd(i);
end
imaj=zeros(1, sx);

```

case 'rpend'

```

xfin=amax;
res=(xfin-xtick)/xtick; % Resolución máxima por limitación Student Edition
if res>16200,
    xtick=xfin/7000;
end

```

```

xmin=0.00001;
if amax<=(xmin+3*xtick),

```

```

%4.4f', (xtick));

```

Resolución debe ser mayor que:

o Amplitud máxima mayor

```

que: %4.4f', (xmin+3*xtick));
    mens=[mens1 mens2];
    errordlg(mens);
    y=1;
    return

```

```

end
X=amin:xtick:xfin;
sx=length(X);
for i=1:sx,
    fdd(i)=datos(2)+4*datos(1)/(pi*X(i));
    fds(i)=-1/fdd(i);
end
imaj=zeros(1, sx);

```

case 'rzmpend'

```

xfin=amax;
res=(xfin-xtick)/xtick; % Resolución máxima por limitación Student Edition
if res>16200,
    xtick=xfin/7000;
end
xmin=amin;

```

```

if amax<=(xmin+3*xtick),
    mens1=sprintf('

```

```

%4.4f', (xtick));

```

Resolución debe ser mayor que:

o Amplitud máxima mayor

```

que: %4.4f', (xmin+3*xtick));
    mens=[mens1 mens2];
    errordlg(mens);
    y=1;
    return
end
X=xmin:xtick:xfin;

```

```

inx=find(X>=datos(2));
sx=length(X);
if isempty(inx)
    innx=sx;
    for i=1:innx,
        fds(i)=ninf;
    end
else
    innx=inx(1);
    for i=1:innx,
        fds(i)=ninf;
    end
    for i=inx(1)+1:sx,
        t1=datos(2)/X(i);
        t2=asin(t1);
        k=datos(3);
        fdd(i)=k-2*k*t2/pi+(4-2*k)*datos(1)*sqrt(1-t1^2)/(pi*X(i));
        fds(i)=-1/fdd(i);
    end
end
imaj=zeros(1,sx);

```

```

case 'sideal'
    xfin=amax;
    res=(xfin-xtick)/xtick;    % Resolucion máxima por limitación Estudent Edition
    if res>16200,
        xtick=xfin/7000;
    end
    xmin=amin;
    if amax<=(xmin+3*xtick),
        mens1=sprintf('

```

%4.4f', (xtick));

Resolución debe ser mayor que:

mens2=sprintf('

o Amplitud máxima mayor

que: %4.4f', (xmin+3*xtick));

mens=[mens1 mens2];

errorldg(mens);

y=1;

return

end

X=amin:xtick:xfin;

sx=length(X);

hh=datos(1)/datos(2);

inx=find(X>=hh);

if isempty(inx)

innx=sx;

for i=1:innx,

fdd(i)=datos(2);

fds(i)=-1/fdd(i);

end

else

innx=inx(1);

for i=1:innx,

fdd(i)=datos(2);

fds(i)=-1/fdd(i);

end

for i=inx(1)+1:sx,

t1=(hh/X(i));

fdd(i)=2*datos(2)*(asin(t1)+t1*sqrt(1-t1^2))/pi;

fds(i)=-1/fdd(i);

end

end

imaj=zeros(1,sx);

case 'szmuerta'

xfin=amax;

res=(xfin-xtick)/xtick; % Resolucion máxima por limitación Estudent Edition

```

if res>16200,
    xtick=xfin/7000;
end
xmin=amin;
if amax<=(xmin+3*xtick),
    mens1=sprintf('
%4.4f', (xtick));
    mens2=sprintf('
que: %4.4f', (xmin+3*xtick));
    mens=[mens1 mens2];
    errordlg(mens);
    y=1;
    return
end
X=xmin:xtick:xfin;
sx=length(X);
h2=datos(1)/datos(2)+datos(3);
h1=datos(3);
k=datos(2);
M=datos(1);
inx=find(X>=h1);
if isempty(inx)
    innx=sx;
    for i=1:innx,
        fds(i)=ninf;
    end
else
    inx2=find(X>h2);
    if isempty(inx2)
        for i=1:inx(1)
            fds(i)=ninf;
        end
        for i=inx(1)+1:sx
            t1=h1/X(i);
            fdd(i)=k-2*k*(asin(t1)+t1*sqrt(1-t1^2))/pi;
            fds(i)=-1/fdd(i);
        end
    else
        for i=1:inx(1)
            fds(i)=ninf;
        end
        for i=inx(1)+1:inx2(1)
            t1=h1/X(i);
            fdd(i)=k-2*k*(asin(t1)+t1*sqrt(1-t1^2))/pi;
            fds(i)=-1/fdd(i);
        end

        for i=inx2(1)+1:sx
            t1=asin(h1/X(i));
            t2=asin(h2/X(i));
            fdd(i)=k*(2*X(i)*(t2-t1)+X(i)*(sin(2*t1)-sin(2*t2))+4*h1*(cos(t2)-
cos(t1)))/(pi*X(i))+4*M*cos(t2)/(pi*X(i));
            fds(i)=-1/fdd(i);
        end
    end
end
end
imaj=zeros(1,sx);

case 'spend'
    xfin=amax;
    res=(xfin-xtick)/xtick;    % Resolución máxima por limitación Student Edition
    if res>16200,
        xtick=xfin/7000;
    end
    xmin=amin;

```

Resolución debe ser mayor que:

o Amplitud máxima mayor

```

    if amax<=(xmin+3*xtick),
        mens1=sprintf('
%4.4f', (xtick));
        mens2=sprintf('
que: %4.4f', (xmin+3*xtick));
        mens=[mens1 mens2];
        errordlg(mens);
        y=1;
        return
    end

```

Resolución debe ser mayor que:

o Amplitud máxima mayor

```

X=xmin:xtick:xfin;
sx=length(X);
h=datos(1)/datos(2);
k2=datos(3);
k1=datos(2);
M=datos(1);
inx1=find(X>h);
if isempty(inx1)
    for i=1:sx
        fdd(i)=k1;
        fds(i)=-1/fdd(i);
    end
else
    for i=1:inx1(1)
        fdd(i)=k1;
        fds(i)=-1/fdd(i);
    end
    for i=inx1(1)+1:sx
        t1=(h/X(i));
        fdd(i)=k2+2*(k1-k2)*(asin(t1)+t1*sqrt(1+t1^2))/pi;
        fds(i)=-1/fdd(i);
    end
end
end
imaj=zeros(1,sx);

```

```

case 'szmpend'
intervalo intermedio
    xfin=amax;
    res=(xfin-xtick)/xtick;
    if res>16200,
        xtick=xfin/7000;
    end

```

Restricciones se verificaron, fórmula

% Resolución máxima por limitación Student Edition

```

    xmin=amin;
    if amax<=(xmin+3*xtick),
        mens1=sprintf('
%4.4f', (xtick));
        mens2=sprintf('
que: %4.4f', (xmin+3*xtick));
        mens=[mens1 mens2];
        errordlg(mens);
        y=1;
        return
    end

```

Resolución debe ser mayor que:

o Amplitud máxima mayor

```

X=amin:xtick:xfin;
sx=length(X);
h2=datos(1)/datos(3)+datos(2);
M=datos(1);
h1=datos(2);
k1=datos(3);
k2=datos(4);
k3=M-k2*h2;
inx=find(X>=h1);
if isempty(inx)
    innx=sx;

```

% Valores de amplitud << que h2 => Saturación con Zona Muerta sin la respuesta mayor que h2.

```

        for i=1:innx,
            fds(i)=ninf;
        end
    else
        inx2=find(X>h2);
        if isempty(inx2)
            for i=1:inx(1)
                fds(i)=ninf;
            end
            for i=inx(1)+1:sx
                t1=h1/X(i);
                fdd(i)=k1-2*k1*(asin(t1)+t1*sqrt(1-t1^2))/pi;
                fds(i)=-1/fdd(i);
            end
        else
            for i=1:inx(1)
                fds(i)=ninf;
            end
            for i=inx(1)+1:inx2(1)
                t1=h1/X(i);
                fdd(i)=k1-2*k1*(asin(t1)+t1*sqrt(1-t1^2))/pi;
                fds(i)=-1/fdd(i);
            end

            for i=inx2(1)+1:sx
                t1=asin(h1/X(i));
                t2=asin(h2/X(i));
                fdd(i)=k1*(2*X(i)*(t2-t1)+X(i)*(sin(2*t1)-sin(2*t2))+4*h1*(cos(t2)-
cos(t1)))/(pi*X(i))+k2*(X(i)*(pi-2*t2)+X(i)*sin(2*t2)-4*k3*cos(t2))/(pi*X(i));
                fds(i)=-1/fdd(i);
            end
        end
    end
    imaj=zeros(1,sx);

case 'hzideal'
    xfin=amax;
    res=(xfin-xtick)/xtick;    % Resolucion máxima por limitación Student Edition
    if res>16200,
        xtick=xfin/7000;
    end
    xmin=amin;
    if amax<=(xmin+3*xtick),
        mens1=sprintf('
%4.4f',(xtick));
        mens2=sprintf('
que: %4.4f',(xmin+3*xtick));
        mens=[mens1 mens2];
        errordlg(mens);
        y=1;
        return
    end
    X=xmin:xtick:xfin;
    sx=length(X);
    for i=1:sx
        t1=asin(datos(2)/X(i));
        fdr(i)=4*datos(1)*cos(t1)/(pi*X(i));
        fdi(i)=-4*datos(1)*sin(t1)/(pi*X(i));
        nn(i)=fdr(i)+j*fdi(i);
        fn(i)=-1/nn(i);
        fds(i)=real(fn(i));
        imaj(i)=imag(fn(i));
    end

case 'hzmuerta'
    xfin=amax;

```

Resolución debe ser mayor que:

o Amplitud máxima mayor


```
res=(xfin-xtick)/xtick; % Resolucion máxima por limitación Student Edition
```

```
if res>16200,  
    xtick=xfin/7000;
```

```
end
```

```
xmin=datos(3)*1.1;
```

```
if (amin<xmin)&(nargin>4)
```

```
    mens1=sprintf('
```

Resolución debe ser mayor que:

```
%4.4f', (xtick));
```

o Amplitud mínima mayor

```
    mens2=sprintf('
```

```
que: %4.4f', (xmin+3*xtick));
```

```
    mens=[mens1 mens2];
```

```
    errordlg(mens);
```

```
    y=1;
```

```
    return
```

```
elseif (amin>=xmin)&(nargin>4)
```

```
    xmin=amin;
```

```
end
```

```
if amax<=(xmin+3*xtick),
```

```
    mens1=sprintf('
```

Resolución debe ser mayor que:

```
%4.4f', (xtick));
```

o Amplitud máxima mayor

```
    mens2=sprintf('
```

```
que: %4.4f', (xmin+3*xtick));
```

```
    mens=[mens1 mens2];
```

```
    errordlg(mens);
```

```
    y=1;
```

```
    return
```

```
end
```

```
X=xmin:xtick:xfin;
```

```
sx=length(X);
```

```
inx=find(X>datos(2));
```

```
for i=1:inx(1)
```

```
    fds(i)=-200;
```

```
    imaj(i)=0;
```

```
end
```

```
inx2=find(X>datos(3));
```

```
for i=inx(1)+1:inx2
```

```
    t1=asin(datos(2)/X(i));
```

```
    t2=asin(datos(3)/X(i));
```

```
    fdr(i)=2*datos(1)*(cos(t1)+cos(t2))/(pi*X(i));
```

```
    fdi(i)=-2*datos(1)*(sin(t1)-sin(t2))/(pi*X(i));
```

```
    nn(i)=fdr(i)+j*fdi(i);
```

```
    fn(i)=-1/nn(i);
```

```
    fds(i)=real(fn(i));
```

```
    imaj(i)=imag(fn(i));
```

```
end
```

```
for i=inx2+1:sx
```

```
    fdd(i)=4*datos(1)/(pi*X(i));
```

```
    fds(i)=-1/fdd(i);
```

```
    imaj(i)=0;
```

```
end
```

```
case 'hpend'
```

```
    xfin=amax;
```

```
    res=(xfin-xtick)/xtick; % Resolucion máxima por limitación Student Edition
```

```
    if res>16200,
```

```
        xtick=xfin/7000;
```

```
    end
```

```
    xmin=datos(3)*1.1;
```

```
    if (amin<xmin)&(nargin>4)
```

```
        mens1=sprintf('
```

Resolución debe ser mayor que:

```
%4.4f', (xtick));
```

o Amplitud máxima mayor

```
        mens2=sprintf('
```

```
que: %4.4f', (xmin+3*xtick));
```

```
        mens=[mens1 mens2];
```

```
        errordlg(mens);
```

```

    y=1;
    return
elseif (amin>=xmin)&(nargin>4)
    xmin=amin;
end
if amax<=(xmin+3*xtick),
    mens1=sprintf('

```

Resolución debe ser mayor que:

o Amplitud máxima mayor

```

    mens2=sprintf('
que: %4.4f', (xmin+3*xtick));
    mens=[mens1 mens2];
    errordlg(mens);
    y=1;
    return
end
X=xmin:xtick:xfin;
sx=length(X);
for i=1:sx
    t1=asin(datos(2)/X(i));
    t2=asin(datos(3)/X(i));
    k=2*datos(1)/(datos(2)+datos(3));
    fdr(i)=k*(2*t1+2*t2+sin(2*t1)-sin(2*t2))/(2*pi)+2*(datos(1)-
k*datos(3))*(cos(t1)-cos(t2))/(pi*X(i))+2*datos(1)*(cos(t2)+cos(t1))/(pi*X(i));
    fdi(i)=k*(cos(2*t1)-cos(2*t2))/(2*pi)+2*(datos(1)-
k*datos(3))*(sin(t2)+sin(t1))/(pi*X(i))+2*datos(1)*(sin(t1)-sin(t2))/(pi*X(i));
    nn(i)=fdr(i)+j*fdi(i);
    fn(i)=-1/nn(i);
    fds(i)=real(fn(i));
    imaj(i)=imag(fn(i));
end

```

case 'hzmpen'

```

    xfin=amax;
    res=(xfin-xtick)/xtick; % Resolución máxima por limitación Student Edition
    if res>16200,
        xtick=xfin/7000;
    end

```

Resolución debe ser mayor que:

o Amplitud máxima mayor

```

    xmin=datos(5)*2;
    if (amin<xmin)&(nargin>4)
        mens1=sprintf('

```

Resolución debe ser mayor que:

o Amplitud máxima mayor

```

    mens2=sprintf('
que: %4.4f', (xmin+3*xtick));
    mens=[mens1 mens2];
    errordlg(mens);
    y=1;
    return
end

```

```

X=xmin:xtick:xfin;
sx=length(X);
for i=1:sx
    t1=asin(datos(2)/X(i));

```

```

function estabnon()
%
% Inicio del Programa
%

Figuraprinci=findobj(allchild(0),'flat','Tag','princi');

if nargin < 1, %Esto permite que se cargue una sola vez...

    if isempty(Figuraprinci),
        iniciofigura(Figuraprinci);
    else
        figure(Figuraprinci);
    end
end
end

```

```

function iniciofigura(Figuraprinci)
%A continuación viene el inicio de la pantalla...
load estabnon

a = figure('Color',[0.8 0.8 0.8], ...
'Colormap',mat0, ...
'PointerShapeCData',mat1, ...
'HandleVisibility','callback', ...
'MenuBar','none', ...
'Position',[250 107 511 384], ...
'Resize','off',...
'NumberTitle','off', ...
'Tag','princi');
b = axes('Parent',a, ...
'Box','on', ...
'CameraUpVector',[0 1 0], ...
'Color',[1 1 1], ...
'ColorOrder',mat2, ...
'Layer','top', ...
'Position',[0 0.00520833 0.994129 0.994792], ...
'Tag','Axes1', ...
'Visible','off', ...
'XColor',[0 0 0], ...
'XLim',[0.5 600.5], ...
'XLimMode','manual', ...
'YColor',[0 0 0], ...
'YDir','reverse', ...
'YLim',[0.5 407.5], ...
'YLimMode','manual', ...
'ZColor',[0 0 0]);
c = image('Parent',b, ...
'CData',mat3, ...
'Tag','Image1', ...
'XData',[1 600], ...
'YData',[1 407]);
c = text('Parent',b, ...
'Color',[0 0 0], ...
'HandleVisibility','callback', ...
'HorizontalAlignment','center', ...
'Position',[300.5 431.535 0], ...
'Tag','Text1', ...
'VerticalAlignment','cap', ...
'Visible','off');
set(get(c,'Parent'),'XLabel',c);
c = text('Parent',b, ...
'Color',[0 0 0], ...
'HandleVisibility','callback', ...

```

```

'HorizontalAlignment', 'center', ...
'Position', [-36.7781 204 0], ...
'Rotation', 90, ...
'Tag', 'Text2', ...
'VerticalAlignment', 'baseline', ...
'Visible', 'off');
set(get(c, 'Parent'), 'YLabel', c);
c = text('Parent', b, ...
'Color', [0 0 0], ...
'HandleVisibility', 'callback', ...
'HorizontalAlignment', 'right', ...
'Position', [-0.091716 -0.0341207 0], ...
'Tag', 'Text3', ...
'Visible', 'off');
set(get(c, 'Parent'), 'ZLabel', c);
c = text('Parent', b, ...
'Color', [0 0 0], ...
'HandleVisibility', 'callback', ...
'HorizontalAlignment', 'center', ...
'Position', [300.5 -8.58005 0], ...
'Tag', 'Text4', ...
'VerticalAlignment', 'bottom', ...
'Visible', 'off');
set(get(c, 'Parent'), 'Title', c);
d = text('Parent', b, ...
'Color', [0.1 0 0.8], ...
'FontSize', 20, ...
'Position', [170 140 0], ...
'String', '      NO LINEALES', ...
'Tag', 'Text6');
d = text('Parent', b, ...
'Color', [0.1 0 0.8], ...
'FontSize', 20, ...
'Position', [100 80 0], ...
'String', 'SIMULACIÓN DE SISTEMAS', ...
'Tag', 'Text7');
d = text('Parent', b, ...
'Color', [0.1 0 0.8], ...
'FontSize', 12, ...
'FontWeight', 'bold', ...
'Position', [70 300 0], ...
'String', 'Realizado por: Ramiro Campos 2000', ...
'Tag', 'Text7');
b = uicontrol('Parent', a, ...
'Units', 'points', ...
'Callback', 'close gcbf', ...
'FontSize', 14, ...
'Position', [237 26.25 90.75 36], ...
'String', 'Salir', ...
'Tag', 'Pushbutton1');
b = uicontrol('Parent', a, ...
'Units', 'points', ...
'Callback', 'pantalldos;close gcbf', ...
'FontSize', 14, ...
'Position', [42.75 26.25 90.75 36], ...
'String', 'Aceptar', ...
'Tag', 'Pushbutton1');
%b = uicontrol('Parent', a, ...
% 'Units', 'points', ...
% 'BackgroundColor', [0.6 0.6 0.8], ...
% 'FontSize', 16, ...
% 'Position', [24.75 205.5 339 52.5], ...
% 'String', 'PROGRAMA PARA SIMULAR SISTEMAS NO LINEALES: ESTAB NON', ...
% 'Style', 'text', ...
% 'Tag', 'StaticText1');

```

```

function pantallayuda2(accion)
%
% Presenta las ayudas principales en el programa.
%
%

FigHandle=findobj(allchild(0),'flat','Tag','ayudacon1');

if nargin<1,

    if isempty(FigHandle),
        iniciofigura(FigHandle);
    else
        figure(FigHandle);
    end
else

end

function iniciofigura(FigHandle)

contenido=...
    ['
    'Este Programa permite el análisis de frecuencia'
    'de los sistemas que contienen No linealidades por el '
    'Método de la Función Descriptiva, tanto para sistemas '
    'continuos como para discretos.
    '
    'Para ingresar los coeficientes de la planta llene en'
    'forma vectorial el numerador y el denominador como se'
    'indica en los valores predeterminados y luego presione'
    'el boton "Análisis".
    '
    'En el caso de sistemas discretos se debe seleccionar'
    'el tipo de dominio de la función de transferencia S en'
    'el caso de un sistema continuo o Z en en el caso de'
    'de sistemas discretos. Además es necesario indicar el'
    'tiempo de muestreo.
    'La discretización en el caso de plantas continuas se'
    'realiza con el método Zero order Hold de Matlab.
    '];

load pantallayuda2

a = figure('Color',[0.7 0.9 0.69], ...
    'Colormap',mat0, ...
    'DithermapMode','auto', ...
    'MenuBar','none', ...
    'PaperPosition',[1.32292 3.30208 5.83333 4.375], ...
    'Name','Información',...
    'NumberTitle','off', ...
    'PaperPositionMode','auto', ...
    'PointerShapeCData',mat1, ...
    'Position',[232 288 560 420], ...
    'Tag','ayudacon1');
b = uicontrol('Parent',a, ... % Texto de Ayuda
    'Units','points', ...
    'BackgroundColor',[1 1 1], ...
    'Position',[44 30 254 219], ...

```

```
'String', contenido, ...
'HorizontalAlignment', 'left', ...
'FontSize', 10, ...
'Style', 'text', ...
'Tag', 'textol', ...
'Value', 1);
b = uicontrol('Parent', a, ... % Boton de Cerrar
'Units', 'points', ...
'Callback', 'close gcbf', ...
'FontSize', 12, ...
'Position', [333 220.5 66 30.75], ...
'String', 'Cerrar', ...
'Tag', 'Pushbutton1');
b = uicontrol('Parent', a, ... % Título de la Ayuda
'Units', 'points', ...
'BackgroundColor', [0.7 0.8 0.7], ...
'FontSize', 14, ...
'Position', [44 272 254 20], ...
'String', 'Ayuda para Sistemas Continuos', ...
'Style', 'text', ...
'Tag', 'StaticText1');
b = uicontrol('Parent', a, ... % Marco del título
'Units', 'points', ...
'BackgroundColor', [0.7 0.8 0.7], ...
'Position', [42 270 260 24], ...
'Style', 'frame', ...
'Tag', 'marcocercanol');
b = uicontrol('Parent', a, ... % Marco del texto de ayuda
'Units', 'points', ...
'BackgroundColor', [0.7 0.8 0.7], ...
'Position', [42 28 257 222], ...
'Style', 'frame', ...
'Tag', 'entorno');
```

```

function [dat]=tipoalin(datorele)
%
%
%
dat=[];
switch datorele
    %-----Valor de la función Descriptiva.
    case 'rideal'
        dat='Rele Ideal';
    case 'rzmuerta'
        dat='Rele con zon muerta';
    case 'rpend'
        dat='Rele con pendiente';
    case 'rzmpend'
        dat='Rele con zona muerta y pendiente';
    case 'sideal'
        dat='Saturación Ideal';
    case 'szmuerta'
        dat='Saturación con zona muerta';
    case 'spend'
        dat='Saturación con pendiente';
    case 'szmpend'
        dat='Saturación con zona muerta y pendiente';
    case 'hzideal'
        dat='Histéresis Ideal';
    case 'hzmuerta'
        dat='Histéresis con zona muerta';
    case 'hpend'
        dat='Histéresis con pendiente';
    case 'hzmpen'
        dat='Histéresis con zona muerta y pendiente';
    case 'cuantizacion'
        dat='Alinealidad de Cuantización';
    otherwise
end

```