El criterio de estabilidad de Nyquist determina la estabilidad de un sistema en lazo cerrado a partir de la respuesta en frecuencia en lazo abierto y los polos en lazo abierto. Esta sección presenta el criterio de estabilidad de Nyquist y su base matemática. Considérese el sistema en lazo cerrado de la Figura 7-44. La función de transferencia en lazo cerrado es C(s) R(s) % G(s) 1!G(s)H(s) Capítulo 7. Análisis y diseño de sistemas de control por el método de la respuesta en frecuencia 445 www.FreeLibros.org Figura 7-44. Sistema en lazo cerrado. Para la estabilidad, todas las raíces de la ecuación característica 1 !G(s)H(s)%0 deben estar en el semiplano izquierdo del plano s. [Se debe señalar que, aunque los polos y ceros de la función de transferencia en lazo abierto G(s)H(s) pueden estar en el semiplano derecho del plano s, el sistema sólo es estable si todos los polos de la función de transferencia en lazo cerrado (es decir, las raíces de la ecuación característica) están en el semiplano izquierdo del plano s.] El criterio de estabilidad de Nyquist relaciona la respuesta en frecuencia en lazo abierto G(ju)H(ju) con el número de ceros y polos de 1!G(s)H(s) que se encuentran en el semiplano derecho del plano s. Este criterio, obtenido por H. Nyquist, es útil en la ingeniería de control, debido a que permite determinar gráficamente la estabilidad absoluta del sistema en lazo cerrado a partir de las curvas de respuesta en frecuencia en lazo abierto, sin que sea necesario determinar los polos en lazo cerrado. Para el análisis de estabilidad se usan tanto las curvas de respuesta en frecuencia en lazo abierto obtenidas de forma analítica como las obtenidas de forma experimental. Esto es conveniente debido a que, al diseñar un sistema de control, a menudo se desconocen las expresiones matemáticas para algunos de los componentes y sólo se cuenta con sus datos de respuesta en frecuencia. El criterio de estabilidad de Nyquist se basa en un teorema de la teoría de la variable compleja. Para comprenderlo, se analiza primero la transformación de los contornos en el plano complejo. Se supone que la función de transferencia en lazo abierto G(s)H(s) se representa como un cociente de polinomios en s. Para un sistema que puede materializarse físicamente, el grado del polinomio del denominador de la función de transferencia en lazo cerrado debe ser mayor o igual que el del polinomio del denominador. Esto significa que el límite de G(s)H(s), cuando s tiende a infinito, es cero o una constante para cualquier sistema que pueda materializarse físicamente. Estudio preliminar. La ecuación característica del sistema de la Figura 7-44 es F(s) %1 !G(s)H(s)%0 Se demostrará que para una trayectoria cerrada continua determinada en el plano s, que no pasa por ningún punto singular, le corresponde una curva cerrada en el plano F(s). El número y la dirección de los rodeos del origen del plano F(s) para la curva cerrada representan una función en particular importante en lo que sigue, pues después se correlacionará el número y la dirección de los encierros con la estabilidad del sistema. Por ejemplo, considérese la siguiente función de transferencia en lazo abierto: G(s)H(s)% 2 s.1 La ecuación característica es F(s)% 1!G(s)H(s) % 1! 2 s. 1 %s !1 s .1 % 0

La función F(s) es analítica1 en todas las partes del plano s, excepto en sus puntos singulares. A cada punto de análisis en el plano s le corresponde un punto en el plano F(s); por ejemplo, si s%2! j1, entonces F(s) se convierte en F(2 !j1) %2! j1! 1 2! j1. 1 %2 .j1 Así, el punto s% 2! j1 en el plano s se transforma en el punto 2 .j1 en el plano F(s). De esta forma, como se planteó anteriormente, para una determinada trayectoria cerrada continua en el plano s, que no pase por ningún punto singular, hay una curva cerrada en el plano F(s). Para la ecuación característica F(s) de la Ecuación (7-15), la transformación conforme de las líneas u% 0, u1, u2 y las líneas p %0, u1, u2 [véase la Figura 7-45(a)] se convierten en círculos en el plano F(s), tal y como se muestra en la Figura 7-45(b). Supóngase que el punto representativo s sigue un contorno en el plano s en el sentido de las agujas del reloj. Si el contorno en el plano s encierra el polo de F(s), el lugar geométrico de F(s) rodea una vez el origen del plano F(s) en sentido contrario al de las agujas del reloj [véase la Figura . Si el contorno en el plano s encierra el cero de F(s), el lugar geométrico de F(s) rodea una vez el origen del plano F(s) en el sentido de las agujas del reloj [véase la Figura 7-46(b)]. Si el contorno en el plano s encierra al cero y al polo o si no encierra ni al cero ni al polo, el lugar geométrico de F(s) no rodea el origen del plano F(s) [véanse las Figuras 7-46(c) y (d)]. A partir del análisis anterior, se observa que la dirección del rodeo en el origen del plano F(s) depende de si el contorno en el plano s encierra un polo o un cero. Obsérvese que la localización de un polo o un cero en el plano s, ya sea en su semiplano derecho o en el semiplano izquierdo, no produce ninguna diferencia, pero el que se encierre un polo o un cero sí la genera. Si el contorno en el plano s encierra igual número de polos que de ceros, la curva cerrada correspondiente en el plano F(s) no rodeará el origen del plano F(s). El análisis anterior es una explicación gráfica del teorema de la transformación, que es la base del criterio de estabilidad de Nyquist.

Teorema de la transformación. Supóngase que F(s) es el cociente de dos polinomios en s. Supóngase también que P es el número de polos y Z el número de ceros de F(s) que se encuentran en cierto contorno cerrado en el plano s, considerada una multiplicidad de polos y ceros. Supóngase, por último, que este contorno es tal que no pasa a través de ningún polo ni cero de F(s). Este contorno cerrado en el plano s se transforma después dentro del plano F(s) como una curva cerrada. El número total N de rodeos del origen del plano F(s) en el sentido de las agujas del reloj, conforme un punto representativo traza el contorno completo en el sentido de las agujas del reloj, es igual a Z.P. (Obsérvese que, mediante este teorema de la transformación, no se encuentra el número de ceros y de polos sino su diferencia.)

No se presentará una prueba formal de este teorema, debido a que se dejará para el Problema A-7-6. Obsérvese que un número positivo N indica que hay más ceros que polos en la función F(s) y un número N negativo indica que hay más polos que ceros. En las aplicaciones de un sistema de control, el número P se determina con facilidad para F(s) %1 !G(s)H(s) a partir de la función G(s)H(s). Por tanto, si N se determina a partir de la gráfica de F(s), es fácil determinar el número de ceros en el contorno cerrado en el plano s. Obsérvese que las formas exactas del contorno en el plano s y el lugar geométrico de F(s) no son importantes en lo que respecta a los rodeos del origen, debido a que estos sólo dependen de que se encierren los polos y/o los ceros de F(s) mediante el contorno en el plano s. Aplicación del teorema de la transformación al análisis de la estabilidad de los sistemas en lazo cerrado. Para analizar la estabilidad de los sistemas de control lineales, se supone que el contorno cerrado en el plano s encierra todo el semiplano derecho de este. El contorno está formado por el eje ju completo desde u% .ä a !ä, y una trayectoria semicircular de radio infinito en el semiplano derecho del plano s. Dicho contorno se conoce como trayectoria de Nyquist. (La trayectoria se forma en el sentido de las agujas del reloj.) La trayectoria de Nyquist encierra el semiplano derecho del plano s así como todos los ceros y polos de 1!G(s)H(s) que tienen partes reales positivas. [Si no hay ceros de 1! G(s)H(s) en el semiplano derecho del plano s, no hay polos en lazo cerrado, y el sistema es estable.] Es necesario que el contorno cerrado, o la trayectoria de Nyquist, no pase por ningún cero ni polo de 1!G(s)H(s). Si G(s)H(s) tiene uno o más polos en el origen del plano s, la transformación del punto s% 0 se vuelve indeterminada. En estos casos, se evita pasar por el origen mediante una desviación. (Más adelante se realiza un análisis detallado de este caso especial.) Si el teorema de la transformación se aplica al caso especial en el que F(s) es igual a 1!G(s)H(s), se puede plantear el siguiente enunciado: si el contorno cerrado en el plano s encierra el semiplano derecho del plano s, como se muestra en la Figura 7-47, el número de ceros en el semiplano derecho del plano de la función F(s)% 1!G(s)H(s) es igual al número de polos de la función F(s)% 1! G(s)H(s) en el semiplano derecho del plano s, más el número de rodeos del origen del plano 1!G(s)H(s) en el sentido de las agujas del reloj por la curva cerrada correspondiente en este último plano. Debido a la condición supuesta de que lím srä [1 ! G(s)H(s)]%constante la función de 1!G(s)H(s) permanece constante conforme s recorre el semicírculo de radio infinito. Por esta razón, se determina si el lugar geométrico de 1!G(s)H(s) rodea el origen del plano 1! G(s)H(s) considerando sólo una parte del contorno cerrado en el plano s, es decir, el eje ju.

Rodear el origen, si llega a suceder, sólo ocurre mientras un punto representativo se mueve de .jä a !jä a lo largo del eje ju, siempre y cuando no se encuentren ceros ni polos sobre el eje ju. Obsérvese que la parte del contorno 1 !G(s)H(s) desde u% .ä a u %!ä es simplemente 1! G(ju)H(ju). Como 1!G(ju)H(ju) es la suma de vectores del vector unitario y el vector G(ju)H(ju), 1!G(ju)H(ju) es idéntico al vector dibujado del punto .1!j0 al punto terminal del vector G(ju)H(ju), como se muestra en la Figura 7-48. Rodear el origen mediante la gráfica de 1 !G(ju)H(ju) equivale a rodear el punto .1! j0 mediante el lugar geométrico G(ju)H(ju). Por tanto, la estabilidad del sistema en lazo cerrado se averigua examinando los rodeos del punto .1 !j0 mediante el lugar geométrico de G(ju)H(ju). El número de rodeos en el sentido de las agujas del reloj del punto .1! j0 se encuentra dibujando un vector del punto .1!j0 al lugar geométrico G(ju)H(ju), a partir de u%.ä, pasando por u %0 y hasta llegar a u% !ä o bien contando el número de rotaciones en el sentido de las agujas del reloj del vector. Es sencillo dibujar G(ju)H(ju) para la trayectoria de Nyquist. La transformación del eje ju negativo es la imagen reflejada de la transformación del eje ju positivo con respecto al eje real. Es decir, la gráfica de G(ju)H(ju) y la gráfica de G(.ju)H(.ju) son simétricas con respecto al eje real. El semicírculo con radio infinito se transforma en el origen del plano GH o en un punto del eje real del plano GH. En el análisis anterior, se ha supuesto que G(s)H(s) es el cociente de dos polinomios en s. Por tanto, el retardo de transporte e.Ts se ha excluido del análisis. Sin embargo, obsérvese que un análisis similar es aplicable para los sistemas con un retardo de transporte, aunque aquí no se ha aportado una prueba de esto. La estabilidad de un sistema con retardo de transporte se determina a partir de las curvas de respuesta en frecuencia en lazo abierto examinando el número de rodeos en el punto .1 !j0, al igual que en el caso de un sistema cuya función de transferencia en lazo abierto es un cociente de dos polinomios en s. Criterio de estabilidad de Nyquist. El análisis anterior, en el que se utilizaron los rodeos del punto .1!j0 mediante el lugar geométrico G(ju)H(ju), se resume en el siguiente criterio de estabilidad de Nyquist: Criterio de estabilidad de Nyquist [para un caso especial cuando G(s)H(s) no tiene polos ni ceros sobre el eje ju]: en el sistema de la Figura 7-44, si la función de transferencia en lazo abierto G(s)H(s) tiene k polos en el semiplano derecho del plano s y límsrä G(s)H(s)%constante, para la estabilidad, el lugar geométrico G(ju)H(ju), conforme u varía de .ä a ä, debe rodear k veces el punto .1 !j0 en sentido contrario al de las agujas del reloj.

Observaciones sobre el criterio de estabilidad de Nyquist 1. Este criterio se expresa como Z%N !P donde Z %número de ceros de 1 !G(s)H(s) en el semiplano derecho del plano s N% número de rodeos en el sentido de las agujas del reloj del punto .1! j0 P%número de polos de G(s)H(s) en el semiplano derecho del plano s Si P no es cero, para un sistema de control estable, se debe tener Z % 0 o N% .P, lo cual significa que se deben tener P rodeos del punto .1 !j0 en el sentido de las agujas del reloj. Si G(s)H(s) no tiene polos en el semiplano derecho del plano s, entonces Z %N. Por tanto, para la estabilidad no se debe rodear el punto .1!j0 mediante el lugar geomé- trico G(ju)H(ju). En este caso, no es necesario considerar el lugar geométrico para el eje ju completo, sino sólo para la parte de frecuencia positiva. La estabilidad de este sistema se determina observando si el punto .1! j0 se rodea mediante el diagrama de Nyquist de G(ju)H(ju). La región encerrada mediante el diagrama de Nyquist aparece en la Figura 7-49. Para la estabilidad, el punto .1 !j0 debe encontrarse fuera de la región sombreada. 2. Debe tenerse cuidado en el momento de probar la estabilidad de sistemas multilazo, debido a que pueden incluir polos en el semiplano derecho del plano s. (Obsérvese que, aunque un lazo interno puede ser inestable, el sistema en lazo cerrado completo se estabiliza mediante un diseño adecuado.) Una simple revisión de los rodeos del punto .1!j0 mediante el lugar geométrico G(ju)H(ju) no es suficiente para detectar la inestabilidad en los sistemas multilazo. Sin embargo, en tales casos, si un polo de 1!G(s)H(s) está en el semiplano derecho del plano s, se determina con facilidad aplicando el criterio de estabilidad de Routh al denominador de G(s)H(s). Si se incluyen en G(s)H(s) funciones trascendentes, tales como el retardo de transporte e.Ts, deben aproximarse mediante una expansión en serie antes de aplicar el criterio de estabilidad de Routh. 3. Si el lugar geométrico de G(ju)H(ju) pasa por el punto .1!j0, entonces los ceros de la ecuación característica, o los polos en lazo cerrado, se localizan sobre el eje ju. Esto no es conveniente para sistemas de control prácticos. Para un sistema en lazo cerrado bien diseñado, ninguna de las raíces de la ecuación característica debe encontrarse sobre el eje ju.

Caso especial cuando G(s)H(s) tiene polos y/o ceros sobre el eje j. En el aná- lisis anterior, se supuso que la función de transferencia en lazo abierto G(s)H(s) no tenía polos ni ceros en el origen. Ahora se considera el caso en el que G(s)H(s) contiene polos y/o ceros sobre el eje ju. Debido a que el diagrama de Nyquist no debe pasar por polos o ceros de G(s)H(s), si la función G(s)H(s) tiene polos o ceros en el origen (o sobre el eje ju para puntos diferentes del origen), debe modificarse el contorno en el plano s. La forma usual de modificar el contorno cerca del origen es mediante un semicírculo de radio infinitesimal e, como se aprecia en la Figura 7-50. [Obsérvese que este semicírculo puede encontrarse en el semiplano derecho o en el semiplano izquierdo del plano s. Aquí se considera el semicírculo del semiplano derecho del plano s.] Un punto representativo se mueve a lo largo del eje ju negativo desde .jä a j0.. Desde s%j0. a s%j0!, el punto se mueve a lo largo del semicírculo de radio e (donde ei1), y después se mueve a lo largo del eje ju positivo desde j0! a jä. A partir de s% jä, el contorno sigue un semicírculo con radio infinito y el punto representativo regresa al punto inicial, s%.jä. El área que evita el contorno cerrado modificado es muy pequeña y tiende a cero conforme el radio e tiende a cero. Por tanto, todos los polos y ceros en el semiplano derecho del plano s, si existen, están rodeados por este contorno. Considérese, por ejemplo, un sistema en lazo cerrado cuya función de transferencia en lazo abierto se obtiene mediante G(s)H(s)% K s(Ts! 1) Los puntos correspondientes a s%j0! y s%j0. en el lugar geométrico de G(s)H(s) en el plano G(s)H(s) son .jä y jä, respectivamente. En la trayectoria semicircular con radio e (donde e i1), la variable compleja s se escribe s%eejh donde h varía de .90o a !90o . A continuación, G(s)H(s) se convierte en G(eejh )H(eejh ) % K eejh% K e e.jh

El valor K/e tiende a infinito conforme e tiende a cero, y .h varía de 90o a .90o cuando un punto representativo s se mueve a lo largo del semicírculo. Por tanto, los puntos G(j0.)H(j0.) %jä y G(j0!)H(j0!) %.jä se unen mediante un semicírculo de radio infinito en el semiplano derecho del plano GH. La desviación semicircular infinitesimal alrededor del origen se transforma dentro del plano GH como un semicírculo de radio infinito. La Figura 7-51 muestra el contorno en el plano s y el lugar geométrico G(s)H(s) en el plano GH. Los puntos A, B y C en el contorno del plano s se transforman en los puntos respectivos Añ, Bñ y Cñ en el lugar geométrico G(s)H(s). Como se observa en la Figura 7-51, los puntos D, E y F en el semicírculo de radio infinito en el plano s se transforman dentro del origen del plano GH. Debido a que no hay un polo en el semiplano derecho del plano s y el lugar geométrico G(s)H(s) no rodea el punto .1!j0, no hay ceros de la función 1 !G(s)H(s) en el semiplano derecho del plano s. Por tanto, el sistema es estable. Para una función de transferencia en lazo abierto G(s)H(s) que contiene un factor 1/s n (donde n%2, 3, ...), la gráfica de G(s)H(s) tiene n semicírculos en el sentido de las agujas del reloj de radio infinito con respecto al origen, conforme un punto representativo s se mueve a lo largo del semicírculo de radio e (donde e i 1). Por ejemplo, considérese la siguiente función de transferencia en lazo abierto: G(s)H(s)% K s 2 (Ts! 1) Así, lím sreejh G(s)H(s)% K e 2 e2jh % K e 2 e.2jh Conforme h varía de .90o a 90o en el plano s, el ángulo de G(s)H(s) varía de 180o a .180o , como muestra la Figura 7-52. Como no hay un polo en el semiplano derecho del plano s y el lugar geométrico rodea el punto .1!j0 dos veces en el sentido de las agujas del reloj para cualquier valor positivo de K, hay dos ceros de 1 !G(s)H(s) en el semiplano derecho del plano s. Por tanto, este sistema siempre es inestable.

En esta sección se presentan varios ejemplos del análisis de estabilidad de los sistemas de control mediante el criterio de estabilidad de Nyquist. Si la trayectoria de Nyquist en el plano s encierra Z ceros y P polos de 1!G(s)H(s) y no pasa por los polos ni los ceros de 1!G(s)H(s) conforme un punto representativo s se mueve en el sentido de las agujas del reloj a lo largo de la trayectoria de Nyquist, el contorno correspondiente en el plano G(s)H(s) rodea en un círculo N %Z .P veces el punto .1 ! j0 en el sentido de las agujas del reloj. (Los valores negativos de N implican rodeos en sentido contrario al de las agujas del reloj.) Al examinar la estabilidad de los sistemas de control lineales mediante el criterio de estabilidad de Nyquist, se observa que se pueden presentar tres casos. 1. El punto .1 !j0 no está rodeado. Esto implica que el sistema es estable si no hay polos de G(s)H(s) en el semiplano derecho del plano s; de lo contrario, el sistema es inestable. 2. El punto .1! j0 queda rodeado una o varias veces en sentido contrario al de las agujas del reloj. En este caso, el sistema es estable si el número de rodeos en sentido contrario al de las agujas del reloj es igual al número de polos G(s)H(s) en el semiplano derecho del plano s; de lo contrario, el sistema es inestable. 3. El punto .1!j0 queda rodeado una o varias veces en el sentido de las agujas del reloj. En este caso el sistema es inestable.

Sistemas condicionalmente estables. La Figura 7-58 muestra un ejemplo de un lugar geométrico G(ju)H(ju) para el cual el sistema en lazo cerrado se vuelve inestable cuando se varía la ganancia en lazo abierto. Si el incremento de la ganancia en lazo abierto es suficiente, el lugar geométrico G(ju)H(ju) rodea al punto .1 !j0 dos veces, y el sistema se vuelve inestable. Si la ganancia en lazo abierto disminuye lo suficiente, una vez más el lugar geométrico G(ju)H(ju) rodea al punto .1!j0 dos veces. Para una operación estable del sistema considerado aquí, el punto crítico .1 !j0 no debe aparecer en las regiones comprendidas entre OA y BC en la Figura 7-58. Un sistema que sólo es estable para rangos limitados del valor de la ganancia en lazo abierto tales que el punto .1! j0 está completamente fuera del lugar geométrico G(ju)H(ju) es condicionalmente estable. Un sistema condicionalmente estable es estable para el valor de la ganancia en lazo abierto que se encuentra entre valores críticos, y es inestable si la ganancia en lazo abierto se incrementa o disminuye de forma suficiente. Un sistema semejante se vuelve inestable cuando las señales de entrada son grandes, debido a que una señal grande puede provocar una saturación, y esta, a su vez, reduce la ganancia en lazo abierto del sistema. Es aconsejable evitar una situación como esta. Sistema multilazo. Considérese el sistema de la Figura 7-59. Se trata de un sistema multilazo. El lazo interno tiene la función de transferencia G(s)% G2(s) 1! G2(s)H2(s)

Si G(s) es inestable, los efectos de la inestabilidad generan uno o más polos en el semiplano derecho del plano s. Entonces, la ecuación característica del lazo interno, 1! G2(s)H2(s)% 0, tiene uno o más ceros en esta parte del plano. Si G2(s) y H2(s) tienen P1 polos aquí, el número Z1 de ceros en el semiplano derecho del plano de 1!G2(s)H2(s) se encuentra a partir de Z1%N1!P1, donde N1 es el número de rodeos en el sentido de las agujas del reloj del punto .1!j0 mediante el lugar geométrico G2(s)H2(s). Debido a que la función de transferencia en lazo abierto de todo el sistema se obtiene mediante G1(s)G(s)H1(s), la estabilidad de este sistema en lazo cerrado se encuentra a partir del diagrama de Nyquist de G1(s)G(s)H1(s) y el conocimiento de los polos del semiplano derecho del plano de G1(s)G(s)H1(s). Obsérvese que, si se elimina un lazo de realimentación por medio de reducciones de un diagrama de bloques, existe una posibilidad de que se introduzcan polos inestables; si se elimina la rama del camino directo por medio de reducciones del diagrama de bloques, existe una posibilidad de que se introduzcan ceros en el semiplano derecho del plano. Por tanto, se deben considerar todos los polos y ceros en el semiplano derecho del plano conforme aparecen las reducciones de lazos subsidiarios. Este conocimiento es necesario para determinar la estabilidad de sistemas multilazo.

El criterio de estabilidad de Nyquist aplicado a los diagramas polares inversos. En los análisis anteriores, se aplicó el criterio de estabilidad de Nyquist a los diagramas polares de la función de transferencia en lazo abierto G(s)H(s). Al analizar los sistemas multilazo, en ocasiones se usa la función de transferencia inversa para permitir análisis gráficos; esto evita gran parte del cálculo numérico. (El criterio de estabilidad de Nyquist también es adecuado para los diagramas polares inversos, para los cuales la obtención matemática del criterio de estabilidad de Nyquist es igual al que se hace para los diagramas polares directos.) El diagrama polar inverso de G(ju)H(ju) es un diagrama de 1/[G(ju)H(ju)] como una función de u. Por ejemplo, si G(ju)H(ju) es G(ju)H(ju) % juT 1 !juT entonces, 1 G(ju)H(ju) % 1 juT !1 El diagrama polar inverso para un0 es la mitad inferior de la línea vertical que empieza en el punto (1, 0) sobre el eje real. El criterio de estabilidad de Nyquist aplicado a los diagramas inversos se plantea del modo siguiente. Para que un sistema en lazo cerrado sea estable, el rodeo, si existe, del punto .1!j0 mediante el lugar geométrico 1/[G(s)H(s)] (conforme s se mueve a lo largo de la trayectoria de Nyquist) debe ser en sentido contrario al de las agujas del reloj y el número de veces que queda rodeado debe ser igual al número de polos de 1/[G(s)H(s)] [es decir, de ceros de G(s)H(s)] que se encuentran en el semiplano derecho del plano s. [El número de ceros de G(s)H(s) en el semiplano derecho del plano s se determina mediante el criterio de estabilidad de Routh.] Si la función de transferencia en lazo abierto G(s)H(s) no tiene ceros en el semiplano derecho del plano s, y con el fin de que el sistema en lazo cerrado sea estable, el número de rodeos del punto .1!j0 por el lugar geométrico 1/[G(s)H(s)] debe ser cero. Obsérvese que, aunque el criterio de estabilidad de Nyquist se puede aplicar a los diagramas polares inversos, si se incorporan datos experimentales de la respuesta en frecuencia, puede ser difícil contar el número de rodeos del lugar geométrico 1/[G(s)H(s)], debido a que es difícil medir el cambio de fase correspondiente a la trayectoria semicircular infinita en el plano s. Por ejemplo, si la función de transferencia en lazo abierto G(s)H(s) implica un retardo de transporte tal que G(s)H(s)% Ke.juL s(Ts! 1) entonces la cantidad de rodeos del punto .1 !j0 mediante el lugar geométrico 1/[G(s)H(s)] se vuelve infinita y no es posible aplicar el criterio de estabilidad de Nyquist al diagrama polar inverso de tal función de transferencia en lazo abierto. En general, si los datos experimentales de la respuesta en frecuencia no pueden expresarse de forma analítica, deben dibujarse los lugares geométricos G(ju)H(ju)y1/[G(ju)H(ju)], además de determinarse el número de ceros de G(s)H(s) en el semiplano derecho del plano s. Es más difícil determinar los ceros de G(s)H(s) en el semiplano derecho del plano s (en otras palabras, determinar si un componente específico es de fase mínima) que determinar los polos de G(s)H(s) en la misma parte del plano (en otras palabras, determinar si el componente es estable).