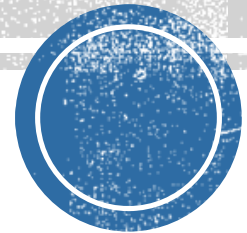


REDUCCIÓN DE SUBSISTEMAS MÚLTIPLES

- Nise, N.(2004).Sistema de control para ingeniería.
México D.F.: CECSA.
- Capítulo 5.



OBJETIVOS DEL CAPÍTULO

- En este capítulo, el estudiante aprenderá lo siguiente:
 - Reducir un diagrama de bloques de subsistemas múltiples a un solo bloque que represente la función de transferencia de entrada a salida.
 - Analizar y diseñar la respuesta transitoria de un sistema formado por múltiples subsistemas.



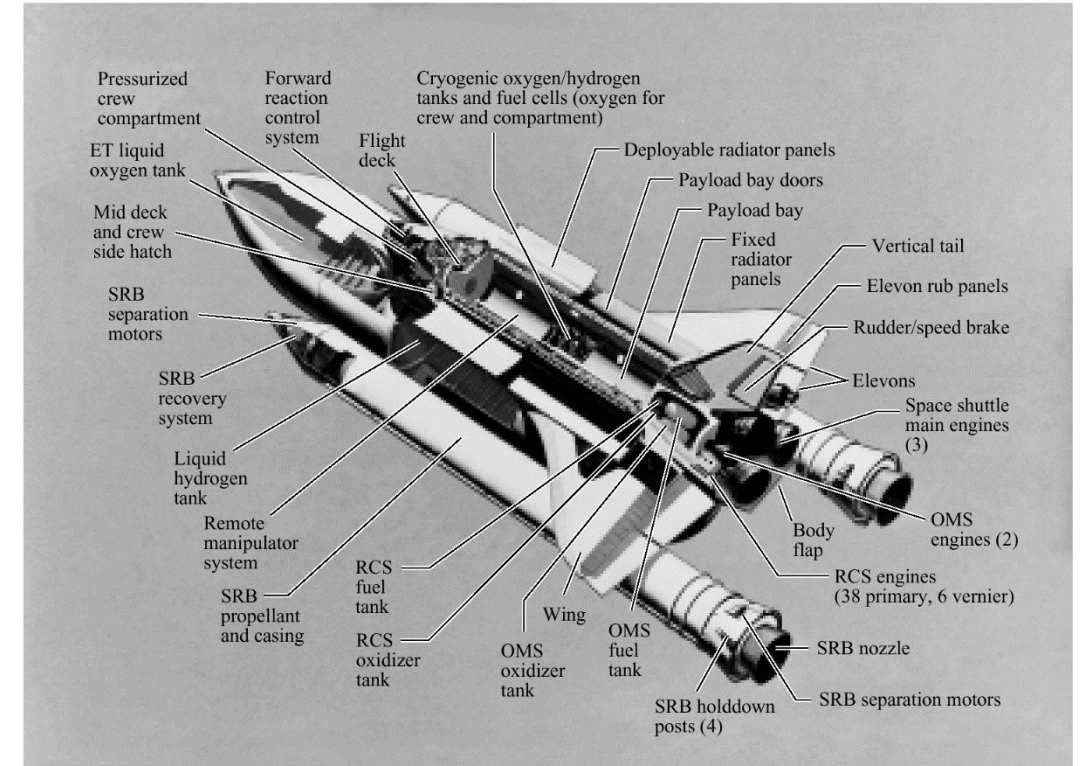
5.1 INTRODUCCIÓN

- Hemos estado trabajando con subsistemas individuales representados por un bloque con su entrada y su salida; pero, se representan otros sistemas más complicados por la interconexión de numerosos subsistemas.
- Puesto que podemos calcular la respuesta de una sola función de transferencia, busquemos, representar los subsistemas múltiples como una función de transferencia.
- Entonces podemos aplicar las técnicas analíticas de los capítulos anteriores y obtener información de la respuesta transitoria de todo el sistema.



5.2 DIAGRAMAS DE BLOQUES

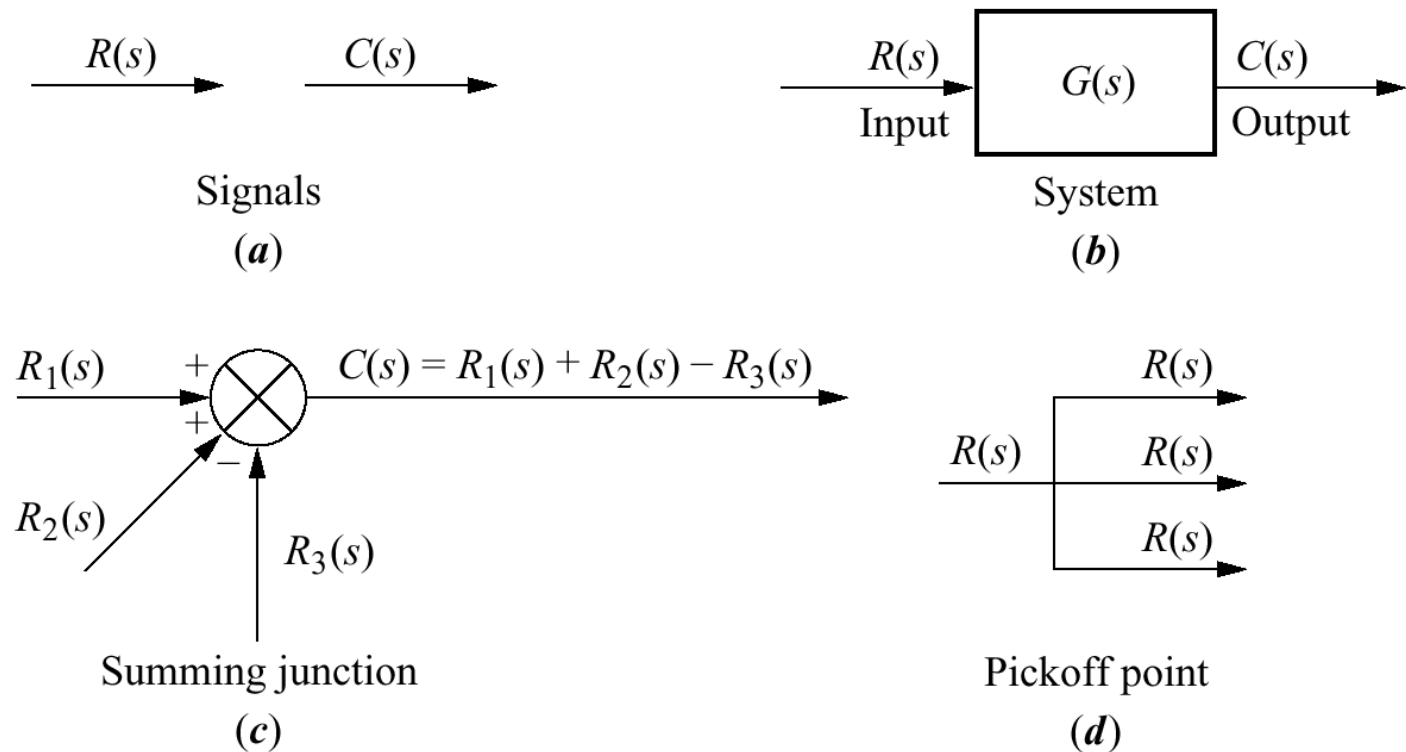
- Se representa un subsistema como un bloque con una entrada, una salida y una función de transferencia. Numerosos sistemas están compuestos de subsistemas múltiples con en la figura 5.1.



- Figura 5.1 El transbordador espacial consta de subsistemas múltiples.



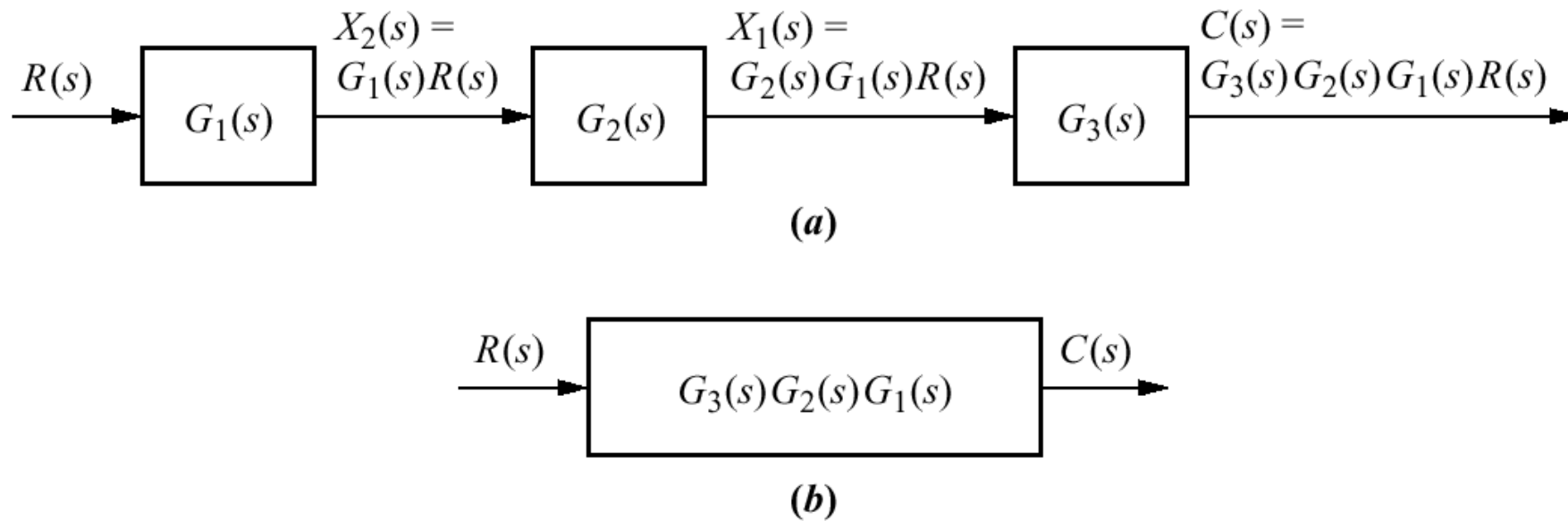
- Cuando se interconectan los subsistemas múltiples, deben agregarse algunos elementos esquemáticos más al diagrama de bloques.
- Estos nuevos elementos son ***los puntos de suma y puntos de unión o derivación***.



- Figura 5.2 Componentes de un diagrama de bloques para un sistema lineal invariante con el tiempo.



- A continuación examinamos algunas topologías comunes para interconectar los subsistemas y deducir la representación única de la función de transferencia para cada uno de ellos.
- **Forma en cascada:** La figura 5.3(a) muestra un ejemplo de subsistemas en cascada.



■ Figura 5.3 a) subsistemas en cascada; b) función de transferencia equivalente.



- La función de transferencia equivalente es el producto de las funciones de transferencia de los subsistemas.

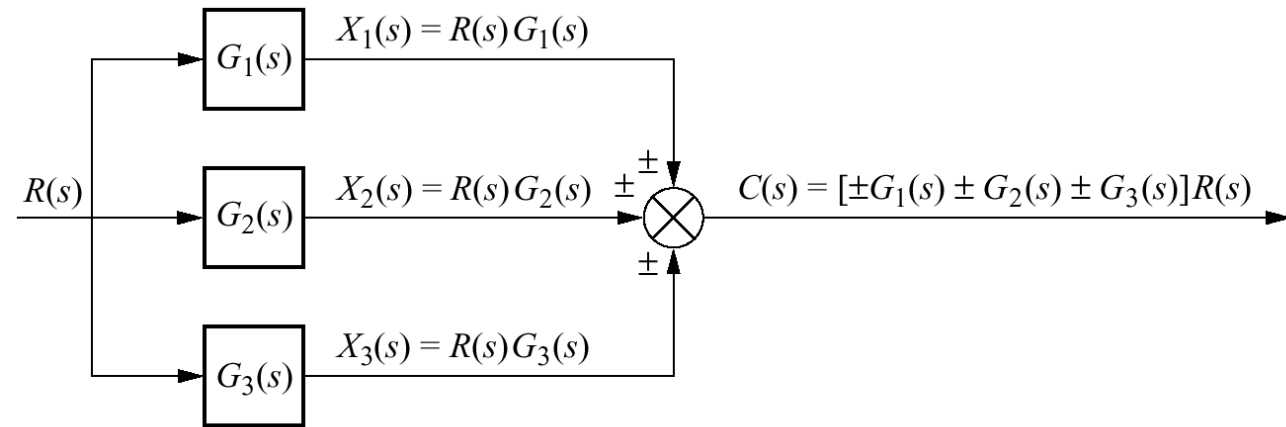
$$G_e(s) = G_3(s)G_2(s)G_1(s) \quad (5.1)$$

- Se dedujo la ecuación (5.1) de la suposición de que los sistemas interconectados no cargan subsistemas adyacentes. Esto es, la salida del subsistema permanece igual ya sea que este o no conectado al subsistema siguiente.
- Una forma de evitar el cargado es usar un amplificador entre las dos redes.
- Con el amplificador incluido, la función de transferencia equivalente es el producto de las funciones de transferencia y la ganancia, K , del amplificador.

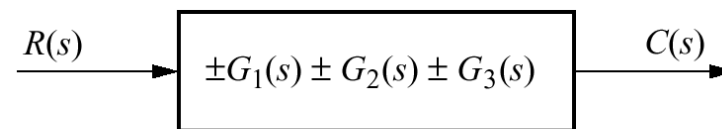


- **Forma en paralelo:** La figura 5.5 muestra un ejemplo de subsistemas en paralelo.

$$G_e(s) = \pm G_1(s) \pm G_2(s) \pm G_3(s) \quad (5.6)$$



(a)



(b)

- Figura 5.5 a) Subistema en paralelo; b) función de transferencia equivalente.

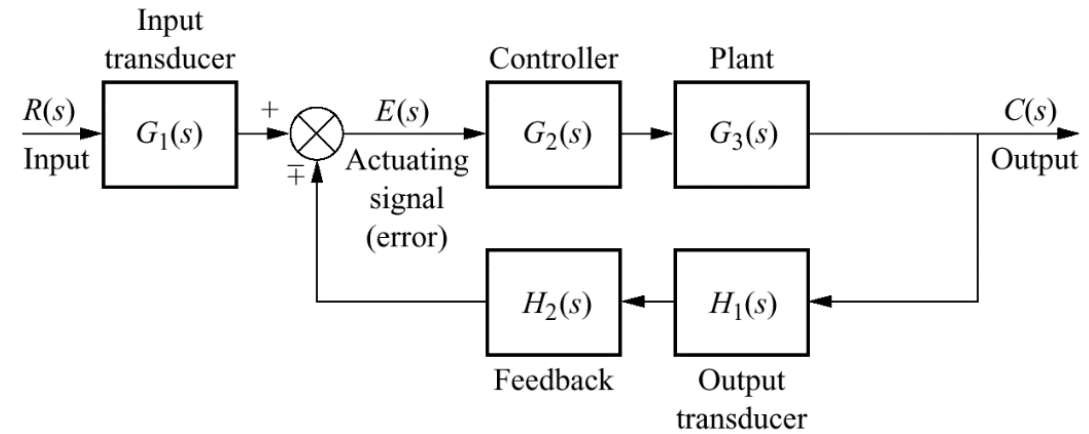


- **Forma realimentada:** El sistema realimentado es la base para nuestro estudio de ingeniería en sistemas de control. En la figura 5.6(a) se ilustra el sistema típico realimentado.

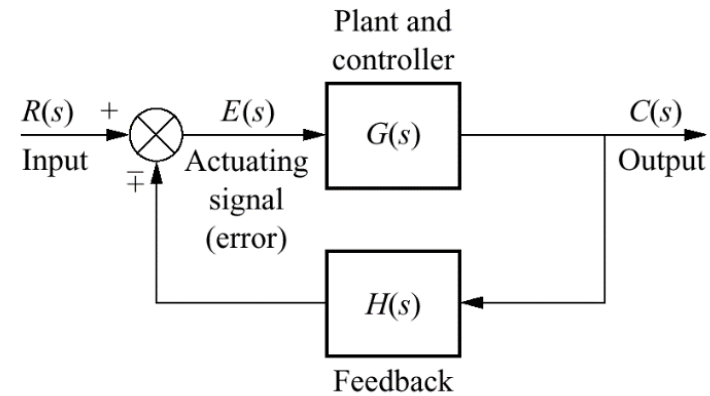
$$G_e(s) = \frac{G(s)}{1 \pm G(s)H(s)}$$

- La ecuación (5.9) se llama **función de transferencia en lazo abierto, o de ganancia de lazo.**

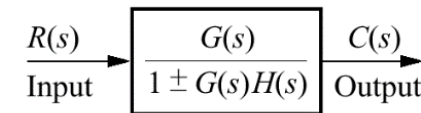
- Figura 5.6 a) Sistema de control realimentado; b) modelo simplificado; c) función de transferencia equivalente.



(a)



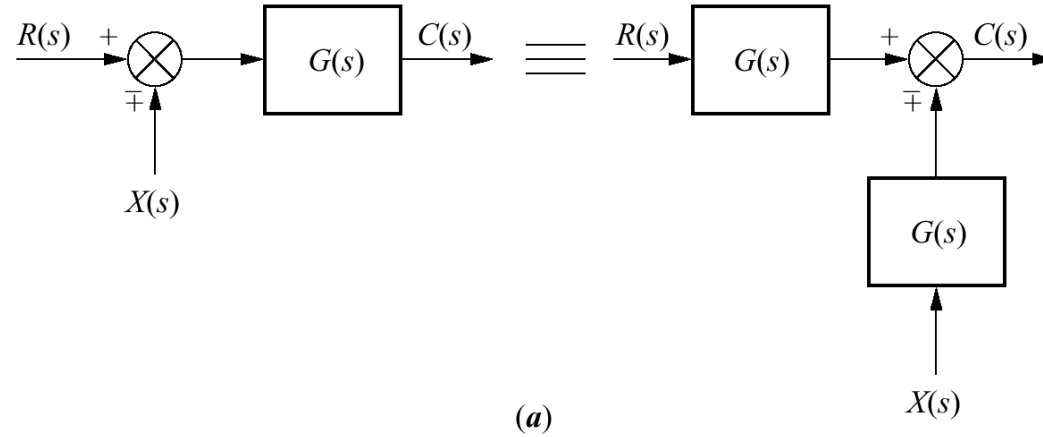
(b)



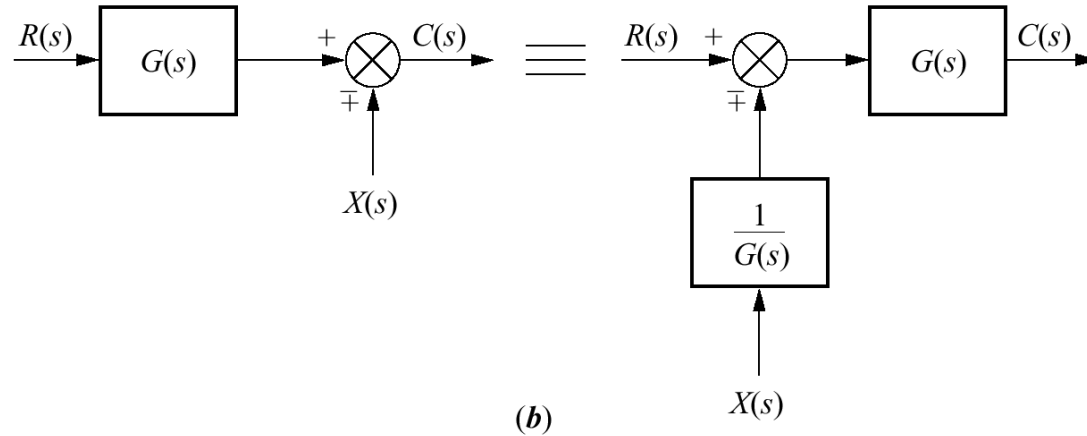
(c)

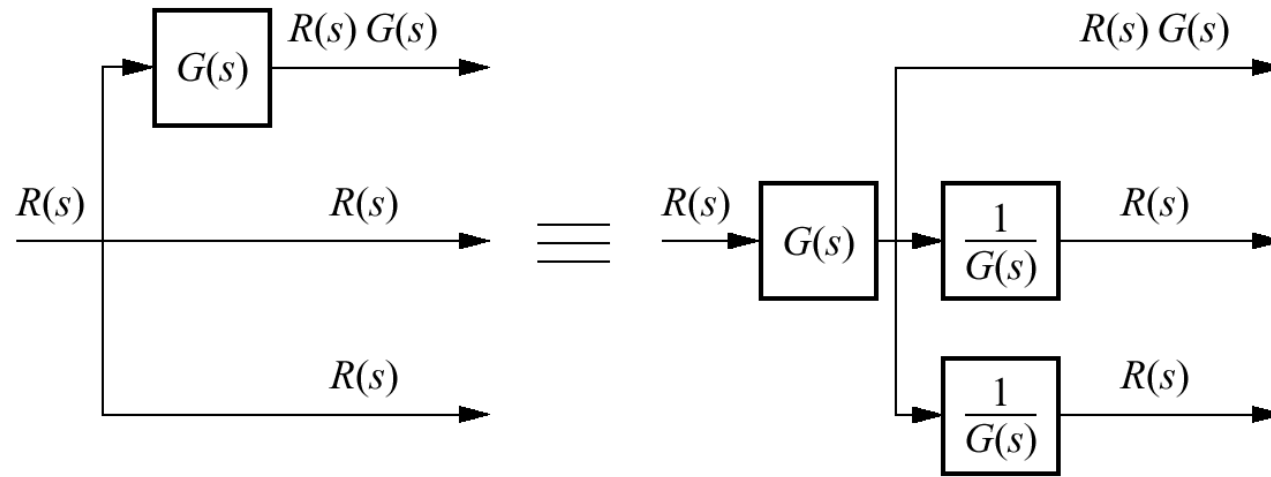


- **Movimiento de bloques para crear formas conocidas:**

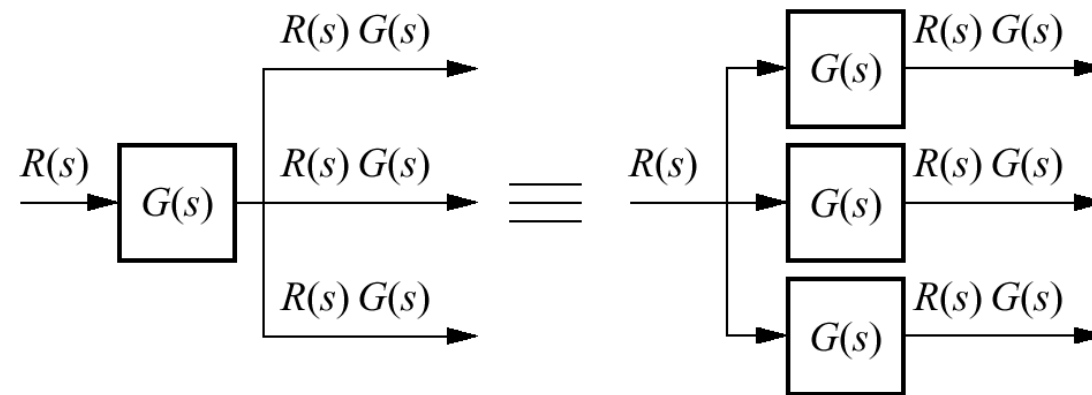


- Figura 5.7 Álgebra de diagrama de bloques para puntos de suma; formas equivalentes para mover un bloque. a) a la izquierda más allá de un punto de suma. b) a la derecha más allá de un punto de suma.





(a)



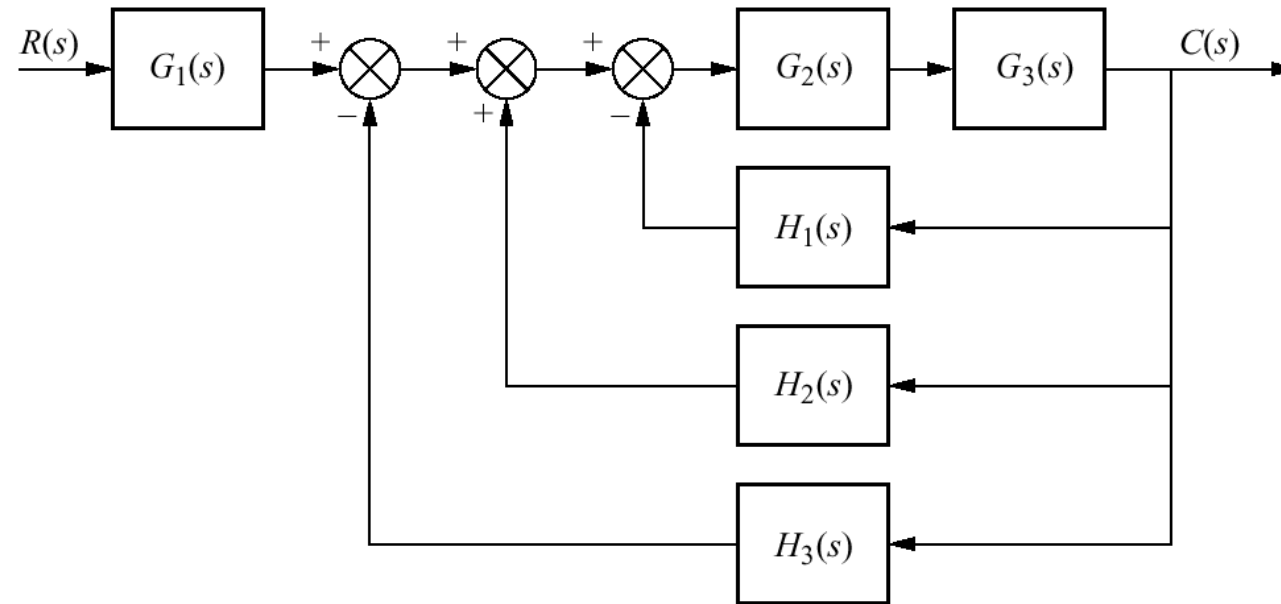
(b)

- Figura 5.8 Álgebra de diagrama de bloques para puntos de derivación; formas equivalentes para mover un bloque. a) a la izquierda más allá de un punto de derivación. b) a la derecha más allá de un punto de derivación.



Ejemplo 5.1 Reducción de diagramas de bloques por medio de formas conocidas.

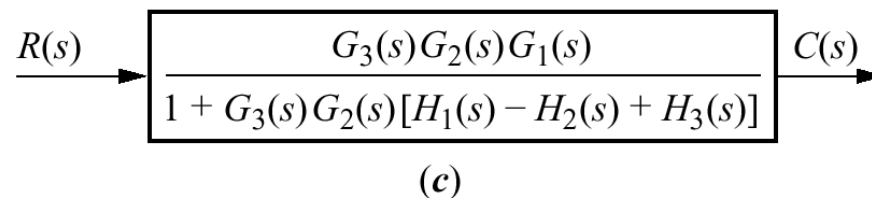
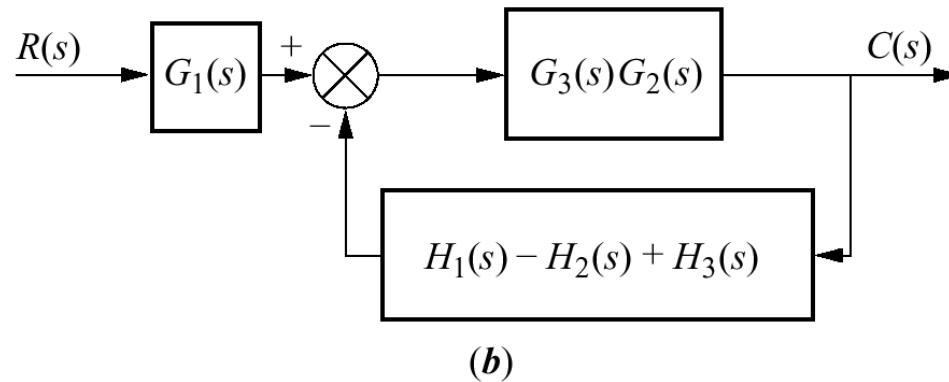
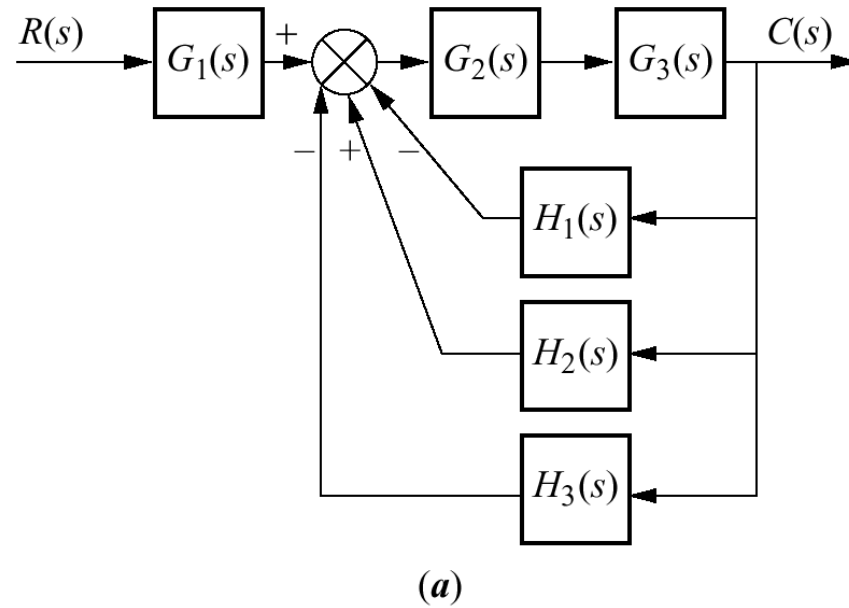
- **Problema:** Reduzca el diagrama de bloques que se muestra en la figura 5.9 a una sola función de transferencia.



■ Figura 5.9 Diagrama de bloques para el ejemplo 5.1



■ **Solución:**

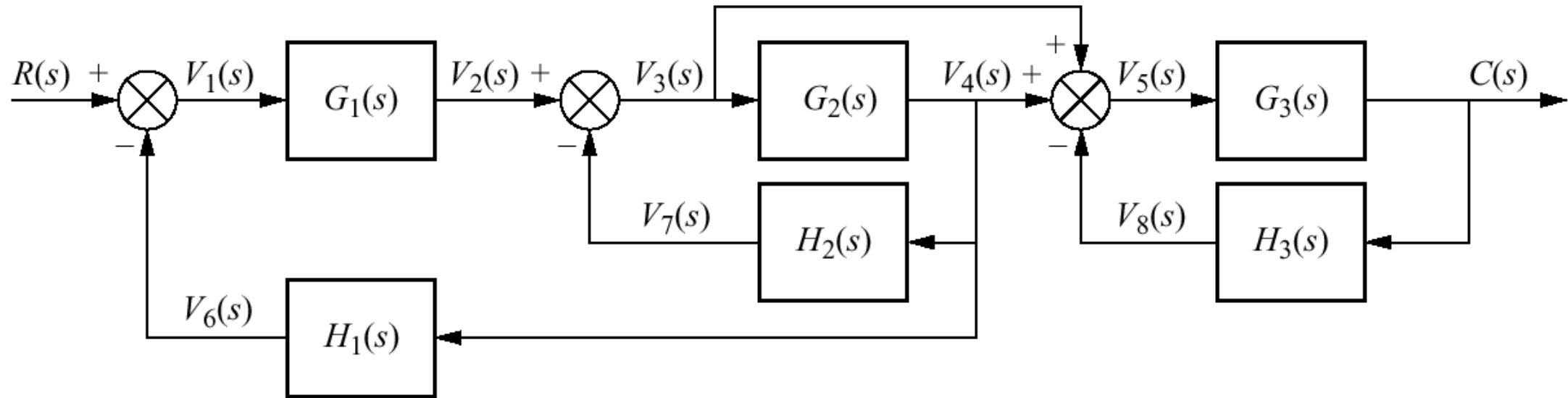


- Figura 5.10 Para resolver el ejemplo 5.1: a) eliminar los puntos de suma; b) formar sistema equivalente cascada en la trayectoria directa y sistema equivalente en paralelo en la trayectoria de realimentación; c) formar sistema equivalente de realimentación y multiplicar por el sistema cascada $G_1(s)$.



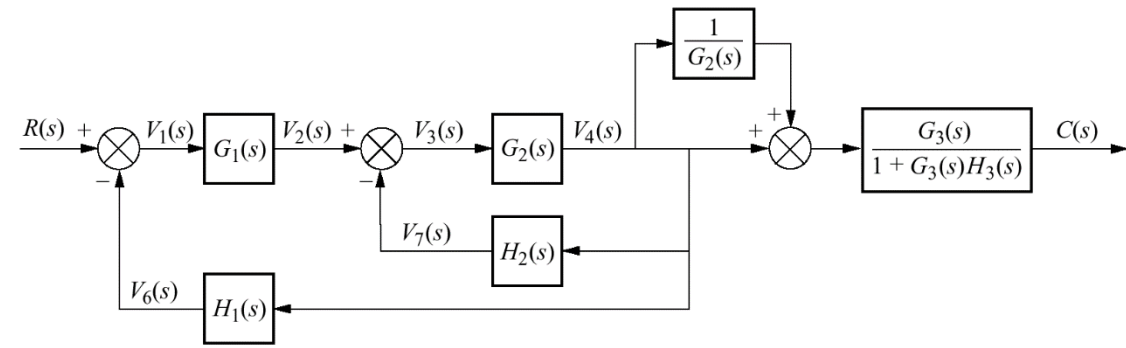
Ejemplo 5.2 Reducción de un diagrama de bloques por medio de movimiento de bloques.

- **Problema:** Reduzca el sistemas que se muestra en la figura 5.11 a una sola función de transferencia.

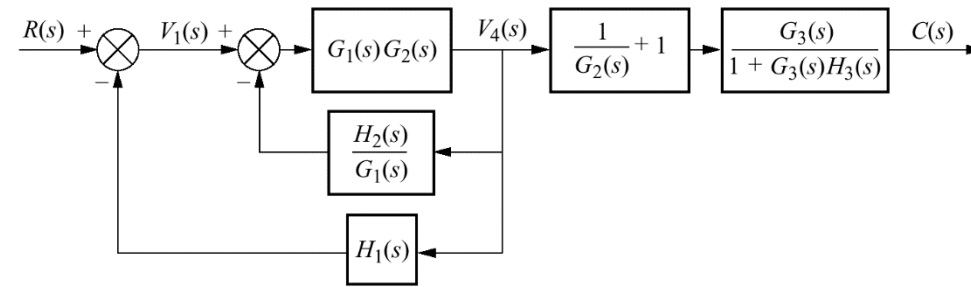


■ Figura 5.11 Diagrama de bloques para el ejemplo 5.2.

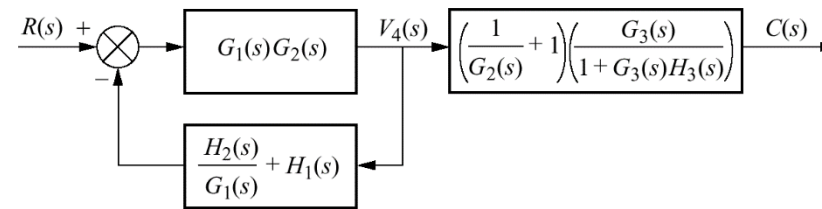




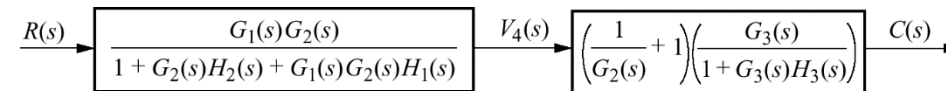
(a)



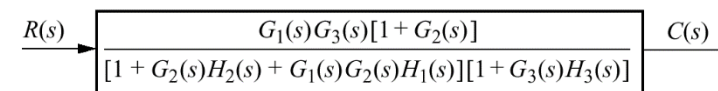
(b)



(c)



(d)



(e)

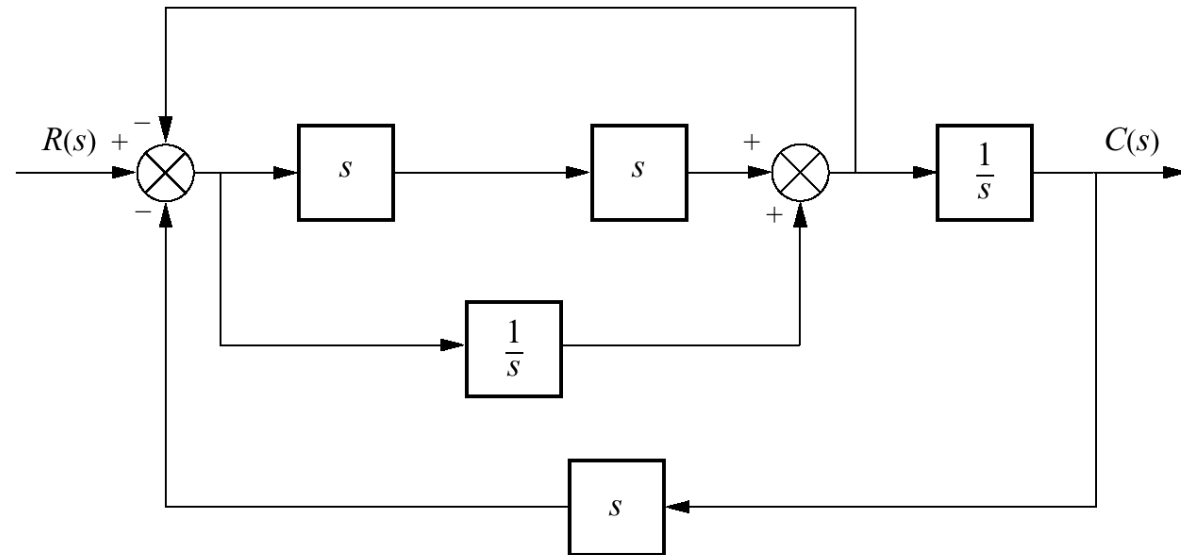
■ Solución:

- Figura 5.12 Pasos en la reducción del diagrama de bloques para el ejemplo 5.2.



Ejercicio de evaluación de destreza 5.1

- **Problema:** Encuentre la función de transferencia equivalente, $T(s) = C(s)/R(s)$, para el sistema que se muestra en la figura 5.13.

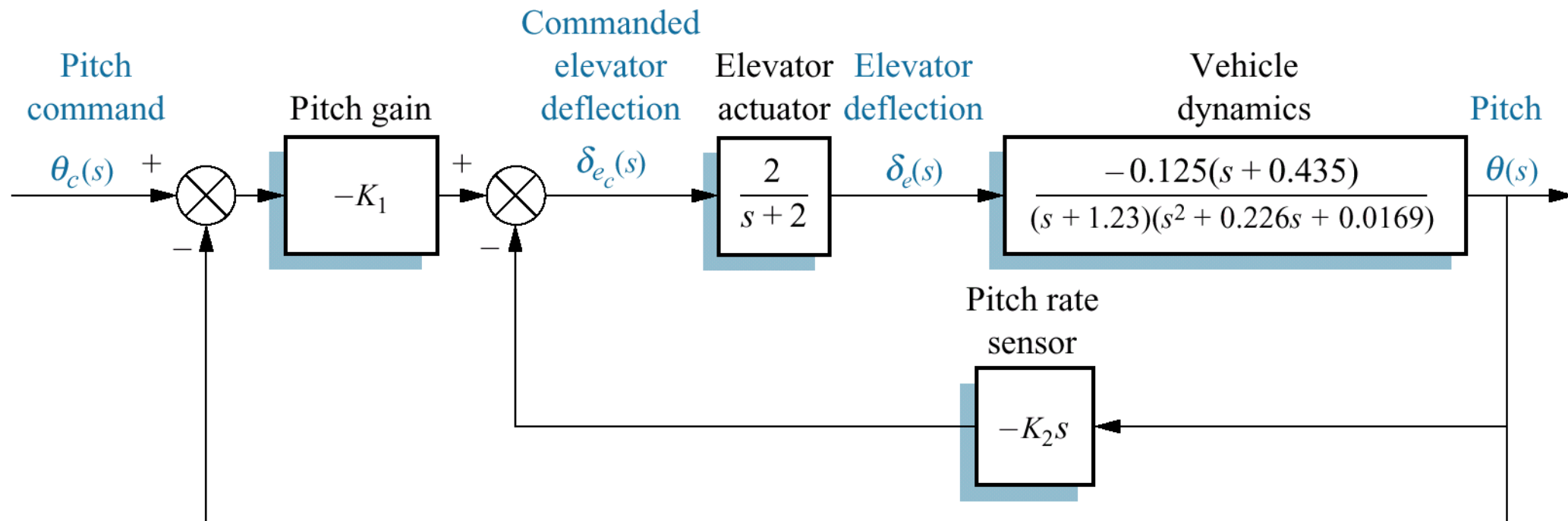


- **Respuesta:** $T(s) = \frac{s^3+1}{2s^4+s^2+2s}$

- Figura 5.13 Diagrama de bloques para el ejercicio de evaluación de destreza 5.1.



EJERCICIO: SISTEMA DE CONTROL DE DESVIACIÓN DE UN UFSS



■ Solución:

- **Método 1,**
instrucciones *series*,
feedback y *parallel*



Command Window

```
>>
'(ch5pl) UFSS Pitch Control System' % Display label.
'Solution via Series, Parallel, & Feedback Commands'

numg1=[-1]; % Define numerator of G1(s).
deng1=[1]; % Define denominator of G1(s).
numg2=[0 2]; % Define numerator of G2(s).
deng2=[1 2]; % Define denominator of G2(s).
numg3=-0.125*[1 0.435]; % Define numerator of G3(s).
deng3=conv([1 1.23],[1 0.226 0.0169]); % Define denominator of G3(s).

numh1=[-1 0]; % Define numerator of H1(s).
denh1=[0 1]; % Define denominator of H1(s).
G1=tf(numg1,deng1); % Create LTI transfer function,
% G1(s).

G2=tf(numg2,deng2); % Create LTI transfer function,
% G2(s).

G3=tf(numg3,deng3); % Create LTI transfer function,
% G3(s).

H1=tf(numh1,denh1); % Create LTI transfer function,
% H1(s).

G4=series(G2,G3); % Calculate product of elevator and
% vehicle dynamics.

G5=feedback(G4,H1); % Calculate closed-loop transfer
% function of inner loop.

Ge=series(G1,G5); % Multiply inner-loop transfer
% function and pitch gain.

'T(s) via Series, Parallel, & Feedback Commands'
% Display label.

T=feedback(Ge,1) % Find closed-loop transfer function.
```



- Finalmente

T =

$$0.25 s + 0.1088$$

$$s^4 + 3.456 s^3 + 3.457 s^2 + 0.9693 s + 0.1503$$

Continuous-time transfer function.



➤ Método 2, álgebra entre bloques

T =

$$\frac{0.25 s + 0.1088}{s^4 + 3.456 s^3 + 3.457 s^2 + 0.9693 s + 0.1503}$$

Continuous-time transfer function.

Command Window

```
>> 'Solution via Algebraic Operations' % Display label.
clear % Clear session.
numg1=[-1]; % Define numerator of G1(s).
deng1=[1]; % Define denominator of G1(s).
numg2=[0 2]; % Define numerator of G2(s).
deng2=[1 2]; % Define denominator of G2(s).
numg3=-0.125*[1 0.435]; % Define numerator of G3(s).
deng3=conv([1 1.23],[1 0.226 0.0169]); % Define denominator of G3(s).

numh1=[-1 0]; % Define numerator of H1(s).
denh1=[0 1]; % Define denominator of H1(s).
G1=tf(numg1,deng1); % Create LTI transfer function,
% G1(s).
G2=tf(numg2,deng2); % Create LTI transfer function,
% G2(s).
G3=tf(numg3,deng3); % Create LTI transfer function,
% G3(s).
H1=tf(numh1,denh1); % Create LTI transfer function,
% H1(s).
G4=G3*G2; % Calculate product of elevator and
% vehicle dynamics.
G5=G4/(1+G4*H1); % Calculate closed-loop transfer
% function of inner loop.
G5=minreal(G5); % Cancel common terms.
Ge=G5*G1; % Multiply inner-loop transfer
% functions.
'T(s) via Algebraic Operations' % Display label.
T=Ge/(1+Ge); % Find closed-loop transfer function.
T=minreal(T) % Cancel common terms.
```

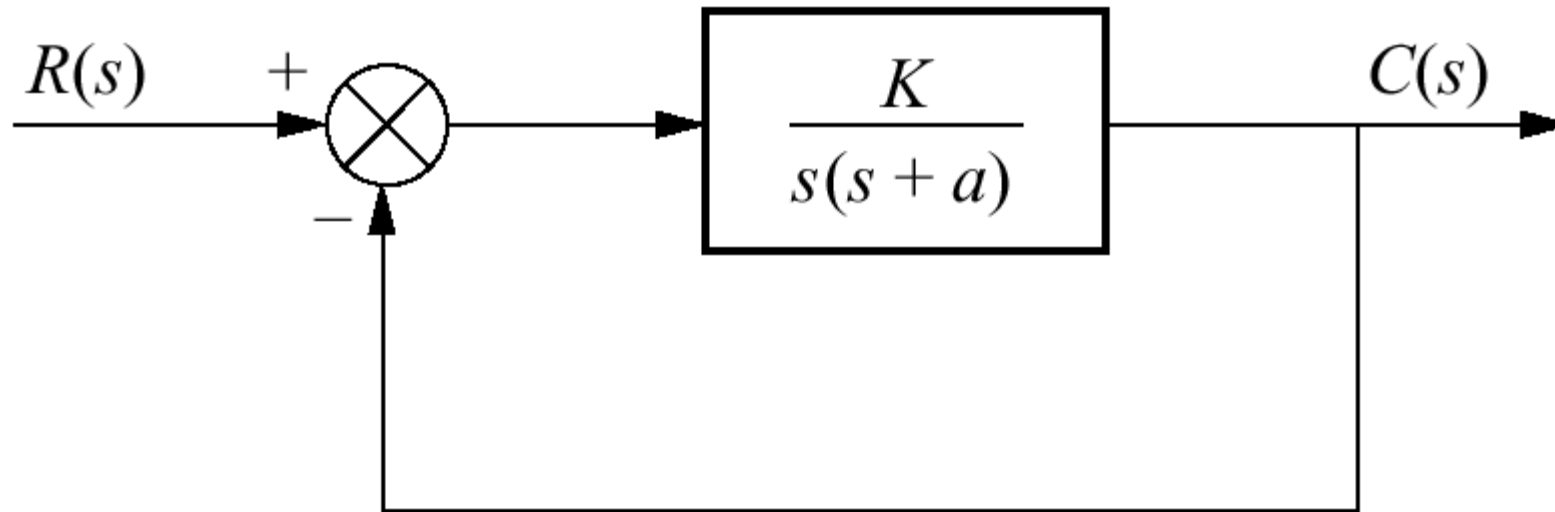


5.3 ANÁLISIS Y DISEÑO DE SISTEMAS REALIMENTADOS

- Una aplicación inmediata de los principios de la sección 5.2 es el análisis y diseño de los sistemas realimentados que se reducen a sistemas de segundo orden.
- Se pueden hallar el sobrepaso en porcentaje, tiempo de asentamiento, tiempo pico y tiempo de levantamiento a partir de la función de transferencia equivalente.



- Considere el sistema que vemos en la figura 5.14, que puede modelar un sistema de control como el del sistema de control acimutal de la antena



■ Figura 5.14 Sistema de control realimentado de segundo orden.



- Por ejemplo la función de transferencia, $K/s(s + a)$, puede modelar los amplificadores, motor, carga y engranes. De la ecuación (5.9), la **función de transferencia en lazo cerrado**, $T(s)$, para este sistema es

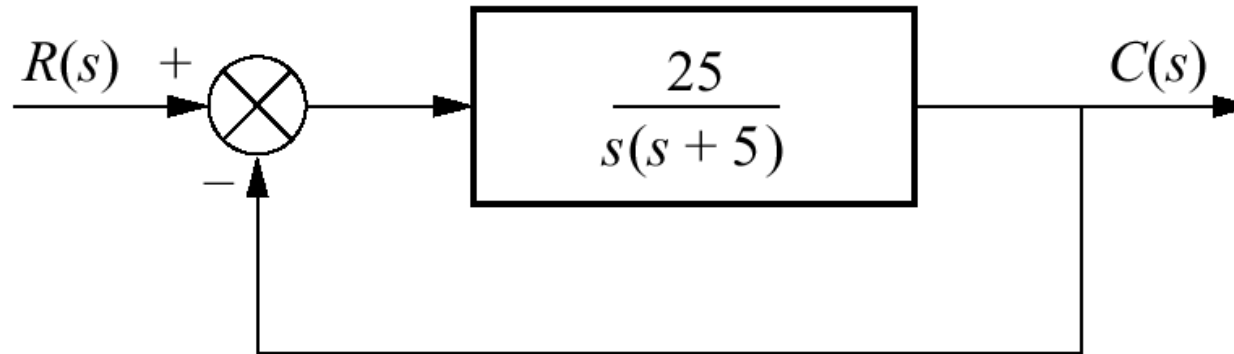
$$T(s) = \frac{K}{s^2 + as + K}$$

- Donde K modela la ganancia del amplificador.
- Cuando K varía, los polos se mueven en los tres intervalos de operación de segundo orden.



Ejemplo 5.3 Búsqueda de la respuesta transitoria

- **Problema:** Para el sistema que se muestra en la figura 5.15, encuentre el tiempo pico, sobrepaso en porcentaje y tiempo de asentamiento.



■ Figura 5.15 Sistema realimentado para el ejemplo 5.3



- **Solución:** La función de transferencia en lazo cerrado encontrada de la ecuación (5.9) es

$$T(s) = \frac{25}{s^2 + 5s + 25} ; (5.13)$$

- De la ecuación (4.18), $\omega_n = \sqrt{25} = 5 ; (5.14)$
- De la ecuación (4.21), $2\zeta\omega_n = 5 ; (5.15)$
- Al sustituir la ecuación (5.14) en la (5.15) y al despejar ζ , encontramos, $\zeta = 0.5 ; (5.16)$



- Al usar los valores para ζ y ω_n junto con las ecuaciones (4.34),(4.38) y (4.42), encontramos

$$T_p = \frac{\pi}{\omega_n \sqrt{1-\zeta^2}} = 0.726 \text{ segundos} ; (5.17)$$

$$\%OS = e^{-\zeta\pi/\sqrt{1-\zeta^2}} \times 100 = 16.303 ; (5.18)$$

$$T_s = \frac{4}{\zeta\omega_n} = 1.6 \text{ segundos} ; (5.19)$$



- **MATLAB:** ch5p2, del apéndice B.

```
>> '(ch5p2) Example 5.3'
numg=[25];
deng=poly([0 -5]);
'G(s)'
G=tf(numg,deng)
'T(s)'
T=feedback(G,1)
[numt,dent]=tfdata(T,'v');

wn=sqrt(dent(3))
z=dent(2)/(2*wn)
Ts=4/(z*wn)
Tp=pi/(wn*sqrt(1-z^2))
pos=exp(-z*pi/sqrt(1-z^2))*100
step(T)

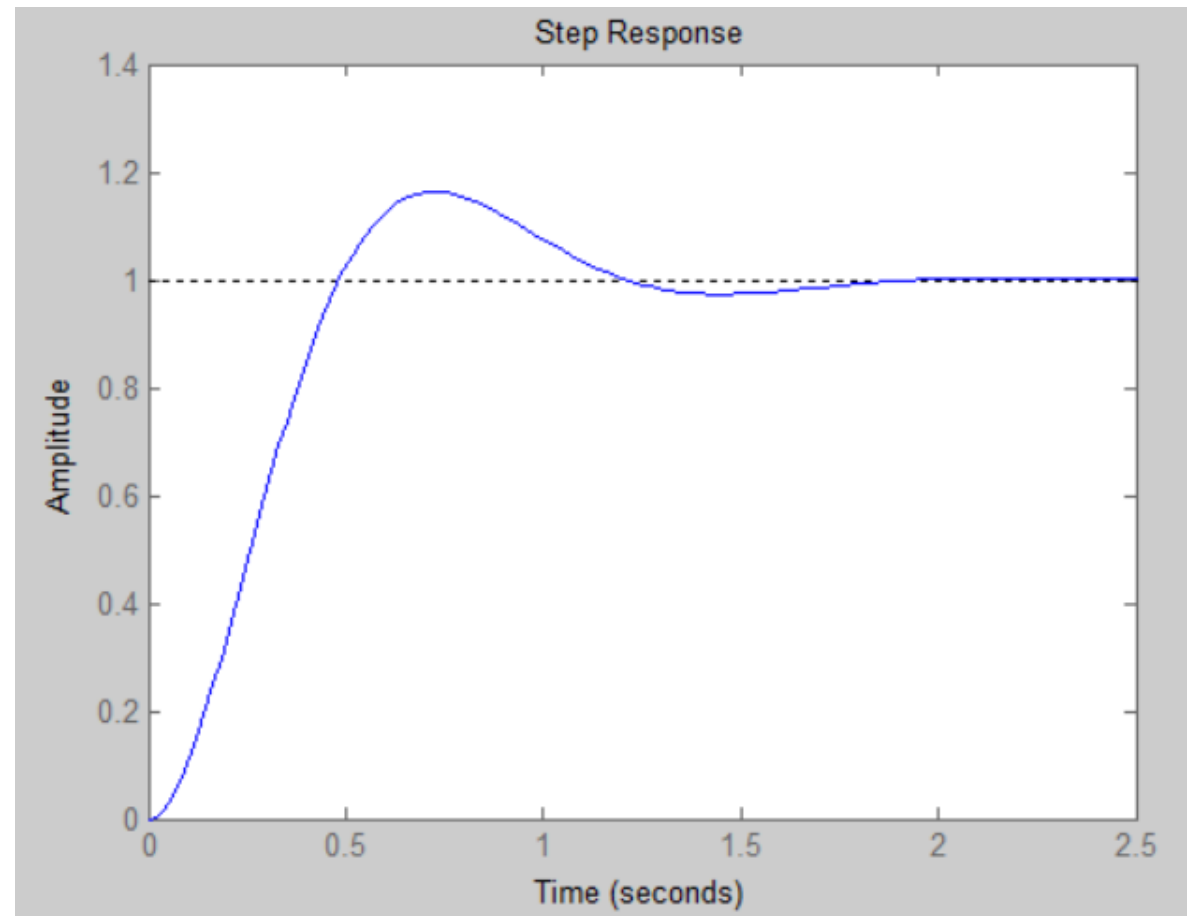
% Display label.
% Define numerator of G(s).
% Define denominator of G(s).
% Display label.
% Create and display G(s).
% Display label.
% Find T(s).
% Extract numerator & denominator of
% T(s).
% Find natural frequency.
% Find damping ratio.
% Find settling time.
% Find peak time.
% Find percent overshoot.
% Generate step response.
```



```
G =  
  
    25  
-----  
s^2 + 5 s  
  
Continuous-time transfer function.
```

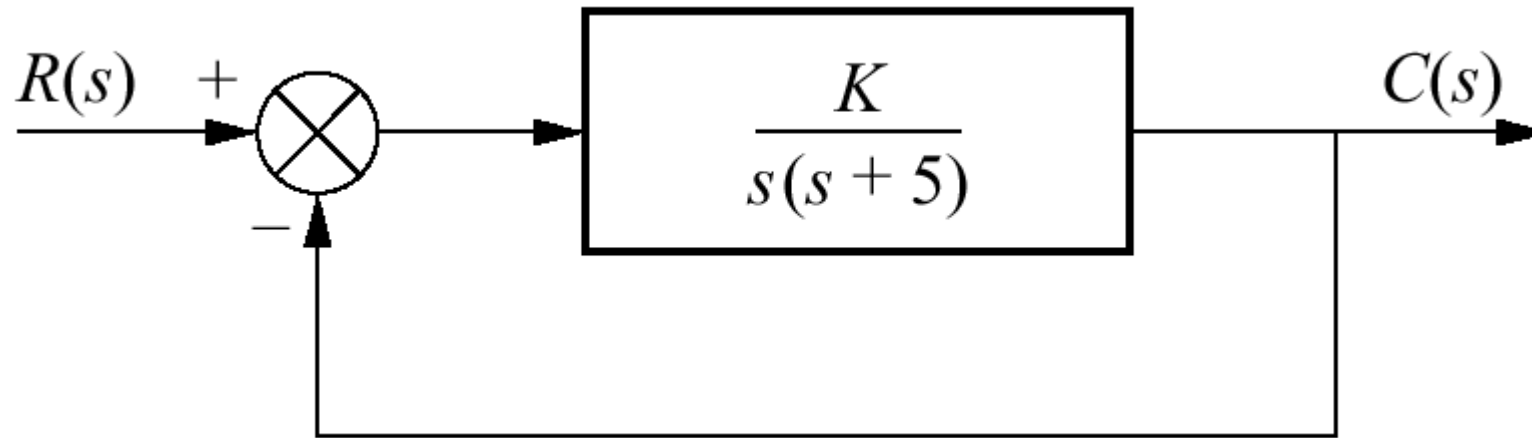
```
T =  
  
    25  
-----  
s^2 + 5 s + 25  
  
Continuous-time transfer function.
```

```
wn =  
  
    5  
  
z =  
  
    0.5000  
  
Ts =  
  
    1.6000  
  
Tp =  
  
    0.7255  
  
pos =  
  
    16.3034
```



Ejemplo 5.4 Diseño de ganancia para respuesta transitoria

- **Problema:** Diseñe el valor de ganancia, K , para el sistema de control realimentado de la figura 5.16 a fin de que el sistema responda con el 10% de sobrepaso.



■ Figura 5.16 Sistema realimentado para el ejemplo 5.4



- **Solución:** La función de transferencia en lazo cerrado del sistema es

$$T(s) = \frac{K}{s^2 + 5s + K} \quad (5.20)$$

- De la ecuación (5.20) $2\zeta\omega_n = 5$; (5.21)
- Y $\omega_n = \sqrt{K}$; (5.22)
- Entonces $\zeta = \frac{5}{2\sqrt{K}}$; (5.23)
- Un 10% de %OS implica que $\zeta = 0.591$ (de la ecuación 4.39).
- Al sustituir este valor en la ecuación 5.23 y al despejar K , tendremos $K = 17.9$



Ejercicio de evaluación de destreza 5.2

- **Problema:** Para un sistema de control realimentado unitariamente con una función de transferencia de trayectoria directa $G(s) = \frac{16}{s(s+a)}$, diseñe el valor de **a** para obtener una respuesta escalón en lazo cerrado que tenga el 5% de sobrepaso.
- **Respuesta:** $a=5.52$

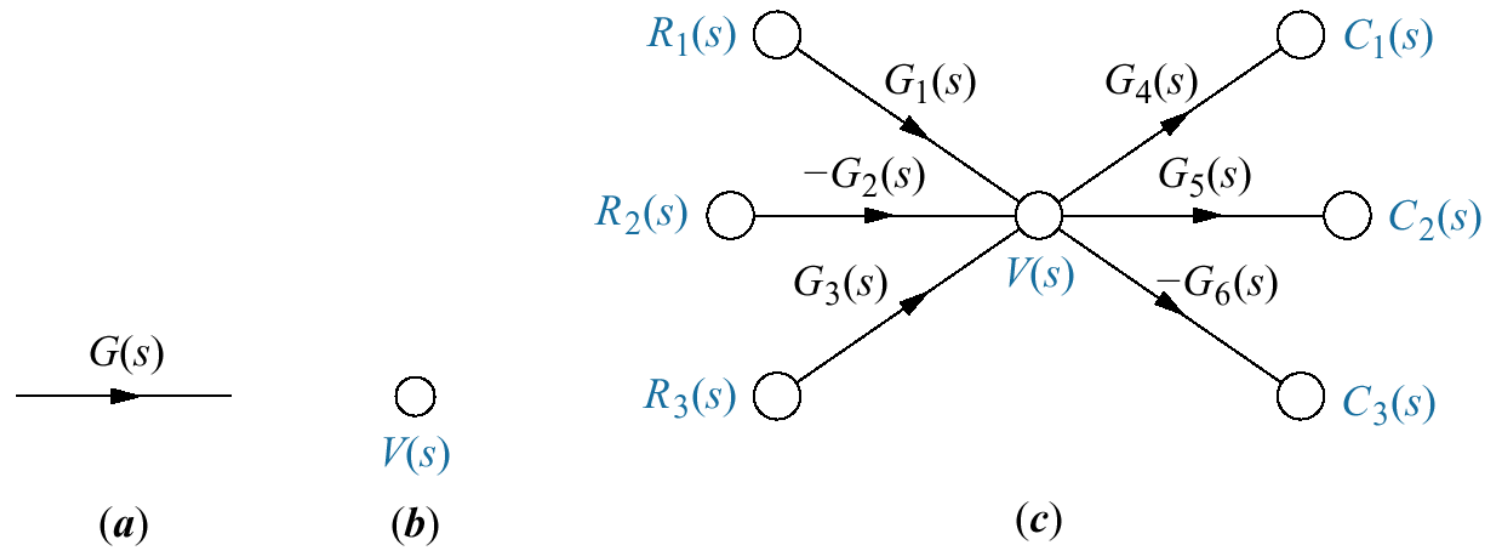


5.4 GRÁFICAS DE FLUJO DE SEÑALES

- La gráficas de flujo de señales son una alternativa a los diagramas de bloques.
- A diferencia de los diagramas de bloques, que están formados por bloques, señales, puntos de sumas y puntos de derivación, una **gráfica de flujo de señales** está formada sólo por **ramas** (que representan los sistemas) y **nodos** (que representan señales).



- Un sistema está representado por una línea con una flecha que muestra la dirección del flujo de las señales del sistema; adyacente a la línea escribimos la función de transferencia.
- Una señal es un nodo con el nombre de la señal escrito adyacente al nodo.



■ Figura 5.17 Componentes de la gráfica de flujo de señales:
a) sistema; b) señal; c) interconexión de sistemas y señales.



- La figura 5.17(c) muestra la interconexión de los sistemas y las señales.
- Cada señal es la suma de señales que entran al sistema.
- Por ejemplo:
 - La señal $V(s) = R_1(s)G_1(s) - R_2(s)G_2(s) + R_3(s)G_3(s)$.
 - La señal $C_2(s) = V(s)G_5(s) = R_1(s)G_1(s)G_5(s) - R_2(s)G_2(s)G_5(s) + R_3(s)G_3(s)G_5(s)$.
 - La señal $C_3(s) = -V(s)G_6(s) = -R_1(s)G_1(s)G_6(s) + R_2(s)G_2(s)G_6(s) - R_3(s)G_3(s)G_6(s)$.
- Nótese que al sumar señales negativas asociamos el signo negativo con el sistema y no con un punto de suma, como en el caso de diagramas de bloques.



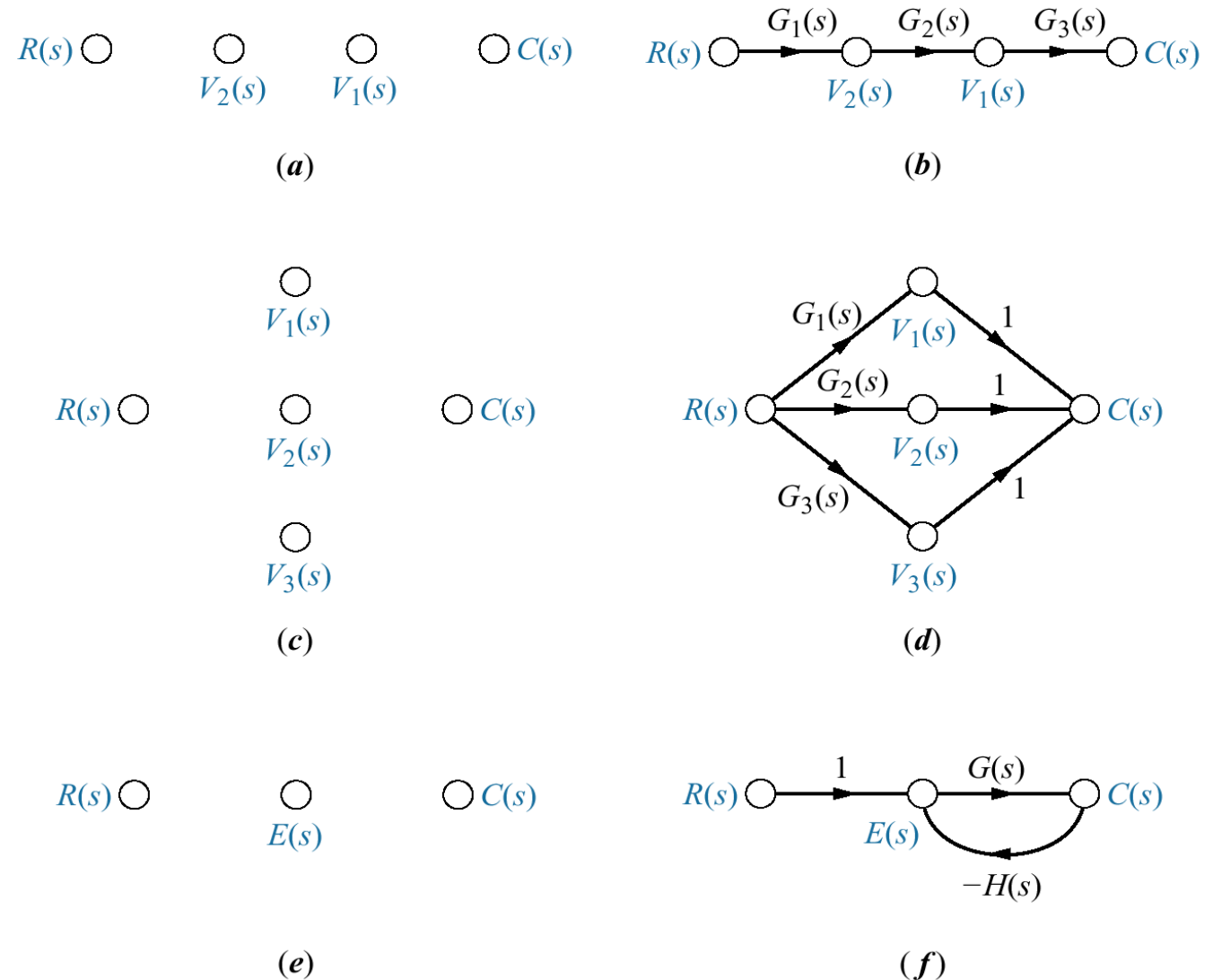
Ejemplo 5.5 Convertir diagramas de bloques comunes en gráficas de flujo de señales

- **Problema:** Convierta las formas en cascada, en paralelo, y realimentada de los diagramas de bloques que se muestran en las figuras 5.3 (a), 5.5(a), y 5.6(b), respectivamente, en gráficas de flujo de señales.



Solución:

- En cada caso empezamos por dibujar los **nodos** de señal para ese sistema.
- A continuación, interconectamos los nodos de señal con las ramas del sistema.

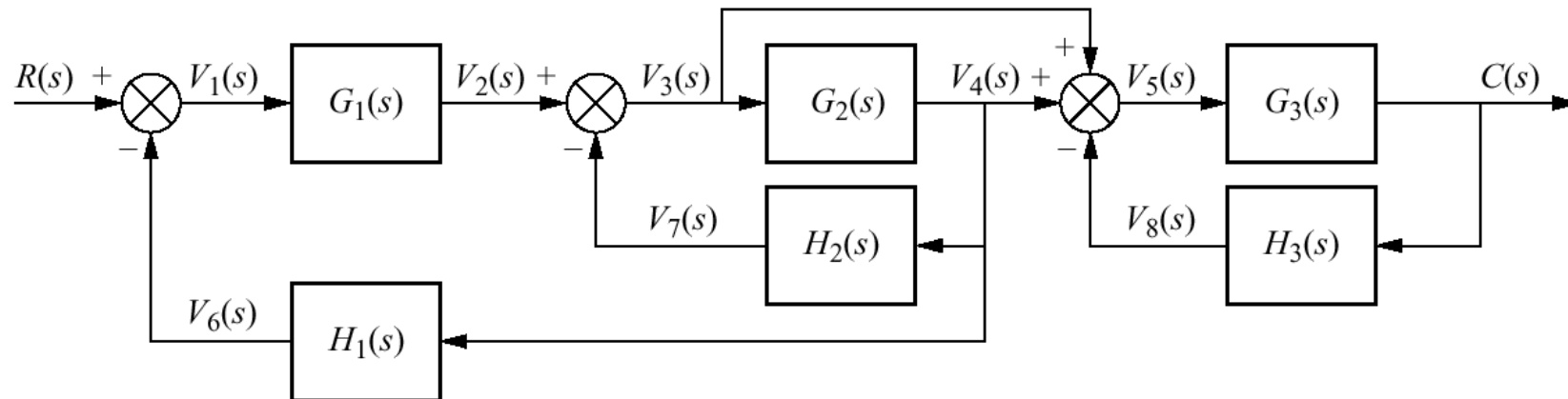


- Figura 5.18 Construcción de gráficas de flujo de señales: a) nodos de sistema en cascada; b) gráfica de flujo de un sistema en cascada; c) nodos de un sistema en paralelo; d) gráfica de flujo de un sistema en paralelo; e) nodos de un sistema realimentado; f) gráfica de flujo de un sistema realimentado.



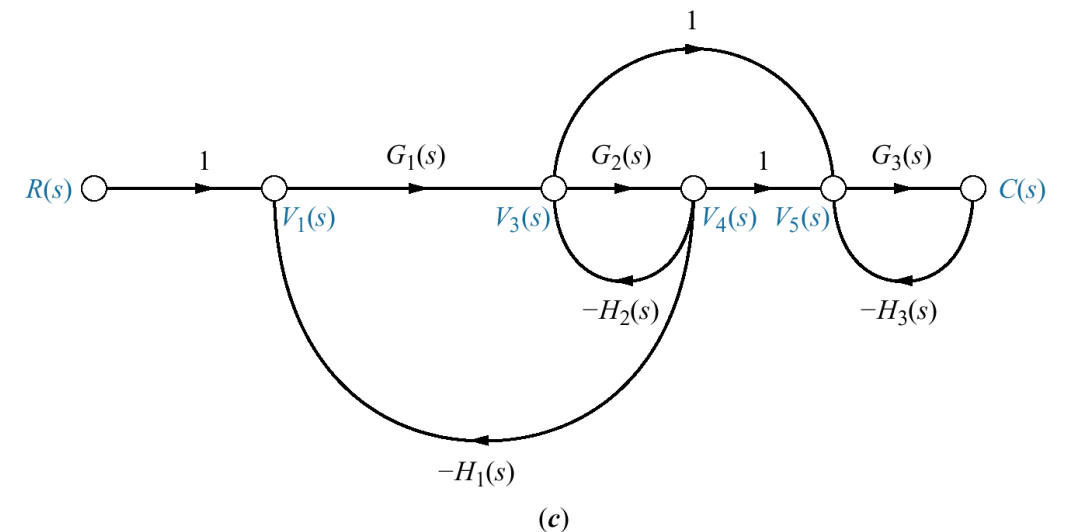
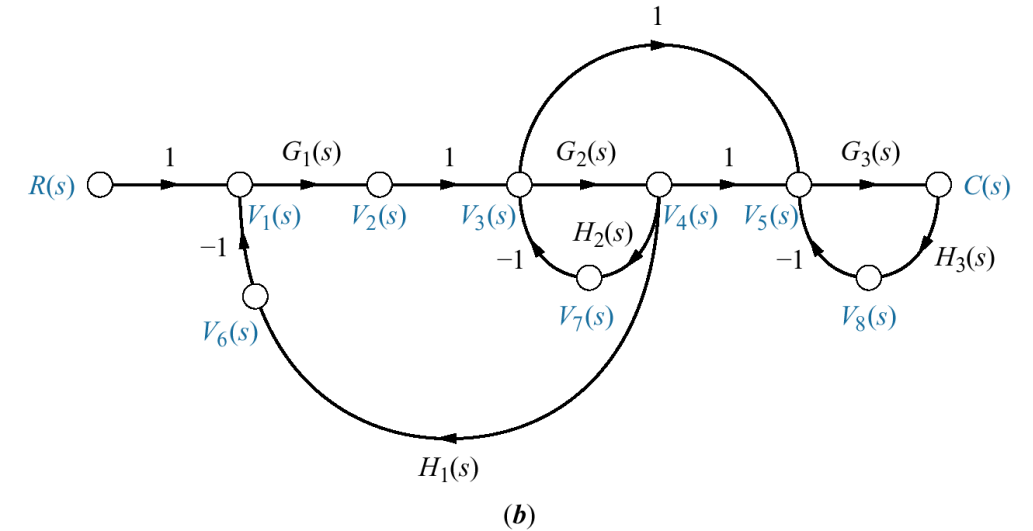
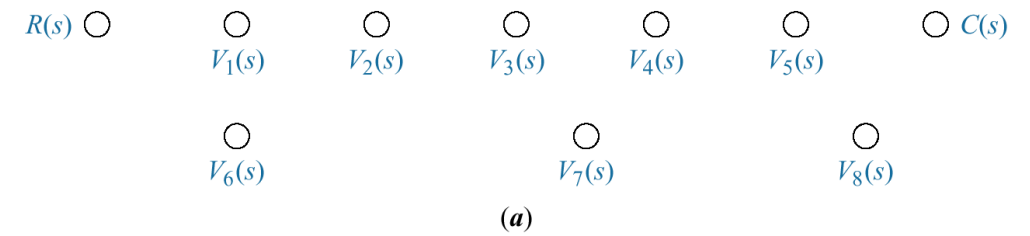
Ejemplo 5.6 Convertir un diagrama de bloques en una gráfica de flujo de señales.

- **Problema:** Convierta el diagrama de bloques de la figura 5.11 en una gráfica de flujo de señales.



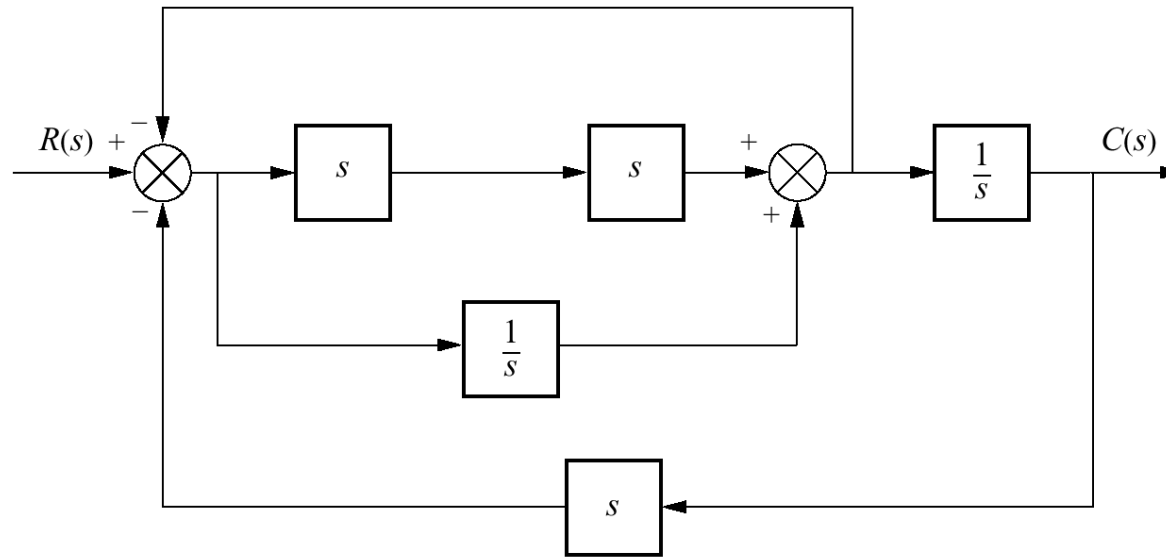
Solución:

- Empiece por dibujar los nodos de señal, como se ve en la figura 5.19(a).
- A continuación, interconecte los nodos, mostrando la dirección del flujo de señales e identificando cada función de transferencia.
- Se muestra el resultado en la figura 5.19(b).
- Por último, si se desea simplifique la gráfica de flujo de señales a la que se ve en la figura 5.19(c) al eliminar las señales que tienen un flujo en una entrada y un solo flujo de salida, como es el caso de $V_2(s)$, $V_6(s)$, $V_7(s)$ y $V_8(s)$.



Ejercicio de evaluación de destreza 5.3

- **Problema:** Convierta el diagrama de bloques de la figura 5.13 en una gráfica de flujo de señales.



- **Respuesta:** La solución completa esta en el CD-ROM anexo al libro.



5.5 REGLA DE MASON

- La técnica de reducción de diagramas de bloques que estudiamos en la sección 5.2 requiere de la aplicación sucesiva de relaciones fundamentales para llegar a la función de transferencia del sistema.
- Por otra parte, la regla de Mason para reducir una gráfica de flujo requiere la aplicación de una fórmula.
- En general, puede ser complicado poner en práctica la fórmula sin cometer errores.
- Específicamente, la existencia de lo que más adelante llamaremos **mallas que no se tocan** aumenta la complejidad de la fórmula.



- Sin embargo, numerosos sistemas no tienen mallas que no se tocan.
- Para estos sistemas, es posible que el estudiante encuentre que la regla de Mason es más fácil de usar que la reducción de diagramas de bloques.
- La fórmula de Mason tiene varios componentes que deben evaluarse.
- Primero, se debe estar seguro de que la definiciones de los componentes se entienden bien y a continuación se debe tener cuidado al evaluar los componentes, para lo cual se estudian algunas definiciones básicas aplicables a la gráficas de flujo de señales.



DEFINICIONES (REGLA DE MASON)

➤ **Ganancia de malla:**

- Es el producto de ganancias de rama encontrado al recorrer una trayectoria que empieza en un nodo y termina en el mismo nodo sin pasar por ningún otro nodo más de una vez, y siguiendo la dirección del flujo de señales.
- Para ejemplos de ganancias de malla, vea la figura 5.20. Hay cuatro ganancias de malla.

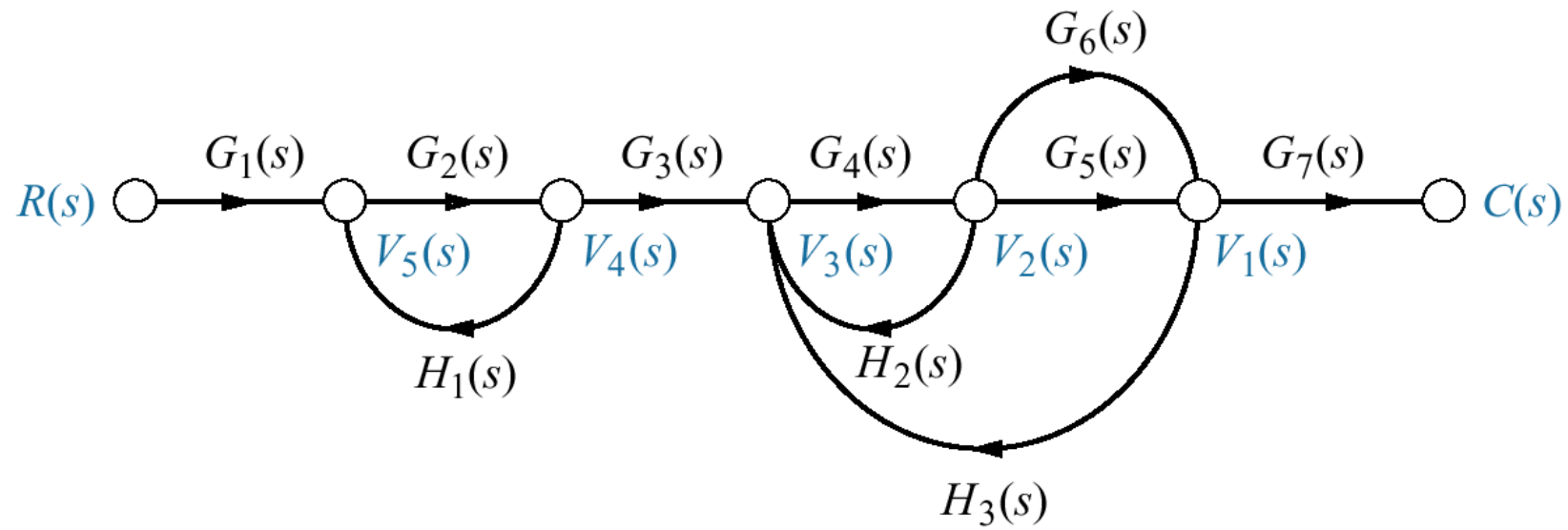
1. $G_2(s)H_1(s) ; (5.25a)$

2. $G_4(s)H_2(s) ; (5.25b)$

3. $G_4(s)G_5(s)H_3(s) ; (5.25c)$

4. $G_4(s)G_6(s)H_3(s) ; (5.25d)$





■ Figura 5.20 Gráfica de flujo de señales para demostrar la regla de mason



➤ **Ganancia de trayectoria directa:**

- Es el producto de ganancias encontrado al recorrer una trayectoria el nodo de entrada al nodo de salida, de la gráfica de flujo de señales, en dirección del flujo de señales.
- En la figura 5.20 se ven ejemplos de ganancias de trayectoria directa. Hay dos ganancias de trayectoria directa.

1. $G_1(s)G_2(s)G_3(s)G_4(s)G_5(s)G_7(s)$; (5.26a)

2. $G_1(s)G_2(s)G_3(s)G_4(s)G_6(s)G_7(s)$; (5.26b)



➤ **Mallas que no se tocan:**

- Son lazos que no tienen nodos en común.
- En la figura 5.20, el lazo $G_2(s)H_1(s)$ no toca a los lazos $G_4(s)H_2(s)$, $G_4(s)G_5(s)H_3(s)$, y $G_4(s)G_6(s)H_3(s)$.

➤ **Ganancia de mallas que no se tocan:**

- Es el producto de ganancias de mallas a partir de las que no se tocan tomadas a la vez dos (mallas dobles), tres (mallas triples), cuatro (mallas cuádruples), etc.
- Las tres ganancias de mallas que o se tocan, tomadas a la vez dos, son las siguientes:

1. $[G_2(s)H_1(s)][G_4(s)H_2(s)] ;$ (5.27a)

2. $[G_2(s)H_1(s)][G_4(s)G_5(s)H_3(s)] ;$ (5.27b)

3. $[G_2(s)H_1(s)][G_4(s)G_6(s)H_3(s)] ;$ (5.27c)



➤ Regla de Mason:

- La función de transferencia, $C(s)/R(s)$, de un sistema representado por una gráfica de flujo de señales es

$$G(s) = \frac{C(s)}{R(s)} = \frac{\sum_k T_k \Delta_k}{\Delta} \quad (5.28)$$

- Donde

k = número de trayectorias directas

T_k = k -ésima ganancia de trayectoria directa

Δ = $1 - \Sigma$ ganancias de mallas simples + Σ ganancia de mallas dobles - Σ ganancias de mallas triples + Σ ganancias de mallas cuádruples - ...

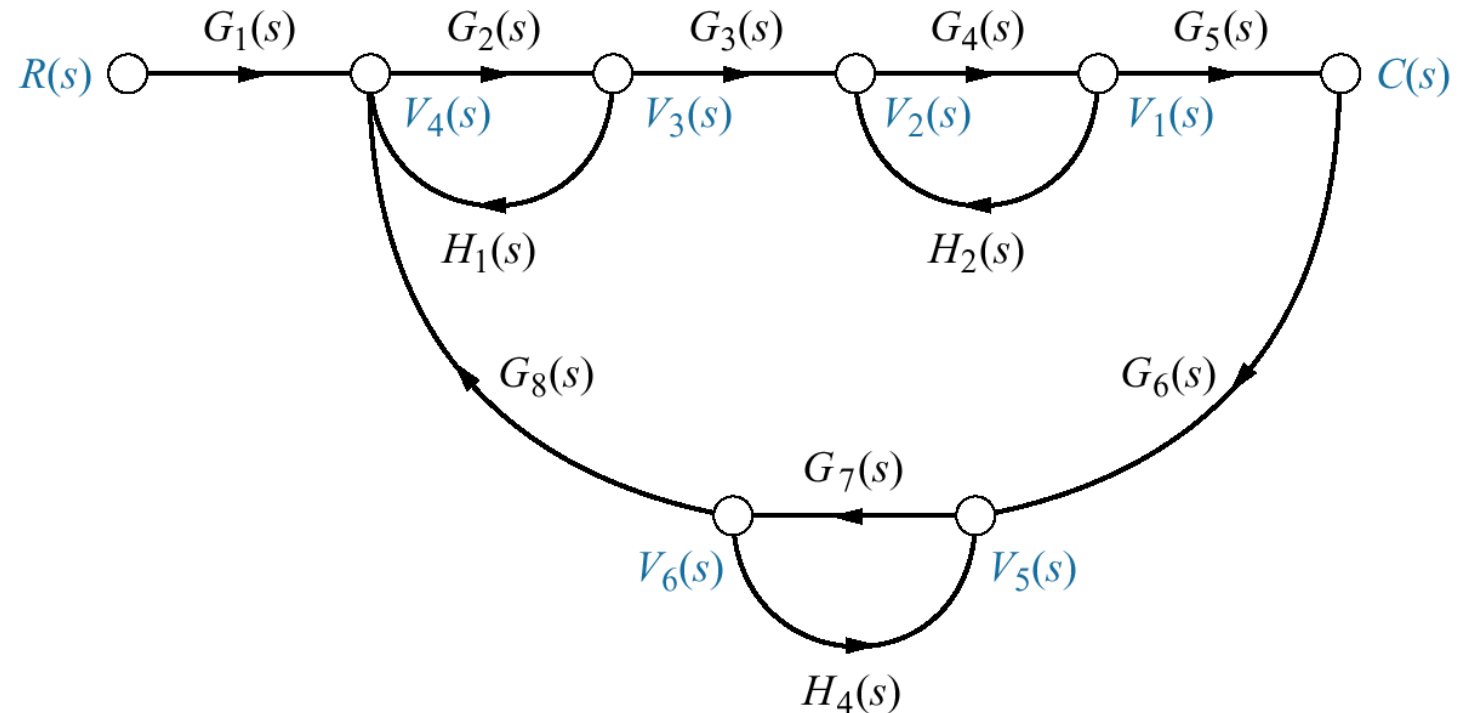
Δ_k = $\Delta - \Sigma$ términos de ganancia de malla Δ que tocan la k -ésima trayectoria directa.

- En otras palabras, Δ_k se forma al eliminar de Δ las ganancias de malla que tocan la k -ésima trayectoria directa.
- Nótense los signos alternados para los componentes de Δ .



Ejemplo 5.7 Función de transferencia por medio de regla de Mason.

- **Problema:** Encuentre la función de transferencia, $C(s)/R(s)$, para la gráfica de flujo de señales de la figura 5.21.



- Figura 5.21 Gráfica de flujo de señales para el ejemplo 5.7.



■ **Solución:**

➤ **Primero**, identificamos las **ganancias de trayectoria directa**. En este ejemplo solo hay una:

$$G_1(s)G_2(s)G_3(s)G_4(s)G_5(s) ; \quad (5.29)$$

➤ **Segundo**, identificamos las **ganancias de malla**. Hay cuatro como sigue:

1. $G_2(s)H_1(s) ;$ (5.30a)

2. $G_4(s)H_2(s) ;$ (5.30b)

3. $G_7(s)H_4(s) ;$ (5.30c)

4. $G_2(s)G_3(s)G_4(s)G_5(s)G_6(s)G_7(s)G_8(s);$ (5.30d)



➤ **Tercero**, identificamos las **mallas dobles**. De las ecuaciones (5.30) y de la figura 5.21, podemos ver que la malla 1 no toca la malla 2, la malla 1 no toca la malla 3, y la malla 2 no toca la malla 3.

■ Nótese que las mallas 1,2 y 3 tocan todas ellas a la malla 4. Entonces, las combinaciones de mallas dobles son como sigue:

$$\text{malla 1 y malla 2: } G_2(s)H_1(s)G_4(s)H_2(s) \quad ; (5.31a)$$

$$\text{malla 1 y malla 3: } G_2(s)H_1(s)G_7(s)H_4(s) \quad ; (5.31b)$$

$$\text{malla 2 y malla 3: } G_4(s)H_2(s)G_7(s)H_4(s) \quad ; (5.31b)$$

➤ **Cuarto**, las **mallas triples** son como sigue:

$$\text{mallas 1,2 y 3: } G_2(s)H_1(s)G_4(s)H_2(s) G_7(s)H_4(s) ; (5.32)$$



- Ahora, de la ecuación (5.28) y sus definiciones, formamos Δ y Δ_k . Por lo tanto,

$$\begin{aligned}\Delta = 1 & - [G_2(s)H_1(s) + G_4(s)H_2(s) + G_7(s)H_4(s) \\ & + G_2(s)G_3(s)G_4(s)G_5(s)G_6(s)G_7(s)G_8(s)] \\ & + [G_2(s)H_1(s)G_4(s)H_2(s) + G_2(s)H_1(s)G_7(s)H_4(s) \\ & + G_4(s)H_2(s)G_7(s)H_4(s)] \\ & - [G_2(s)H_1(s)G_4(s)H_2(s)G_7(s)H_4(s)]\end{aligned}\quad (5.33)$$

- Formamos Δ_k al eliminar de Δ las ganancias de malla que tocan la k -ésima trayectoria directa

$$\Delta_1 = 1 - G_7(s)H_4(s) \quad (5.34)$$

- Se sustituyen las expresiones (5.29), (5.33) y (5.34) ahora en la ecuación (5.28), obteniendo así la función de transferencia:

$$G(s) = \frac{T_1 \Delta_1}{\Delta} = \frac{[G_1(s)G_2(s)G_3(s)G_4(s)G_5(s)][1 - G_7(s)H_4(s)]}{\Delta} \quad (5.35)$$



Ejercicio de evaluación de destreza 5.4

- **Problema:** Utilice la regla de Mason para hallar la función de transferencia del diagrama de flujo de señales que se muestra en la figura 5.19(c). Nótese que éste es el mismo sistema empleado en el ejemplo 5.2 para hallar la función de transferencia por medio de reducción de diagrama de bloques.

- **Respuesta:**

$$T(s) = \frac{G_1(s)G_3(s)[1 + G_2(s)]}{[1 + G_2(s)H_2(s) + G_1(s)G_2(s)H_1(s)][1 + G_1(s)H_3(s)]}$$



BIBLIOGRAFÍA

- Nise, N.(2004).Sistema de control para ingeniería. México D.F.: CECSA.

