

estime las temperaturas del proceso, permitiendo así determinar el correcto funcionamiento de los equipos de medición de temperatura.

3.2 DESCRIPCION BASICA DE UN EXTRUSOR

La parte básica de un extrusor es un husillo o tornillo que gira dentro de un barril o cilindro, y es capaz de bombear (empujar) un material, bajo ciertas condiciones de operación a una velocidad específica. Los materiales utilizados en el proceso de extrusión son por lo general, termoplásticos. Estos materiales se suavizan cuando se calientan y se transforman en fluidos, que posteriormente se solidifican cuando se enfrían.

Cuando un material termoplástico se alimenta al extrusor, el husillo lo empuja hacia delante a lo largo del barril, donde existe un proceso de calentamiento mediante resistencias y se transforma en fluido. Este fluido continúa y al final, se le hace pasar a través de un dado que da el perfil o la forma final deseada. Una vez que sale del dado, el fluido es enfriado rápidamente para mantener la forma. Este dado puede considerarse como una resistencia al flujo. Entre más largo y pequeño sea el orificio de paso, mayor será la potencia necesaria para empujar el material fundido a través del dado. La Fig. 3.1 muestra un diagrama típico de un extrusor, donde se señalan las partes principales.

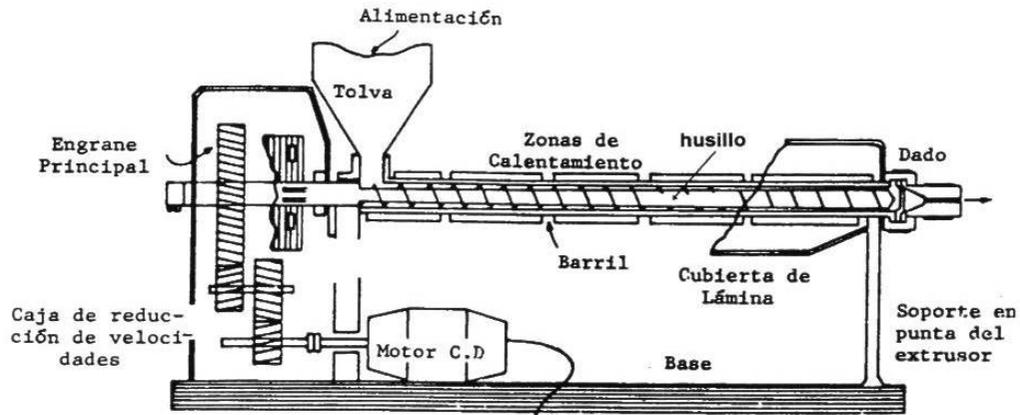


Fig. 3.1. Diagrama esquemático de un extrusor.

La Fig. 3.2 presenta un diagrama en dos dimensiones de un sistema husillo-barril; las variables implicadas en este sistema son:

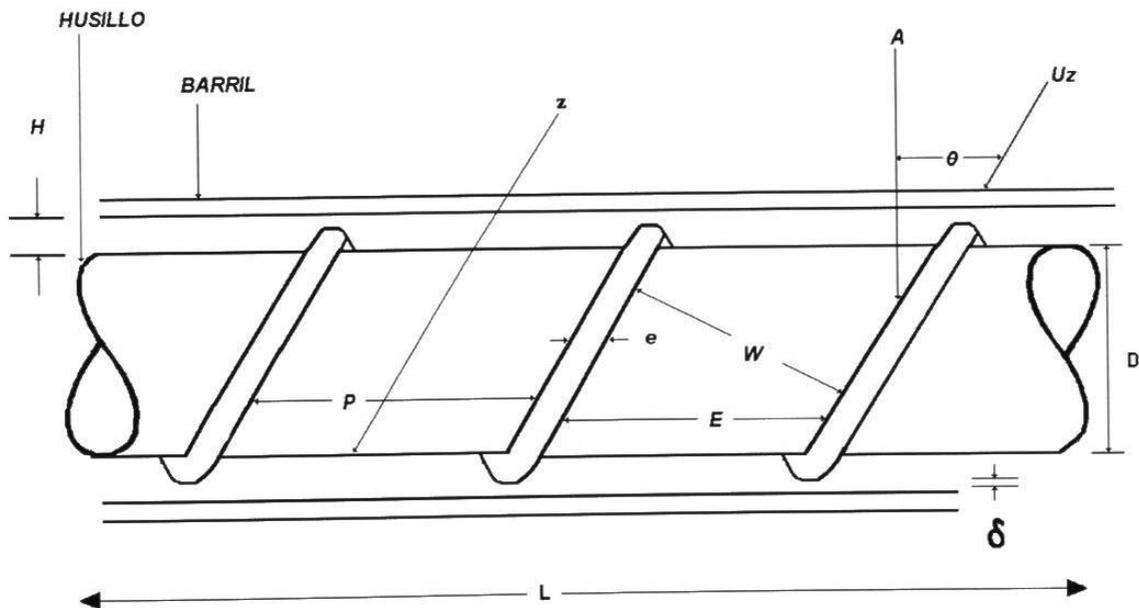


Fig. 3.2. Sistema husillo-barril.

H = Profundidad del canal del Husillo (cm)

w = Ancho del canal del Husillo (cm)

D = Diámetro del barril (cm)

L = Longitud del husillo (cm)

Z = Longitud del canal del husillo

E = Longitud (axial) entre dos hélices del husillo (cm)

e = espesor del hélice del husillo (cm)

P = Longitud de campo (cm) ($P=E+e/\cos\theta$)

θ = Angulo entre la hélice y la dirección perpendicular al husillo (grados)

δ = Separación entre la hélice y el barril (cm)

U_z = Velocidad máxima del fluido en dirección del canal (cm/seg)

3.3 DESCRIPCION DEL PROCESO DE EXTRUSION DE PLASTICOS

La sección del husillo y barril en un extrusor tienen cuatro funciones principales que son calentar, fundir, mezclar y presurizar, en general, el proceso completo se divide en tres zonas:

Zona de alimentación.

Zona de compresión.

Zona de dosificación

La función de la zona de alimentación es coleccionar los gránulos de la tolva y transportarlos hacia adelante en el canal del husillo. En la zona de compresión, como su nombre lo indica, se genera una compresión en los gránulos para forzar el aire contenido hacia atrás. La función de la zona de dosificación es hacer que la masa de plástico fundido alcance la consistencia y presión requerida para extrusión.

Para un transporte (bombeo) eficiente, los gránulos deben adherirse a la pared del barril y mostrar un alto grado de deslizamiento en la pared del canal del husillo. Para

La relación entre el volumen de la primera vuelta del canal del husillo (al lado de la tolva) y el volumen de la última vuelta (al lado del dado) se conoce como la relación de compresión. En máquinas comerciales ese valor varía por lo general desde 2:1 hasta 4:1 (una manera aproximada de medir la relación de compresión es tomar la relación entre la profundidad del canal del husillo en la primera vuelta y la profundidad del canal en la última vuelta). En la zona de dosificación, la masa del polímero fundido alcanza la consistencia correcta y la presión requerida para extrusión. Esta masa debe ser bombeada hacia el dado a una presión constante, y la consistencia también debe permanecer constante. Así, la función de la zona de dosificación es hacer que la masa de plástico fundido alcance la consistencia y presión requeridas para extrusión. En esta zona se requiere de una presión relativamente alta para obtener un mejor mezclado del material y obtener así propiedades constantes en el producto. Este incremento en la presión se obtiene al imponer restricciones al flujo del plástico fundido, ya sea en la zona de dosificación del husillo o en el cabezal. Esto también se logra al aumentar la viscosidad del plástico (disminuir la temperatura).

Al final de la zona de dosificación es común tener un filtro (Fig. 3.4), el cual consiste en un disco con perforaciones, que hace las funciones de una coladera. Las funciones de este filtro son las siguientes:

- a) Aumentar la presión.
- b) Transformar el flujo de rotación del plástico fundido, procedente de la zona de dosificación del husillo, en flujo lineal, paralelo al eje del husillo.
- c) Detener impurezas y material no plastificado.

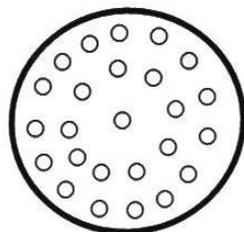


Fig. 3.4. Filtro.

Los husillos deben tener la longitud y el diámetro suficientes para poder acomodar las zonas de alimentación, compresión y dosificación de modo que la masa de plástico fundido se encuentre en las condiciones requeridas para su extrusión a través del dado. Sin embargo, otras dimensiones del husillo tales como el ángulo de la hélice, la profundidad y el ancho del canal, también son importantes.

La relación longitud/diámetro se utiliza para determinar la facilidad con que se alcanza la plastificación (asumiendo siempre que a mayor L/D, mayor facilidad de plastificación); por ejemplo, un husillo con una relación L/D de 10/1, y con D igual a 15 cm, plastificará más fácilmente que un husillo con una relación L/D de 20/1, pero con D igual a 2 cm. A pesar de lo anterior sin embargo, debe notarse que la mayoría de los extrusores para plásticos tienen una relación L/D entre 15/1 y 25/1.

Para fundir los gránulos, se genera calor internamente por fricción o se aplica calor del exterior por medio de calentadores eléctricos (colocados alrededor del barril). Para esto, se necesita un control de la cantidad de calor que se aplica, ya que si el material se calienta demasiado se puede degradar o hacerse demasiado fluido. Por otro lado, si el material se enfría demasiado, la plastificación será insuficiente. Esto da lugar a que las variaciones en temperatura produzcan además variaciones en flujo de salida, lo cual es indeseable. Normalmente se tiene de dos a seis zonas de calentamiento a lo largo del barril y el dado.

La salida de material de un extrusor depende de las dimensiones del husillo, de las dimensiones del dado, y de la velocidad de rotación del husillo [3]. Asimismo, la salida del material también depende de la relación entre la viscosidad en el dado comparada con la viscosidad en el barril, es decir:

$\eta_{\text{dado}} < \eta_{\text{barril}} \longrightarrow$ aumento en la salida

La experiencia indica que la salida de material de un extrusor depende también de la forma en que el material plástico se alimenta a la tolva. En la mayoría de las circunstancias, se encuentra que entre mas cerca estén las partículas de tener una forma esférica de alrededor de 3 milímetros de diámetro, mayor será la salida. Algunos materiales tienden a producir gases volátiles durante la extrusión. Esto causa que los materiales presenten burbujas o porosidad. Esto se puede reducir utilizando un husillo con una zona de descompresión, como se muestra en la Fig. 3.5.

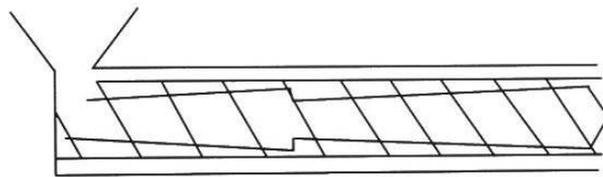


Fig. 3.5. Husillo con zona de descompresión.

Las variaciones de temperatura a lo largo del extrusor afectan directamente la viscosidad del material fundido, y por lo tanto se tendrán variaciones de flujo de material en el dado, reflejando inconsistencia en la salida del proceso. Es de suma importancia mantener controlada la temperatura en las zonas de calentamiento en el extrusor para evitar estas variaciones de viscosidad, esto se logra con controladores de temperatura instalados en cada una de las zonas. De aquí se desprende la importancia de tener una medición confiable de temperatura por parte de los equipos de medición.

En este caso el extrusor se está controlando en su totalidad con un sistema de control distribuido. Las cinco zonas de calentamiento se encuentran controlando la temperatura en modo de control PID. El actuador que se utiliza en este caso son thristores, que regulan el voltaje en las resistencias de las zonas de calentamiento. Cada una de las zonas cuenta con gráfica de tendencias.

En general, las variaciones de temperatura en un extrusor nos afecta en los siguientes aspectos:

- Variación de viscosidad en el material fundido.
- Variación en el flujo de material a la salida del extrusor.
- Variación de presión en el extrusor.
- Calidad en el proceso de extrusión.

3.4 MODELO MATEMATICO

El modelo matemático utilizado para el estudio del proceso de extrusión de plásticos está basado en un balance de energía macroscópica en cada una de las cinco zonas del barril. Para el desarrollo de este modelo, el barril fue subdividido en cinco subsistemas, cada uno correspondiendo a cinco diferentes zonas de calentamiento y, consecuentemente, con una longitud específica. El sensor RTD (descrito en el capítulo 2) mide la temperatura de las zonas de calentamiento de cada subsistema. En la Fig. 3.6 se muestra la localización, y en la Fig. 3.7 la contribución del análisis térmico en el subsistema n , donde:

$q1$ = calor de los elementos calefactores

$q2$ = calor del subsistema " $i + 1$ "

$q3$ = calor hacia el subsistema " $i - 1$ "

$q4$ = radiación y calor por convección

$q5$ = calor hacia el polímero y el tornillo

$T_{b,i+1}$ = temperatura de barril en el subsistema " i "

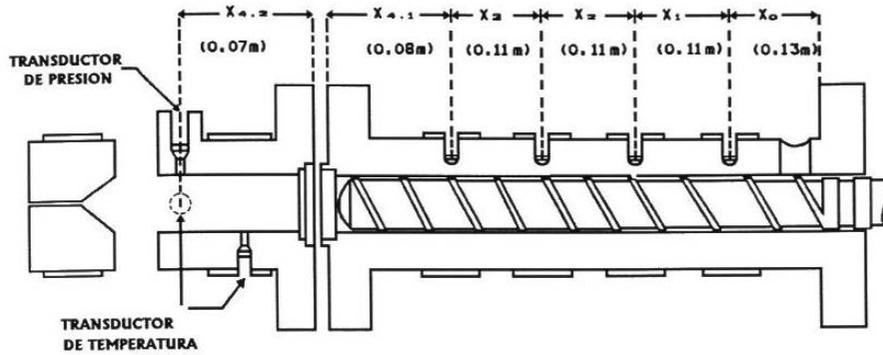


Fig. 3.6. Localización de las 5 zonas de calentamiento en el extrusor.

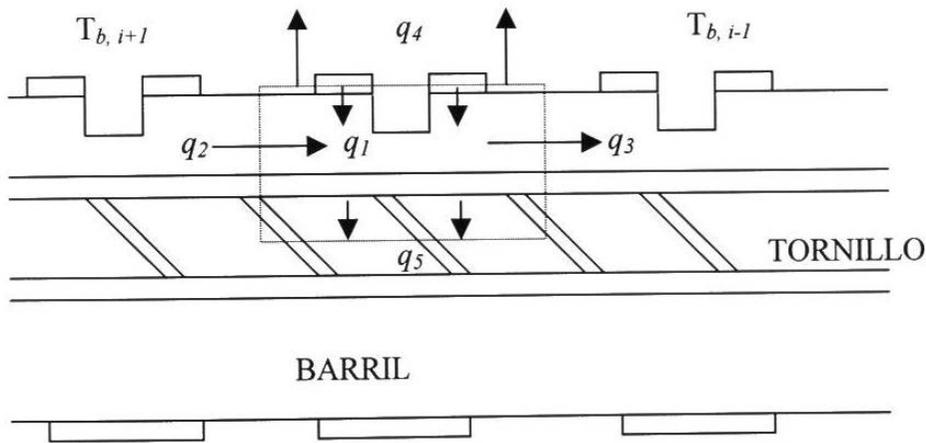


Fig. 3.7. Contribución térmica en el subsistema.

En condición transitoria el balance de calentamiento para el subsistema n es:

$$\frac{dE_b}{dt} + \frac{dE_v}{dt} = q_1 + q_2 - (q_3 + q_4 + q_5) \quad (3.1)$$

donde (dE_b/dt) y (dE_v/dt) son variaciones en el tiempo de la energía térmica del tornillo y barril. En esta ecuación, los cambios térmicos del polímero no son considerados por que son prácticamente despreciables por la variación mínima que en este caso se tiene. En estado estable, el lado izquierdo de (3.1) es cero; a continuación se indican las diferentes contribuciones térmicas para este modelo:

$$q_1 = W * \% \text{ calentamiento} \quad (3.2)$$

$$q_2 = \frac{K_b A_b (T_{b,j+1} - T_{b,j})}{x}$$

$$q_3 = \frac{K_b A_b (T_{b,j} - T_{b,j-1})}{x}$$

$$q_4 = h_a A_a (T_b - T_a) + \sigma A_a (T_b^4 - T_a^4)$$

$$q_5 = h_p A_p (T_b - T_p)$$

$$\frac{dE_b}{dt} = m_b CP_b \frac{dT_b}{dt}$$

$$\frac{dE_v}{dt} = m_b CP_v \frac{dT_v}{dt}$$

donde:

W	máxima potencia eléctrica de calentamiento
<i>% calentamiento</i>	porcentaje de calentamiento
K_b	conductividad térmica del barril
A_a, A_b, A_p	superficie de calentamiento barril-aire, barril-barril y barril-polímero
x	longitud del subsistema
h_a, h_p	coeficiente de transferencia de calor barril-aire y barril-polímero
σ	constante de Stefan-Boltzmann
m_b, m_v	masa del tornillo y barril
CP_b, CP_v	calor específico del tornillo y barril
T_a, T_p, T_v, T_b	temperatura del aire, del polímero, del tornillo y del barril

Sustituyendo (3.2) en (3.1) se tiene:

$$\frac{dT_{b,i}}{dt} = P * \%calentamiento + K_2(T_{b,i+1} - T_{b,i}) - [K_1(T_{b,i+1} - T_{b,i}) + H_{a,i}(T_{b,i} - T_a) + S(T_{b,i}^4 - T_a^4) + H_{p,i}(T_{b,i} - T_{p,i})] \quad (3.3)$$

donde:

$$P = W/R \quad , \quad K_1 = K_2 = K_b A_b / xR \quad , \quad H_a = h_a A_a / R \quad , \quad H_p = A_p / R \quad (3.4)$$

$$S = \sigma A_a / R \quad , \quad R = (m_b + m_v) CP_b$$

Se asume que la temperatura del tornillo sigue a la temperatura del barril que se observa en (3.3). Por lo tanto, el tornillo y el barril son considerados como dos sistemas paralelos con la misma temperatura, pero diferentes propiedades térmicas. Expresando (3.3) en variables de desviación:

$$\frac{d\tau_{b,i}}{dt} = PH\% + K_2(\tau_{b,i+1} - \tau_{b,i}) - K_1(\tau_{b,i} - \tau_{b,i-1}) - H_{p,i}(\tau_{b,i} - \tau_{p,i}) - S[(\tau_{b,i} + TBK)^4 - (\tau_{a,i} + TAK)^4 - (\tau_{a,i} + TBK^4 - TAK^4)] \quad (3.5)$$

con

$$\tau_b = T_b - T_{b,s} \quad , \quad H\% = \%calentamiento - \%calentamiento_s \quad , \quad \tau_a = T_a - T_{a,s}$$

$$\tau_p = T_b - T_{b,s} \quad , \quad TBK = T_{b,s} (K) \quad , \quad TAK = T_{a,s} (K) \quad (3.6)$$

donde el subíndice "s" se refiere al valor en estado estable. Modificando (3.5):

$$\frac{d\tau_{b,i}}{dt} = K_1\tau_{b,i-1} + C_i\tau_{b,i} + K_2\tau_{b,i+1} + H_{p,i}\tau_{p,i} + H_{a,i}\tau_{a,i} + PH\% - S[(\tau_{b,i} + TBK)^4 - (\tau_{a,i} + TAK)^4 - (\tau_{a,i} + TBK^4 - TAK^4)] \quad (3.7)$$

$$C_i = -(K_1 + K_2 + H_{a,i} + H_{p,i})$$

Si se desprecia la variación en la temperatura ambiente, entonces tenemos:

$$\tau_{a,i} = 0$$

y finalmente:

$$\dot{\tau}_{b,i} = \frac{d\tau_{b,i}}{dt} = K_1\tau_{b,i-1} + C_i\tau_{b,i} + K_2\tau_{b,i+1} + H_{p,i}\tau_{p,i} + PH\% - S[(\tau_{b,i} + TBK)^4 - TAK^4] \quad (3.8)$$

Esta ecuación representa el balance térmico en un subsistema "i". En forma matricial los cinco subsistemas están presentados como:

$$\begin{bmatrix} \dot{\tau}_{b,1} \\ \dot{\tau}_{b,2} \\ \dot{\tau}_{b,3} \\ \dot{\tau}_{b,4} \\ \dot{\tau}_{b,5} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_1 & K_{12} & 0 & 0 & 0 \\ K_{12} & C_2 & K_{23} & 0 & 0 \\ 0 & K_{23} & C_3 & K_{34} & 0 \\ 0 & 0 & K_{34} & C_4 & K_{45} \\ 0 & 0 & 0 & K_{45} & C_5 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tau_{b,1} \\ \tau_{b,2} \\ \tau_{b,3} \\ \tau_{b,4} \\ \tau_{b,5} \end{bmatrix} - S \begin{bmatrix} F\tau_{b,1} \\ F\tau_{b,2} \\ F\tau_{b,3} \\ F\tau_{b,4} \\ F\tau_{b,5} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} P_1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & P_2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & P_3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & P_4 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & P_5 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} H\%_1 \\ H\%_2 \\ H\%_3 \\ H\%_4 \\ H\%_5 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} H_{p,1} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & H_{p,2} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & H_{p,3} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & H_{p,4} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & H_{p,5} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tau_{p,1} \\ \tau_{p,2} \\ \tau_{p,3} \\ \tau_{p,4} \\ \tau_{p,5} \end{bmatrix} \quad (3.9)$$

$$F\tau_{b,1} = (\tau_{b,1} + TBK)^4 - TBK^4$$

Es necesario remarcar que en esta representación del perfil de las temperaturas, $T_{p,i}$ y el coeficiente de transferencia de calor del barril-polímero $h_{p,i}$ no son parámetros directamente medibles del modelo.

3.5 CONCLUSIONES DEL CAPITULO

El proceso de extrusión es uno de los más importantes en la industria de transformación de plásticos. Entre los productos que se pueden manufacturar se encuentran: tubería, manguera, fibras, película y un número ilimitado de productos.

En general, las variaciones de temperatura a lo largo del extrusor afectan directamente las propiedades del proceso, es decir, se tendría una calidad inconsistente en el producto; por esta razón es de suma importancia mantener controlada la temperatura en cada una de las zonas de calentamiento del extrusor, lo cual requiere una medición confiable de temperatura. Estas variaciones de temperatura se deben principalmente a las variaciones en: la viscosidad en el material fundido, el flujo de material a la salida del extrusor, la presión en el extrusor y la calidad en el proceso de extrusión.

El balance macroscópico de energía de cada una de las zonas de calentamiento del barril permite la formulación de un modelo matemático del proceso de extrusión. Se describió el modelo matemático de un extrusor con cinco zonas de calentamiento, el cual será utilizado para el diseño de un observador de estado que estime las temperaturas del proceso, permitiendo así determinar el correcto funcionamiento de los equipos de medición de temperatura.

El modelo descrito consta de cinco ecuaciones diferenciales que caracterizan el comportamiento de las temperaturas en cada zona del proceso. En este modelo no se considera la temperatura ambiente donde se encuentra localizado el extrusor y también se desprecian las variaciones de temperatura del producto que se alimenta al extrusor; sin embargo, estas simplificaciones no afectan la validez del modelo, ya que las temperaturas normales de operación de estos equipos son mucho mayores que la temperatura ambiente.

CAPITULO 4

OBSERVADORES DE ESTADO

4.1 INTRODUCCION

En la sección 4.2 de este capítulo se presentarán dos conceptos fundamentales de los sistemas de control: controlabilidad y observabilidad. La controlabilidad se ocupa del problema de poder dirigir un sistema de un estado inicial dado, a un estado arbitrario. Un sistema es controlable si puede, mediante un vector de control no acotado, transferir dicho sistema de cualquier estado inicial a cualquier otro estado, en un número finito de períodos de muestreo. Por lo tanto, el concepto de controlabilidad trata de la existencia de un vector de control que puede causar que el estado del sistema llegue a algún estado arbitrario.

La observabilidad se ocupa del problema de determinar el estado de un sistema dinámico a partir de observaciones de los vectores de salida y de control en un número finito de períodos de muestreo. Un sistema es observable si, con el sistema en el estado $x(0)$, se puede determinar el estado a partir de la observación de los vectores de salida y de control a lo largo de un número finito de períodos de muestreo.