

La irreversibilidad: una mirada desde la teoría de sistemas de control

Irreversibility: an overview from control systems theory

Lina María Gómez.¹ Ph.D & Hernán Alvarez.² Ph.D.

1. Escuela de Mecatrónica-Facultad de Minas, Universidad Nacional de Colombia.

2. Escuela de Ingeniería Química y Petróleos-Facultad de Minas, Universidad Nacional de Colombia.
Grupo de investigación en procesos dinámicos-KALMAN. Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín
limage@unal.edu.co, hdalvare@unal.edu.co

Recibido para revisión 23 de septiembre de 2010, aceptado 28 de junio de 2011, versión final 30 de junio de 2011

Resumen— En este trabajo se describen algunos aspectos del comportamiento dinámico de los sistemas irreversibles en el marco de la teoría de los sistemas, enfatizando en la dificultad adicional que imparten la incertidumbre y las perturbaciones sobre el análisis de controlabilidad en este tipo de sistemas. Finalmente, se desarrolla un análisis similar para los procesos por lotes, conocidos en la literatura como sistemas irreversibles, mostrando que su problema de control es aún un problema abierto.

Palabras claves— Sistemas de control, Irreversibilidad, Controlabilidad, Control de procesos

Abstract— This paper describes some aspects about dynamical performance of irreversible systems on the control systems theory and shows how for irreversible processes, the uncertainty and disturbances turn controllability analysis for this kind of systems as a very difficult task. Finally, a similar analysis is done for batch processes, which are known as irreversible processes, showing that their problem control is still an open problem.

Keywords— Control Systems, Irreversibility, Controllability, Process control.

I. INTRODUCCIÓN

La (ir)reversibilidad es un concepto relacionado con la direccionalidad de la evolución del tiempo, la cual indica que los fenómenos naturales ocurren en un determinado orden. A partir del concepto de reversibilidad, los sistemas pueden clasificarse en sistemas reversibles y en sistemas irreversibles. Los sistemas reversibles son aquellos que evolucionan cerca de un estado de equilibrio, presentan pocos cambios y parece que el tiempo no pasará para ellos, mientras que en los sistemas que evolucionan lejos del equilibrio se evidencia la direccionalidad del tiempo y por ello son llamados sistemas irreversibles. El concepto de (ir)reversibilidad ha sido estudiado en varias áreas como la física, los procesos estocásticos y la termodinámica.

Sin embargo, en esta última área es donde quizás ha habido un mayor desarrollo de este concepto especialmente con los desarrollos presentados por Prigogine [17]. El concepto de reversibilidad en termodinámica se encuentra estrechamente relacionado con la segunda ley de la termodinámica, la cual aún no cuenta con un consenso sobre su interpretación. Esto a su vez ha llevado a que existan diferentes interpretaciones del concepto de reversibilidad. En [22] se presenta una excelente revisión de las diferentes interpretaciones de la segunda ley de la termodinámica y por tanto del concepto de reversibilidad, resaltándose las interpretaciones de: *i*) La irreversibilidad como irrecuperabilidad de la condición inicial, *ii*) la irreversibilidad como sistemas que evolucionan lejos del equilibrio, y *iii*) la irreversibilidad como asimetría temporal.

La importancia de la reversibilidad en la teoría de los sistemas de control se evidencia en el control de procesos, pues cuando se comparan el tipo de operación de los procesos; esto es, continúa y por lotes (*batch*) o semilote (*semibatch*), se evidencia el carácter reversible de los procesos continuos y el carácter irreversible de los procesos por lotes [3]. El carácter reversible del sistema implica que los procesos continuos evolucionan alrededor de un punto de equilibrio, mientras que los sistemas irreversibles (lotes o semilote), no poseen un único punto de equilibrio. Es debido a esta diferencia que los libros dedicados al control de procesos sólo abordan el problema del control de los procesos continuos, es decir, de los procesos reversibles, salvo unos pocos casos se realizan tímidas alusiones al control de los procesos por lotes [19]. Sobre decir la importancia de cualquier análisis de irreversibilidad cuando se piensa en las condiciones del proceso [14] y el efecto que tales condiciones tienen sobre la facilidad de control y la eficiencia de tales procesos [9].

Aunque ambos tipos de procesos, continuos y por lotes, comparten la misma naturaleza, la incertidumbre y las perturbaciones propias de los procesos, adquieren una connotación diferente al combinarse con la irreversibilidad.

Ese hecho hace del control de los procesos por lotes un caso especial y un problema abierto desde la Teoría de los Sistemas de Control (TSC). De igual forma ocurre con el análisis de la controlabilidad, una propiedad fundamental en la TSC y que hasta la fecha ha sido ampliamente abordada para los sistemas reversibles puesto que en estos el sistema opera alrededor de un punto de equilibrio. De acuerdo con Sontag [20], para que un sistema sea controlable, además de satisfacer la condición de rango_debe ser reversible, ¿qué sucede entonces con la controlabilidad en los sistemas irreversibles?

En el presente trabajo se define el concepto de reversibilidad en el marco de la TSC y se muestra el efecto de la incertidumbre y las perturbaciones en estos sistemas. Adicionalmente, se desarrolla una discusión alrededor de la controlabilidad como propiedad de los sistemas irreversibles. Para ello, en la Sección 2 se indican las definiciones de reversibilidad, controlabilidad, incertidumbre y perturbación, mientras que en la Sección 3 se analiza un ejemplo de un sistema matemático irreversible. En la Sección 4 se presenta como caso un proceso por lotes y se ilustran los efectos que la irreversibilidad junto con la incertidumbre y las perturbaciones ocasionan en el control de estos procesos, para finalizar en la Sección 5 con unas conclusiones.

II. TERMINOLOGÍA

Sea el sistema dinámico indicado en la ecuación (1):

$$\Sigma_{aff} : \dot{x}(t) = f(x) + \sum_{i=1}^m u_i g_i(x) \quad (1)$$

Donde $x(t) \in \mathcal{X}$ una variedad (*manifold*) diferenciable suave (suficientemente diferenciable) de dimensión n , las acciones de control $u_i(t) \in \mathcal{U}$, con \mathcal{U} un subconjunto de \mathcal{R}^m , las funciones f y g_i son campos vectoriales suaves en \mathcal{X} , y las acciones de control $u(\cdot)$ son señales medibles y acotadas (\mathcal{L}^∞_u). Sea $z = \phi(t, s, x, \omega)$ la solución de (1), cuyo estado inicial es x y el estado final z , con la función de control $\omega = \omega(\cdot)$.

2.1 Reversibilidad

El concepto de reversibilidad es ampliamente discutido en termodinámica, sin embargo, en el contexto de la Teoría de Sistema de Control (TSC), Sontag [20] es el único autor que da una definición formal de este término, para él cual existen dos tipos de reversibilidad: la reversibilidad débil y la reversibilidad fuerte. Hay trabajos recientes que proponen otras definiciones de reversibilidad [5], pero en ámbitos puramente matemáticos ([4], [13]).

Un *sistema es débilmente reversible* si el estado final z de la trayectoria $\phi(t, s, x, \omega)$ puede recobrar el estado inicial x que generó dicha trayectoria en un tiempo finito y con una acción de control admisible, aunque no necesariamente recupere el estado inicial en orden inverso, es decir, puede hacerlo por otra trayectoria. En cambio, la *reversibilidad fuerte* exige que

el sistema recupere el estado inicial x por la misma trayectoria que éste generó al llegar al estado final z (Véase la Figura 1). Por lo tanto, reversibilidad fuerte implica reversibilidad débil, pero no al contrario.

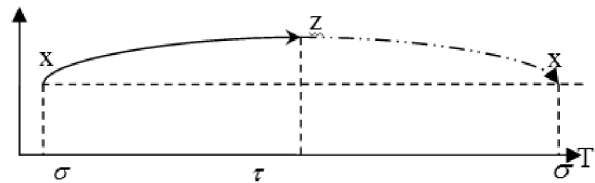


Figura 1a. Sistema fuertemente reversible

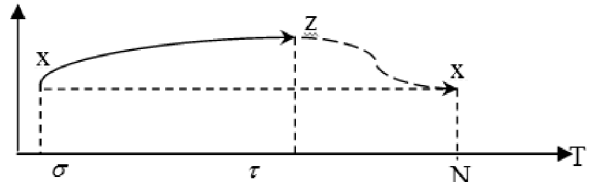


Figura 1b. Sistema débilmente reversible

Un sistema dinámico es irreversible si no es reversible. Es decir, un sistema es irreversible débil si no existe una acción de control admisible para retornar el sistema a su condición inicial, mientras que un sistema es irreversible fuerte, si no existe una acción de control admisible para que el sistema logre la misma trayectoria desde el estado inicial x al estado final z , como de z a x . En este caso, la irreversibilidad débil implica irreversibilidad fuerte, pero no al contrario.

La irreversibilidad de un sistema se manifiesta tanto en la estructura misma de sus ecuaciones como en el acotamiento de la acción de control. De acuerdo con Haddad *et al.* [7] si una variable de estado es estrictamente creciente o estrictamente decreciente en todo tiempo el sistema, es irreversible. Finalmente, se debe resaltar que aunque un sistema dinámico sea irreversible puede tener algunas de las componentes del vector de estado reversibles. Brevemente, el estado es el conjunto más pequeño de variables internas del proceso que permiten definirlo en cualquier instante de tiempo. Para una definición detallada del concepto Estado, se sugiere al lector revisar [12].

2.2 Controlabilidad de Sistemas no lineales

En 1960 R.E. Kalman [12] definió el concepto de controlabilidad para un sistema lineal invariante en el tiempo. La propiedad de controlabilidad allí definida, está relacionada con la habilidad que tiene un sistema dinámico para alcanzar un estado final fijo desde cualquier estado inicial. En trabajos posteriores este concepto se ha generalizado para los sistemas dinámicos no lineales ([10], [14], [11], [23]), en los cuales se define el accesibilidad, además de la controlabilidad. Cuando el análisis es local se consideran la accesibilidad y la controlabilidad local. Cuando el análisis es global se tiene la controlabilidad débil y la controlabilidad. En los sistemas lineales estos conceptos son equivalentes. En los sistemas no

lineales la accesibilidad se refiere a que el sistema pueda moverse en todas las direcciones, mientras que la controlabilidad, además

exige que el sistema pueda alcanzar cualquier punto del espacio de estados, como se ilustra en la Figura 2.

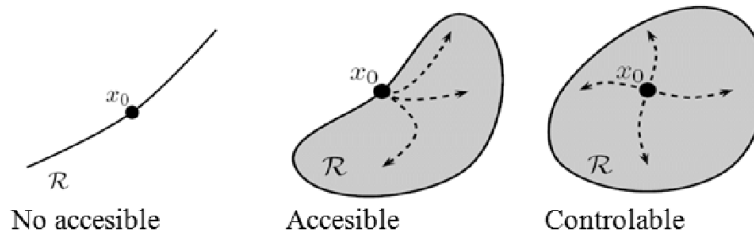


Figura 2. Comparación entre localmente accesible y localmente controlable.

Adicionalmente, en Sontag [20] se desarrolla un método para verificar la accesibilidad de los sistemas indicados en (1), el cual consiste en el cálculo de la dimensión de los corchetes de Lie asociados al sistema Δ , si $\dim \Delta = n$, con n la dimensión del vector de estados [9], entonces es posible concluir que el sistema es accesible alrededor de cada punto evaluado ([10, p.730]). Sin embargo, no es posible concluir acerca de la controlabilidad, pues ésta es una condición más fuerte, de hecho la accesibilidad es tan sólo una condición necesaria para la controlabilidad.

2.3 Incertidumbre

La incertidumbre es la falta de conocimiento de una parte de la dinámica del sistema. Se diferencian la incertidumbre estructural de la incertidumbre paramétrica. La primera se presenta cuando no se conocen todas las dinámicas del fenómeno y la paramétrica cuando no se tiene certeza en el valor de algunos de los parámetros del modelo. A diferencia de la reversibilidad, existe una amplia bibliografía en el campo del control dedicada al manejo de la incertidumbre de los sistema de control, por lo tanto, aquí sólo se enfatiza en el efecto que los diferentes tipos de incertidumbre ocasionan en un sistema dinámico irreversible.

2.4 Perturbaciones

Las perturbaciones son acciones o acontecimientos no controlados que afectan a los estados y la salida del sistema. Se las puede interpretar como señales de entrada no controladas al sistema, que pueden ser medibles o no medibles. En los procesos, las perturbaciones se deben a operaciones mal

realizadas, problemas en el procesamiento, influencia del medio ambiente y otros efectos no medibles que actúan sobre el proceso como resultado de las etapas anteriores del proceso.

III. CARACTERÍSTICAS DINÁMICAS DE LOS SISTEMAS IRREVERSIBLES

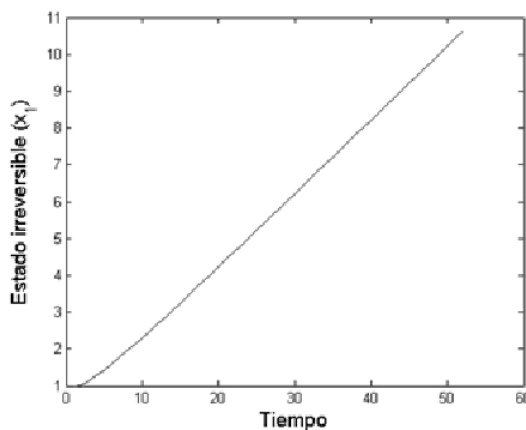
Con el fin de aclarar las particularidades dinámicas de los sistemas irreversibles, especialmente lo relacionado con la controlabilidad, la incertidumbre y las perturbaciones, se analiza el sistema irreversible indicado en el sistema de ecuaciones (2):

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= \theta x_2^2 + w_1 \\ \dot{x}_2 &= u + w_2 \end{aligned} \quad (2)$$

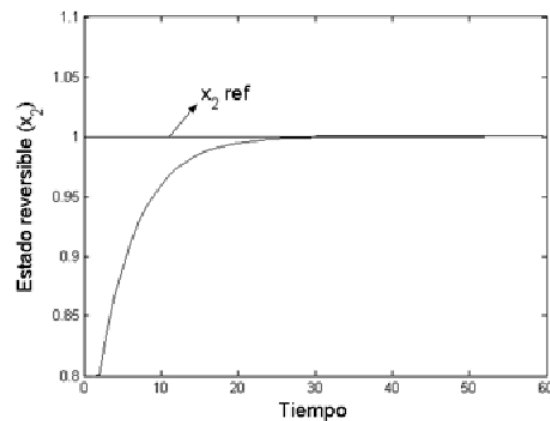
Donde u es la acción de control, w_1 y w_2 son perturbaciones y θ es un parámetro conocido.

3.1 Reversibilidad

Como se observa en el sistema (2), si $w_1 = w_2 = 0$ y $\theta = 1$, la variable de estado x_1 es creciente, aún operando a lazo cerrado con $u = K(x_2^{des} - x_2)$, como se puede ver en la Figura 3a. Por lo tanto, al ser x_1 creciente, se tiene que $\mathbf{x} \neq \mathbf{x}_0$ para todo \mathbf{x} , con lo que el sistema es débilmente irreversible. Sin embargo, la variable x_2 es una variable reversible y puede ser controlada y estabilizada cuando se cierra el lazo de control (véase la Figura 3b).



a) Estado irreversible



b) Estado reversible

Figura 3. Evolución temporal del sistema (2)

Una de las consecuencias más relevantes de la irreversibilidad en el comportamiento de un sistema dinámico es que su evolución ocurre lejos del equilibrio, es decir, los sistemas dinámicos irreversibles son sistemas transitorios en todo tiempo de su evolución. Si bien el sistema (2) posee un equilibrio matemático en $\mathbf{x}=[0 \ 0]'$, este punto sólo puede lograrse con $u=0$ y $x_{ref}=x_2=x_1=0$, lo podría comprometer el sentido físico de ese sistema como modelo matemático de un proceso real.

3.2 Controlabilidad e irreversibilidad

Al verificar la condición de rango del sistema (2) con $\theta=1$ y $w_1=w_2=0$, se obtiene $\dim(\Delta)=2$, por lo tanto el sistema es localmente accesible. Sin embargo, como $x_2^2 \geq 0$, el estado x_1 es no decreciente y el sistema (2) resulta no controlable [16]. En la Figura 4 se observa que si bien el sistema puede moverse en todas las direcciones, hay puntos del espacio de estado que no se pueden alcanzar. Además, los puntos del espacio de estados que no se pueden alcanzar depende de las condiciones iniciales.

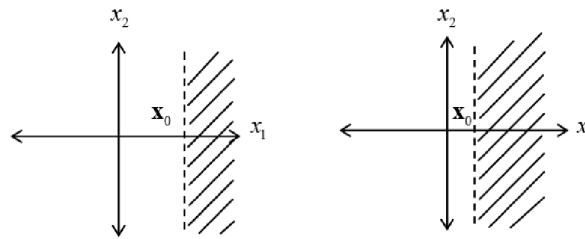


Figura 4. Conjunto alcanzable desde \mathbf{x}_0

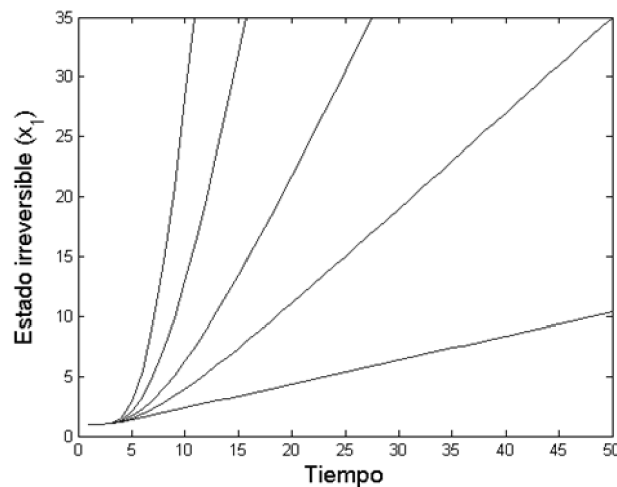


Figura 5. Evolución temporal del estado x_1 con diferentes acciones de control.

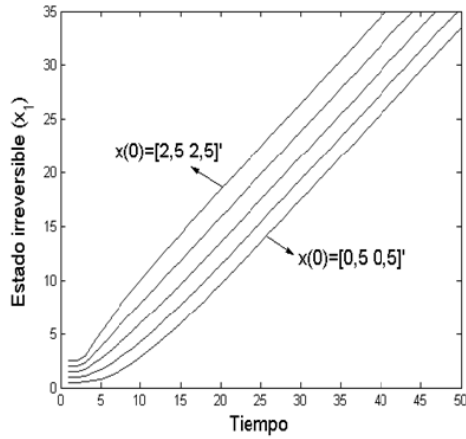
Otra forma de interpretar la condición de rango consiste en clasificar las variables en controlables y no controlables dependiendo de la dimensión de la distribución de controlabilidad. Por lo tanto, si un sistema satisface la condición de rango, como en el ejemplo, entonces todos los estados son afectados por la acción de control. Sin embargo, el efecto de la acción de control sobre la variable irreversible del ejemplo se limita a modificar la pendiente (m) con la cual evoluciona el estado x_1 . Si $u=0$, entonces $m=0$ y cuando $|u| \rightarrow \infty$, se tiene que $m \rightarrow \infty$ (véase la Figura 5).

3.3 Incertidumbre e irreversibilidad

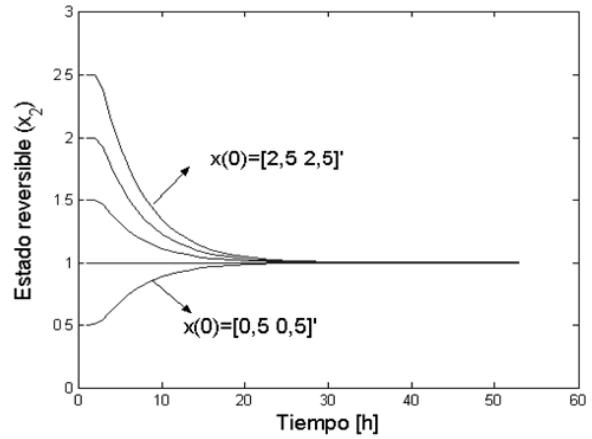
En la TSC, particularmente aplicada al control de procesos, usualmente se plantean las incertidumbres paramétricas y las

estructurales, tal como se indicó en 2.3. Sin embargo, en el caso de los sistemas dinámicos irreversibles debe incluirse dentro de las incertidumbres paramétricas aquellas asociadas con las condiciones iniciales del proceso.

Incertidumbre en las condiciones iniciales. En los sistemas irreversibles la evolución temporal viene condicionada por las condiciones iniciales debido a la ausencia de un estado estacionario. En la Figura 6a se ilustran el efecto de la variación de la evolución del estado irreversible para diferentes condiciones iniciales y la misma acción de control, mientras que en las variables reversibles las condiciones iniciales se desvanecen con el tiempo, como se evidencia en la Figura 6b.



a) Estado irreversible
 a) Estado irreversible



b) Estado reversible
 b) Estado reversible

Figura 6. Evolución temporal para diferentes condiciones iniciales.

Nótese que los cambios en la condición inicial no afectan la pendiente con la cual evoluciona el estado x_1 , sino el punto del espacio de estado que puede alcanzar el estado irreversible. En consecuencia en este tipo de procesos la accesibilidad depende fuertemente de las condiciones iniciales.

Incertidumbre en el parámetro θ . En la Figura 7 se observa que la incertidumbre paramétrica que actúa directamente sobre un estado irreversible modifica la pendiente con la cual evoluciona dicho estado, afectando por tanto, los puntos del espacio de estado que puede alcanzar el sistema.

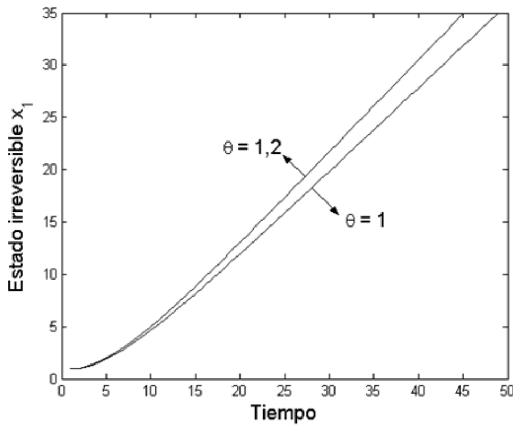


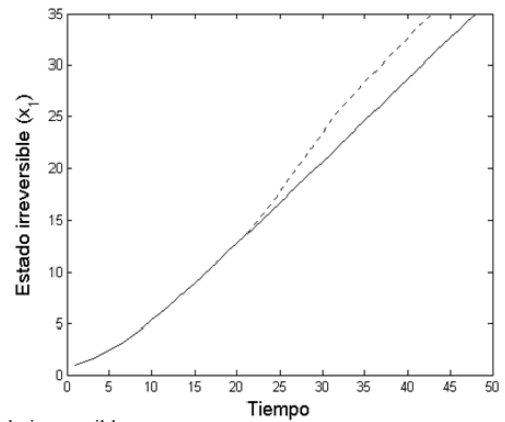
Figura 7. Evolución temporal del estado x_1 .

De lo anterior se concluye que la incertidumbre, tanto de las condiciones iniciales como de los parámetros, influye en la accesibilidad del sistema.

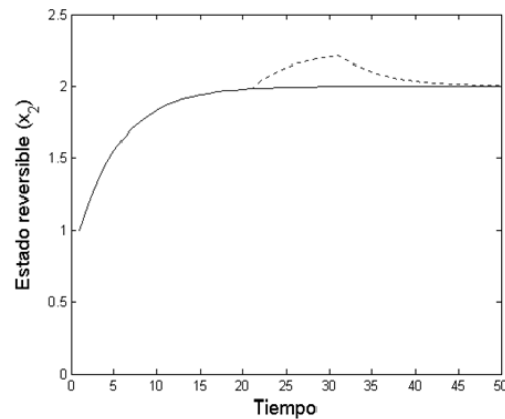
3.4 Perturbaciones e irreversibilidad

En este caso se tiene $w_1 = w_2 = 0,5$. Como se observa en la Figura 8 el efecto de una perturbación permanece en la variable

irreversible durante toda su evolución, pues si bien regresa a la pendiente original su evolución continúa con un error de estado permanente, mientras que el estado reversible regresa a su valor de referencia, como se ve en la Figura 8b.



a) Estado irreversible



b) Estado reversible

Figura 8. Evolución temporal del sistema (2)

IV. LOS PROCESOS POR LOTES: SISTEMAS DINÁMICOS IRREVERSIBLES

En general, los procesos por lotes son sistemas dinámicos irreversibles cuyo objetivo final de control consiste en la obtención de una cantidad suficiente de un producto dentro de un rango de especificaciones. De acuerdo con Lee and Lee [15], este objetivo sólo es posible de lograr de manera indirecta, pues por lo general no es posible medir en puntos intermedios del lote la calidad y cantidad del producto final, por lo que es necesario guiar las variables del proceso a lo largo de alguna trayectoria especificada. En esta sección se muestra que además ese problema [15], la falta de controlabilidad ocasionada por la irreversibilidad propia de los procesos por lotes hace que bajo ciertas condiciones de incertidumbre y perturbación sea complejo incluso el guiado de las variables irreversibles a lo largo de una trayectoria especificada.

Con el fin de indicar el efecto que la irreversibilidad produce en los procesos por lotes se simula bajo diferentes condiciones el modelo del Proceso de Producción de Penicilina (PPP) [1], el cual es un proceso ampliamente referenciado en la literatura del control de los procesos por lotes, cuyo objetivo de control consiste en maximizar la producción de penicilina, usando como acción de control al caudal de alimentación con una concentración de sustrato fija S_m . Si bien el PPP es un sistema irreversible, es posible identificar y clasificar las variables de estado en reversibles e irreversibles. Las variables reversibles son la concentración de sustrato x_1 y la concentración de biomasa x_2 , mientras que la concentración de penicilina x_3 es una variable irreversible por la estructura misma de su ecuación. El volumen del reactor x_4 es una variable irreversible porque la acción de control u , correspondiente al caudal de alimentación, es siempre positiva. $\mu_{max}, K_m, K_i, \rho$ son parámetros cinéticos y Y_1, Y_2 son parámetros asociados con el rendimiento de la reacción [1].

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \\ \dot{x}_4 \end{bmatrix} = \underbrace{\begin{bmatrix} \mu(x_2)x_1 \\ -\frac{\mu(x_2)x_1}{Y_1} - \frac{\rho x_1}{Y_2} \\ \rho x_1 \\ 0 \end{bmatrix}}_{f(x)} + \underbrace{\begin{bmatrix} -\frac{x_1}{x_4} \\ \frac{1}{x_4}(S_m - x_2) \\ -\frac{x_3}{x_4} \\ 1 \end{bmatrix}}_{g(x)} u \tag{3a}$$

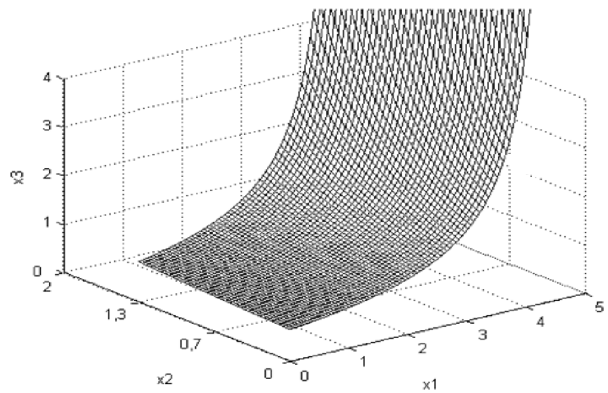
$$\mu(x_2) = \mu_{max} \frac{x_2}{K_m + x_2 + (x_2^2 / K_i)} \tag{3b}$$

4.1 Efecto de la irreversibilidad en la controlabilidad de los Procesos Por Lotes (PPL)

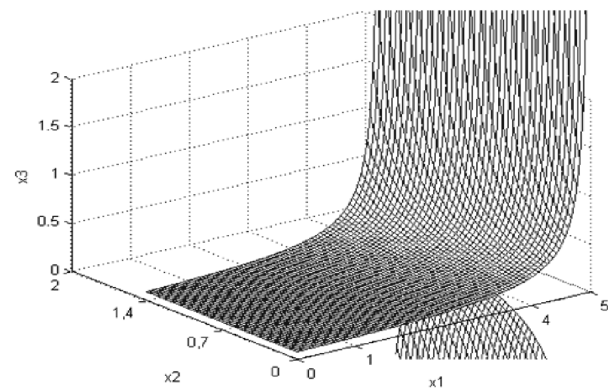
En Gómez *et al.* [6] se analiza la condición de rango del modelo de PPP y se obtiene que la dimensión de Δ es cuatro, por lo tanto el sistema satisface la condición de rango y verifica la accesibilidad. Es decir, el conjunto alcanzable puede contener

una vecindad de dimensión $n = 4$ para cada x_0 . Sin embargo, debido a su carácter irreversible el modelo del PPP no es controlable, pues hay puntos del espacio de estado a los que no puede llegar. Supóngase que el proceso comienza con un volumen de 90 lt. Durante el transcurso del proceso el volumen no puede tomar valores inferiores a 90 lt, por lo tanto, estos puntos del espacio de estados no son alcanzables.

Condiciones iniciales. En los procesos por lotes la evolución del sistema depende significativamente de las condiciones iniciales del sistema. En palabras de Rusell *et al.* [18] “*los procesos por lotes se encuentran cronológicamente amarrados a sus condiciones iniciales*”. Este efecto se hace más notorio cuando el sistema no verifica la condición de rango, pues en este caso la forma de la superficie alcanzable depende considerablemente de las condiciones iniciales. En la Figura 9 se indica la superficie alcanzable de un bioproceso genérico de tres estados $n=3$ (biomasa, sustrato y volumen), desarrollado por Hangos *et al.* [8], en el que $\dim(\Delta) = 2$, evidenciándose el efecto de las condiciones iniciales en la superficie de alcanzabilidad.



(a) $x_0 = [2 \ 0,5 \ 0,5]^T$



(b) $x_0 = [2 \ 0,5 \ 0,1]^T$

Figura 9. Hipersuperficie de alcanzabilidad

Acción de control limitada. Al igual que en cualquier proceso real, los estados se encuentran restringidos a un intervalo de

funcionamiento. Sin embargo, el efecto de la acción de control sobre el estado irreversible es aún más limitado, como se indicó en 3.2. Además, debido a la irreversibilidad el efecto de la acción de control varía con la evolución del proceso. En el PPP la acción de control se encuentra limitada por la capacidad volumétrica del reactor, por lo tanto, a medida que evoluciona el sistema y el reactor se acerca a su capacidad máxima en volumen, el efecto de la acción de control es cada vez más limitado, haciéndose prácticamente nulo al final del lote, eliminando por lo tanto, la posibilidad de corrección. No obstante, la acción de control afecta el comportamiento

dinámico de los estados, tal como se ilustra en la Figura 10, así que si se parte de la definición conceptual de controlabilidad, esto es, que las entradas afecta a los estados, podría decirse entonces que los procesos por lotes y en general los sistemas irreversibles poseen una controlabilidad limitada que no es posible de evaluar mediante las técnicas clásicas indicadas por Sontag [20]. Allí se establece que la propiedad de la controlabilidad se verifica o no se verifica, lo que indica que se requieren otras herramientas que permitan analizar la controlabilidad de los sistemas irreversibles.

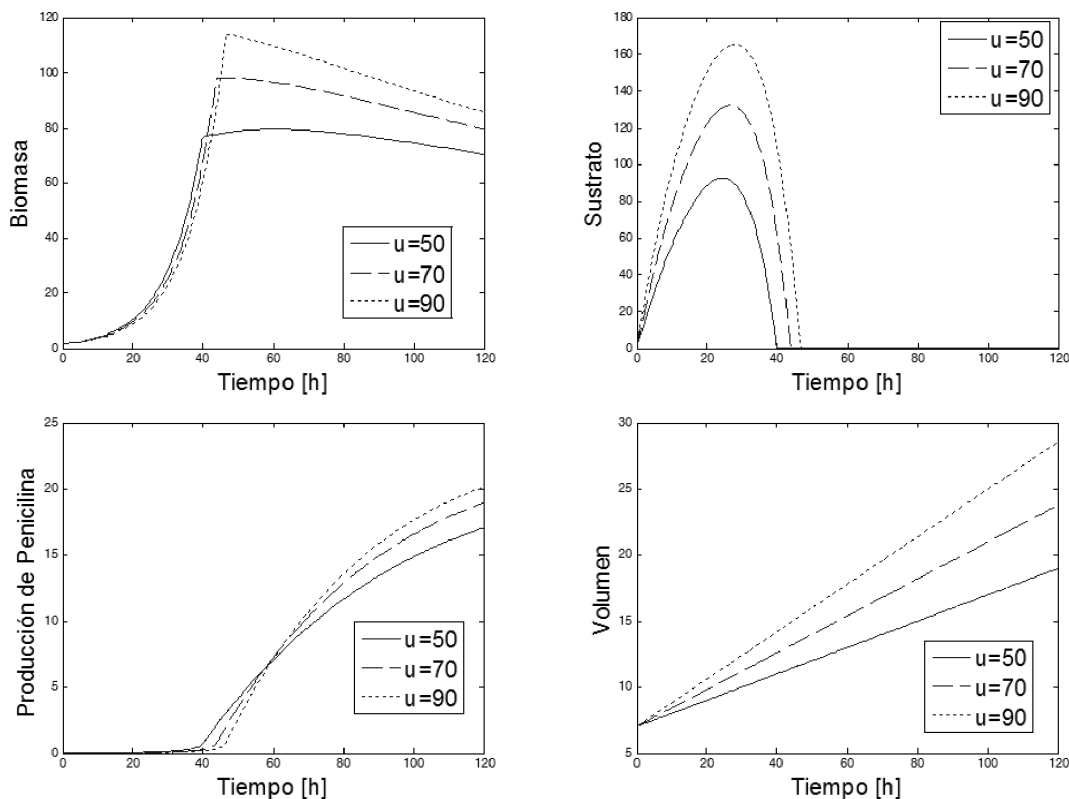


Figura 10. Efecto de la acción de control del sistema (3)

4.2 Efecto de la incertidumbre en procesos irreversibles por lotes

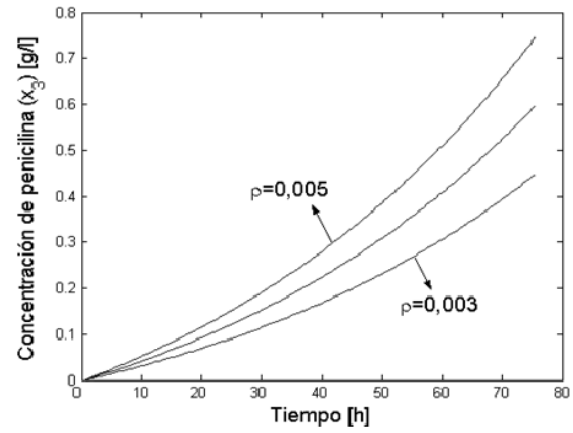
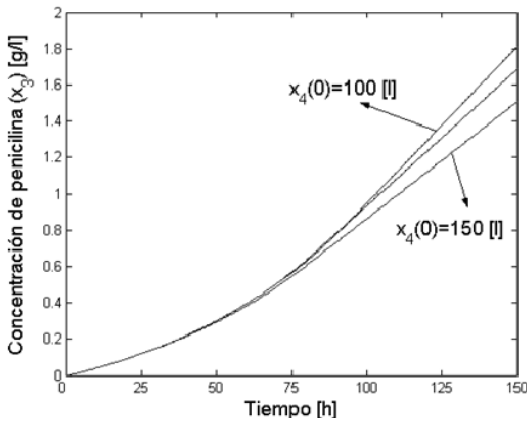
En los procesos por lotes además de la incertidumbre paramétrica se debe considerar el efecto de la incertidumbre en las condiciones iniciales, pues como se indicó en 4.1, estas juegan un rol fundamental en este tipo de procesos.

Incetidumbre paramétrica. En Srinivasan *et al.* [21] se consideran dos tipos de incertidumbre paramétrica para el ejemplo que nos ocupa: Y_1 varía en un rango de 0,3-0,5 y la concentración de sustrato en el caudal de entrada S_{in} es normalmente distribuido con media 200 [g/l] y desviación estándar 25 [g/l]. En ese mismo artículo bajo el supuesto de que garantizar las condiciones de optimalidad genera la mayor

producción de penicilina, se proponen dos controladores PI en cascada: el lazo interno para el sustrato y el lazo externo para la biomasa. Dicha estrategia de control suprime el efecto que la incertidumbre planteada puede ocasionar en la producción de penicilina. Sin embargo, el verdadero inconveniente de la incertidumbre paramétrica se presenta cuando actúa directamente en el estado irreversible, aspecto éste no considerado por Srinivasan *et al.* [21]. El parámetro ρ que aparece como un valor fijo, de acuerdo con Birol *et al.* [2] depende de las variables ambientales del proceso: oxígeno disuelto, pH y temperatura. Por lo tanto, el valor de ρ varía a lo largo del tiempo del lote. En la Figura 11b se observa que la producción de penicilina varía considerablemente con la

variación de ρ , aún en el caso de que el sistema funcione a lazo cerrado con la estrategia propuesta en Srinivasan *et al.* [21].

Incertidumbre en las condiciones iniciales. En la Figura 11a se observa como la producción de penicilina se ve afectada por la variación en el volumen inicial con el cual comienza el proceso.



a). Condiciones iniciales

b). Parámetro

Figura 11. Evolución temporal del sistema (3) bajo incertidumbre

4.3 Efecto de las perturbaciones en los procesos irreversibles por lotes

Para ver esto, se introdujo en el ejemplo a las 40 horas una perturbación del tipo escalón en la concentración de sustrato del caudal de alimentación, S_F . Como se observa en la Figura

12, el efecto de una perturbación permanece en las variables irreversibles durante toda su evolución, lo que evidencia el efecto fuerte que tiene la perturbación en un proceso irreversible, si se piensa en la misma perturbación pero aplicada a un proceso reversible.

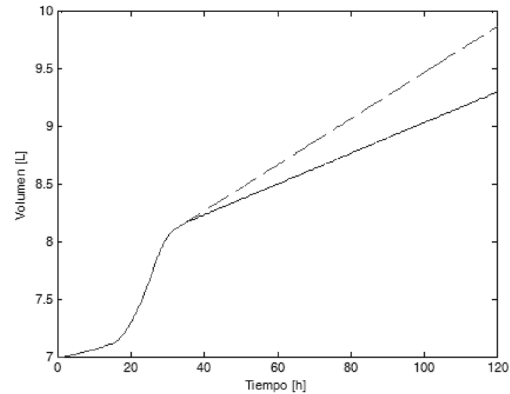
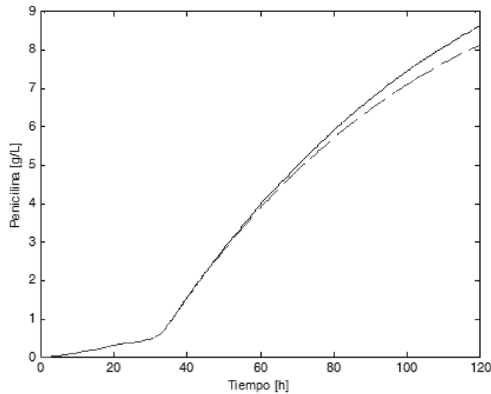
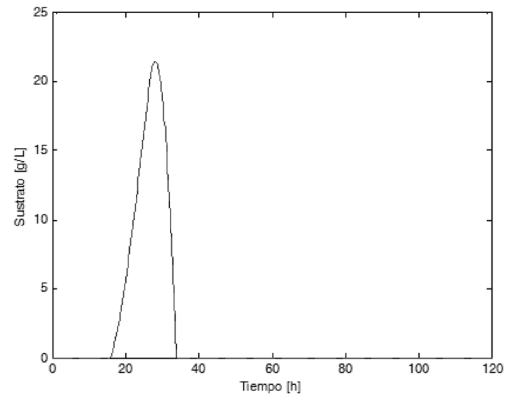
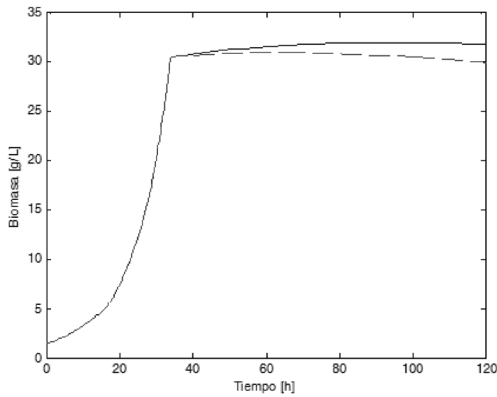


Figura12 Efecto de la perturbación en el sistema (3)

V. CONCLUSIONES

En este trabajo se indica como la irreversibilidad afecta considerablemente el comportamiento dinámico de los sistemas que poseen esa característica. En particular se evidencia la estrecha relación que existe entre irreversibilidad, controlabilidad, incertidumbre y perturbaciones, resaltando la dependencia de las variables irreversibles con respecto a las condiciones iniciales, el efecto limitado de la acción de control y como la incertidumbre y las perturbaciones que actúan sobre las variables irreversibles afectan fuertemente los puntos del espacio de estado que puede alcanzar el sistema, dificultando el seguimiento de una trayectoria especificada. Se evidencia además, la necesidad de generar nuevas herramientas de análisis en el marco de la Teoría de los Sistemas de Control (TSC), que permitan abordar las dificultades que impone el carácter irreversible de algunos sistemas reales, como los procesos por lotes.

REFERENCIAS

- [1] Banga, J.R., Balsa-Canto, E., Moles, C., Alonso, A. (2005). Dynamic optimization of bioprocesses: Efficient and robust numerical strategies. *Journal of Biotechnology*, Vol. 117, pp 407–419
- [2] Birol, G, Ündey, C, Cinar, A. (2002). A modular simulation package for fed-batch fermentation: penicillin production. *Computers and Chemical Engineering*. Vol. 26; pp. 1553-1565..
- [3] Bonvin, D. (1998). Optimal operation of batch reactors –A personal view. *Journal of Process Control*, Vol. 8, Nos. 5-6, pp. 335-368.
- [4] Cardetti, F and Gordina, M. (2008). A note on local controllability on Li groups. *System and Control Letters* 57 (12).
- [5] Chalisjarar, D.N. et al. (2009). Trajectory controllability of nonlinear integro-differential system. *Journal of the Franklin Institute* 347.
- [6] Gómez, L, Muñoz D, di Sciascio, F, Peña, M, Alvarez, H. (2006). Una aproximación a la controlabilidad de los procesos por lotes. XX Congreso Argentino de Control Automático, Buenos Aires.
- [7] Haddad, W., Chellaboina, V., Nersisov, S (2005). Time-Reserval Symmetry, Poincaré Recurrence, Irreversibility, and the Entropic Arrow of Time: From Mechanics to System Thermodynamics. Proc. 44th IEEE CDC-ECC, España, pp. 5995-6002.
- [8] Hangos, K.M., J. Bokor and G. Szederkényi, (2005). *Analisis and Control of Nonlinear Process System*. Springer, London.
- [9] Hawkins, W. and Fisher, Th. (2006). Batch control systems. ISA Ed.
- [10] Hermann, R., Krener, A.J. (1977). Nonlinear Controllability and Observability. *IEEE Trans. Aut. Contr*, Vol. 5. pp. 728-740
- [11] Isidori, A. (1995). *Nonlinear Control Systems*, Third edition, Springer, London.
- [12] Kalman, R.E. (1960). On the General Theory of Control System. *Proc. First IFAC Congress*, 1, 481-492. Moscow.
- [13] Klamka, J. (2009). Constrained controllability of semilinear systems with delays. *Nonlinear Dynamics* 56 (1–2).
- [14] Korovessi, E. and Linninger, A. (Editors) (2006). *Batch processes*. Taylor & Francis.
- [15] Lee, K. and Lee, J. (2003). ILC-based batch process control technique for integrated control of end product properties and transient profiles of process variables. *Journal of Process Control*. Vol. 13, p. 607-621
- [16] Nijmeijer, H., van der Schaft, A. (1990). *Nonlinear Dynamical Control System*. Springer, New York.
- [17] Prigogine, I. (1955). *Introduction to thermodynamics of irreversible processes*, Interscience Publishers, New York.
- [18] Russell, S.A., D. G. Robertson, J. H. Lee and B. A. Ogunnaike (2000). Model-based quality monitoring of batch and semi-batch processes. *Journal of Process Control*, Vol. 10, pp.317-332
- [19] Smith, C. and Corripio, A., (1997). *Principles and Practice of automatic Process Control*. Second Edition, Jonh Wiley & Sons, New York.
- [20] Sontag, E. (1998). *Mathematical Control Theory*. Second Edition, Springer, New York.
- [21] Srinivasan, B., Palanki, S. and Bonvin, D. (2002). Dynamic optimization of batch processes II. Role of measurement in handling uncertainty. *Computers and Chemical Engineering*. Vol. 27; pp. 27-44.
- [22] Uffink, J. (2001). Bluff your way in the second law of thermodynamics. *J. Stud. Hist. Phil. Mod. Phys.*, **32**, 305-394
- [23] Zecevic, A. and Siljak, D. (Editors) (2010). *Control of Complex Systems. Structural Constraints and Uncertainty*. Springer.

Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín Facultad de Minas

120 años 
TRABAJO Y RECTITUD

Escuela de Ingeniería de Sistemas

Misión

La misión de la Escuela de Ingeniería de Sistemas es fomentar y apoyar la generación o la apropiación de conocimiento, la innovación y el desarrollo tecnológico en el área de ingeniería de sistemas e informática sobre una base científica, tecnológica, ética y humanística.



Visión

La formación integral de profesionales desde el punto de vista científico, tecnológico y social que les permita adoptar, aplicar e innovar conocimiento en el campo de los sistemas e informática en sus diferentes aspectos, aportando con su organización, estructuración, gestión, planeación, modelamiento, desarrollo, procesamiento, validación, transferencia y comunicación; para lograr un desempeño profesional, investigativo y académico que contribuya al desarrollo social, económico, científico y tecnológico del país.



Escuela de Ingeniería de Sistemas
Dirección Postal:
Carrera 80 No. 65 - 223 Bloque M8A
Facultad de Minas. Medellín - Colombia
Tel: (574) 4255350 Fax: (574) 4255365
Email: esistema@unalmed.edu.co
<http://pisis.unalmed.edu.co/>

