

CAPITULO 5

ANALISIS DE RESULTADOS

5.1 INTRODUCCION

En el capítulo 3 se describió el modelo matemático del proceso de extrusión de plásticos, que sirvió como base para el diseño del observador de estados para estimar las temperaturas de las cinco zonas en que se divide el proceso, descrito en el capítulo 4.

Hay que puntualizar que la función del observador desarrollado en este trabajo no es retroalimentar los estados como estrategia de control, sino más bien estimar las temperaturas del proceso con el fin de validar en forma indirecta los registros de temperatura de los equipos de medición instalados para ese fin.

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos de las simulaciones para verificar primero, la adaptación de el modelo de extrusión de plásticos utilizado y segundo, el comportamiento del observador de estado propuesto.

5.2 METODOLOGIA DE EVALUACION

Para validar el modelo matemático del extrusor de plásticos y analizar el comportamiento del observador se realizaron un conjunto de simulaciones utilizando MatLab [8] como software de simulación.

El modelo de extrusión se expresa como

$$\begin{aligned} \mathbf{x}(k+1) &= \mathbf{G}\mathbf{x}(k) + \mathbf{H}\mathbf{u}(k) \\ \mathbf{y}(k) &= \mathbf{C}\mathbf{x}(k) \end{aligned} \quad (5.1)$$

y el modelo del observador, tal y como se describió en el capítulo 4, es

$$\begin{aligned} \tilde{\mathbf{x}}(k+1) &= \mathbf{G}\tilde{\mathbf{x}}(k) + \mathbf{H}\mathbf{u}(k) + \mathbf{K}_e(-\mathbf{y}(k) + \tilde{\mathbf{y}}(k)) \\ \tilde{\mathbf{y}}(k) &= \mathbf{C}\tilde{\mathbf{x}}(k) \end{aligned}$$

Manipulando algebraicamente las expresiones del observador, se llega a

$$\begin{aligned} \tilde{\mathbf{x}}(k+1) &= \mathbf{G}\tilde{\mathbf{x}}(k) + \mathbf{H}\mathbf{u}(k) + \mathbf{K}_e(-\mathbf{C}\mathbf{x}(k) + \mathbf{C}\tilde{\mathbf{x}}(k)) \\ \tilde{\mathbf{y}}(k) &= \mathbf{C}\tilde{\mathbf{x}}(k) \end{aligned}$$

ó bien

$$\begin{aligned} \tilde{\mathbf{x}}(k+1) &= (\mathbf{G} + \mathbf{K}_e\mathbf{C})\tilde{\mathbf{x}}(k) - \mathbf{K}_e\mathbf{C}\mathbf{x}(k) + \mathbf{H}\mathbf{u}(k) \\ \tilde{\mathbf{y}}(k) &= \mathbf{C}\tilde{\mathbf{x}}(k) \end{aligned} \quad (5.2)$$

Combinando (5.1) y (5.2) se obtiene

$$\begin{bmatrix} \mathbf{x}(k+1) \\ \tilde{\mathbf{x}}(k+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{G} & 0 \\ -\mathbf{K}_e\mathbf{C} & \mathbf{G} + \mathbf{K}_e\mathbf{C} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{x}(k) \\ \tilde{\mathbf{x}}(k) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{H} \\ \mathbf{H} \end{bmatrix} \mathbf{u}(k)$$

$$\begin{bmatrix} \mathbf{y}(k) \\ \tilde{\mathbf{y}}(k) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{C} & 0 \\ 0 & \mathbf{C} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{x}(k) \\ \tilde{\mathbf{x}}(k) \end{bmatrix} \quad (5.3)$$

donde \mathbf{G} , \mathbf{H} , \mathbf{C} y \mathbf{K}_e fueron definidos en la sección 4.4. Simplificando (5.3) se tiene

$$\begin{bmatrix} \mathbf{x}(k+1) \\ \tilde{\mathbf{x}}(k+1) \end{bmatrix} = \mathbf{A}_m \begin{bmatrix} \mathbf{x}(k) \\ \tilde{\mathbf{x}}(k) \end{bmatrix} + \mathbf{B}_m \mathbf{u}(k)$$

$$\begin{bmatrix} \mathbf{y}(k) \\ \tilde{\mathbf{y}}(k) \end{bmatrix} = \mathbf{C}_m \begin{bmatrix} \mathbf{x}(k) \\ \tilde{\mathbf{x}}(k) \end{bmatrix} \quad (5.4)$$

El sistema (5.4) representa el modelo completo del extrusor y del observador de estados en forma conjunta, para su simulación en MatLab. A continuación se analizan los resultados obtenidos en algunas de las simulaciones realizadas, las cuales ponen de manifiesto la validez del modelo del extrusor y del observador desarrollado.

5.3 ANALISIS DE RESULTADOS

5.3.1 Modelo del extrusor. En primera instancia se realizaron un conjunto de simulaciones para validar el modelo de extrusión descrito en el capítulo 3, y que representa la base para el diseño del observador de estados desarrollado en esta tesis. Con este objetivo se presentan los resultados de dos simulaciones para dos distintas entradas; la primera de estas entradas está compuesta por una entrada cero con duración de 50 s y un escalón unitario de igual duración. La segunda señal de entrada está compuesta inicialmente por un escalón unitario con una duración de 10 s, seguido de una entrada cero de 40 s de duración y finalmente un segundo escalón unitario con una

duración de 50 s. En ambos casos, las variables de control del proceso, representadas por la cantidad de calor suministrado expresado en por ciento (% H) de las cinco zonas de mantuvieron fijas en los siguientes valores:

$$\%H = \begin{bmatrix} 2 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 2 \end{bmatrix}$$

En la Fig. 5.1 se aprecian ambas señales de entrada, utilizadas para verificar el modelo del extrusor como para analizar el comportamiento del observador.

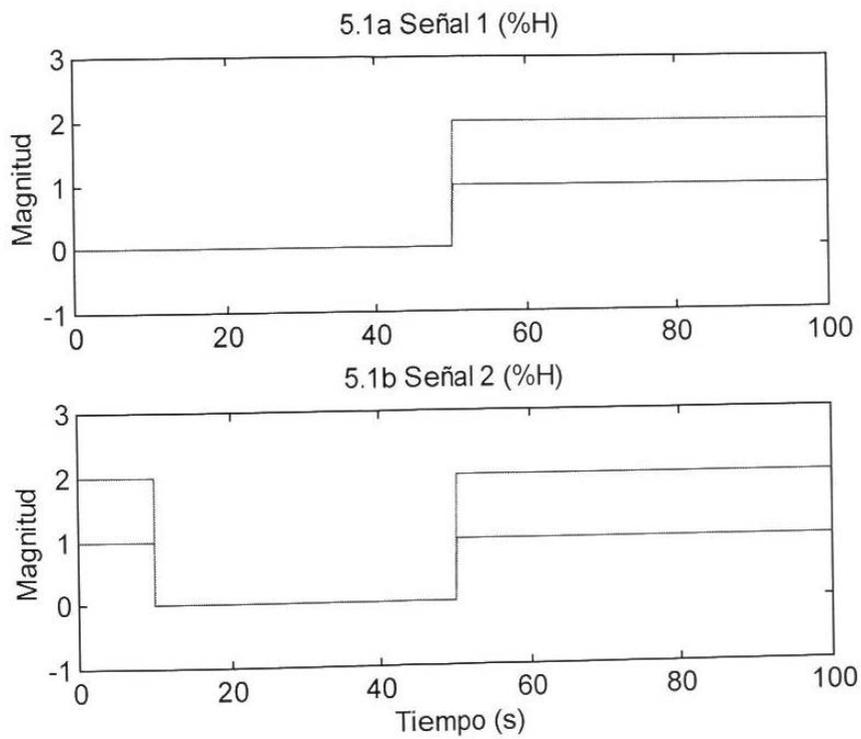


Fig. 5.1. Señales de entrada utilizadas en las simulaciones.

El objetivo de esta simulación es verificar el comportamiento del modelo ante una condición de pérdida de suministro de energía en las bandas calefactoras que suministran calor al proceso de extrusión. Ante estas perturbaciones, se han reportado

caídas de temperatura de alrededor de 1°C a 2°C cuando el suministro de energía se pierde durante aproximadamente 40 s.

Los resultados de simulación para la primera señal de entrada (Fig. 5.1a) se muestran en la Fig. 5.2. Las gráficas muestran el comportamiento de la temperatura en las cinco zonas del proceso. Se puede apreciar como ante una entrada cero, la temperatura del proceso comienza a disminuir hasta el punto en el cual se suministra calor, 50 s después del inicio de la simulación. El análisis de las temperaturas indican una reducción de 1°C durante el tiempo en el cual no se suministró calor al proceso, comportamiento que es muy similar al del proceso real.

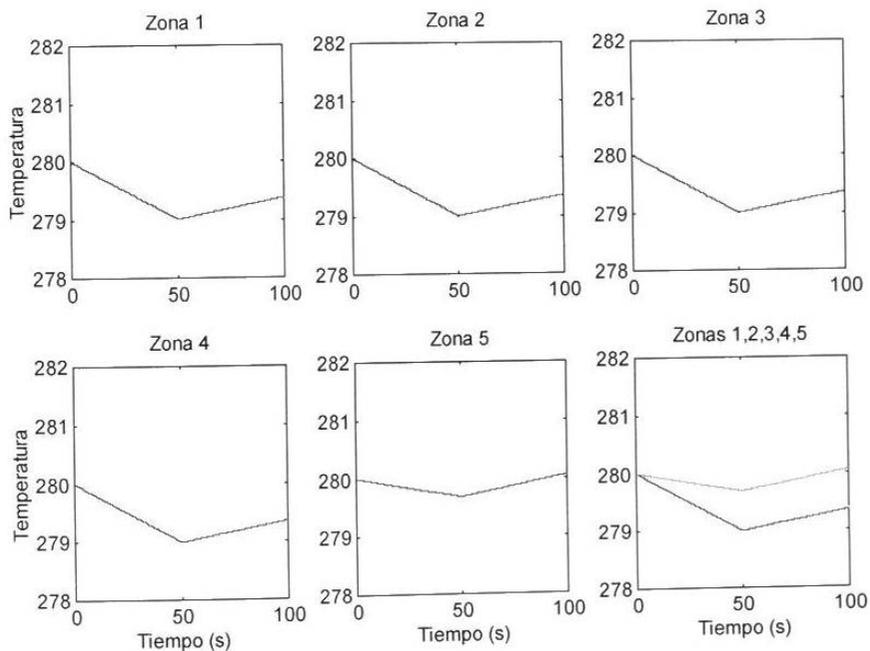


Fig. 5.2. Comportamiento del modelo del extrusor ante la señal de la Fig. 5.1a.

En el caso de la temperatura en la zona 5, la reducción que se presenta es de menor magnitud que las primeras cuatro zonas, debido a que continúa el transporte de material, transfiriendo energía térmica de las primeras a la última zona.

Los resultados de simulación aplicando la segunda señal de entrada, mostrada en la Fig. 5.1b se muestran en la Fig. 5.3. Analizando estos resultados, se puede observar el incremento inicial de temperatura, seguido por una reducción de aproximadamente 1°C durante los 40 s correspondientes a la entrada cero. Nuevamente, este es el comportamiento esperado ante una perturbación de este tipo en el proceso real.

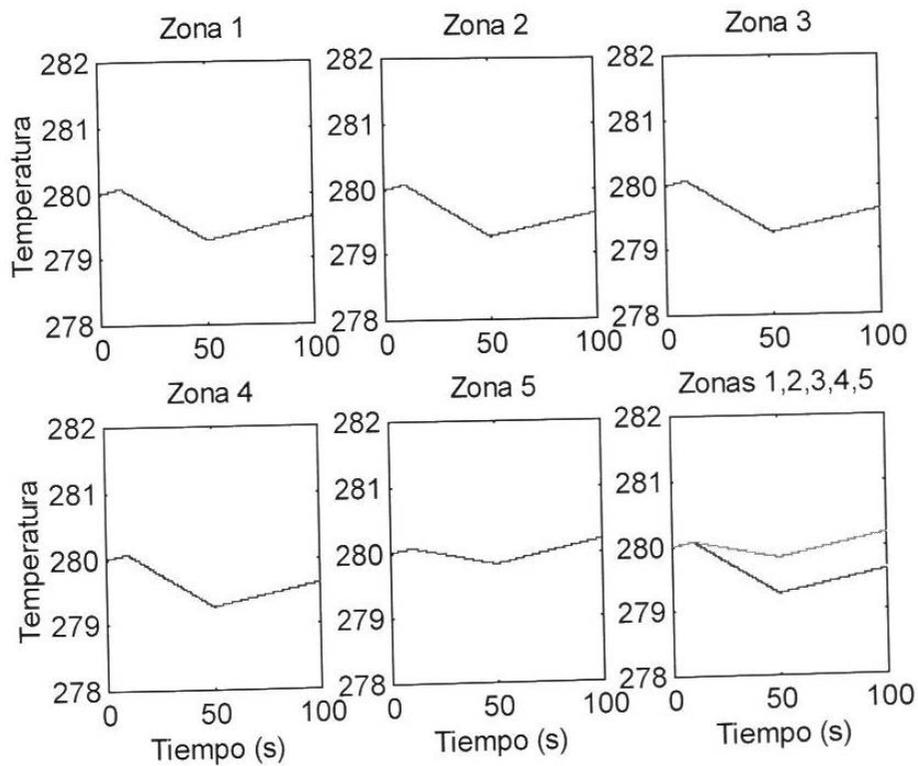


Fig. 5.3. Comportamiento del modelo del extrusor ante la señal de la Fig. 5.1b.

5.3.2 Observador de estado. Una vez verificado el modelo del extrusor, se procedió a realizar un conjunto de simulaciones para analizar el comportamiento del observador diseñado en el capítulo 4. En la Fig. 5.4 se observa el comportamiento del observador de estado aplicando la señal de entrada de la Fig. 5.1a. En este caso, la condición inicial del proceso es de 280°C , mientras que las variables del observador son inicializadas en valor cero.

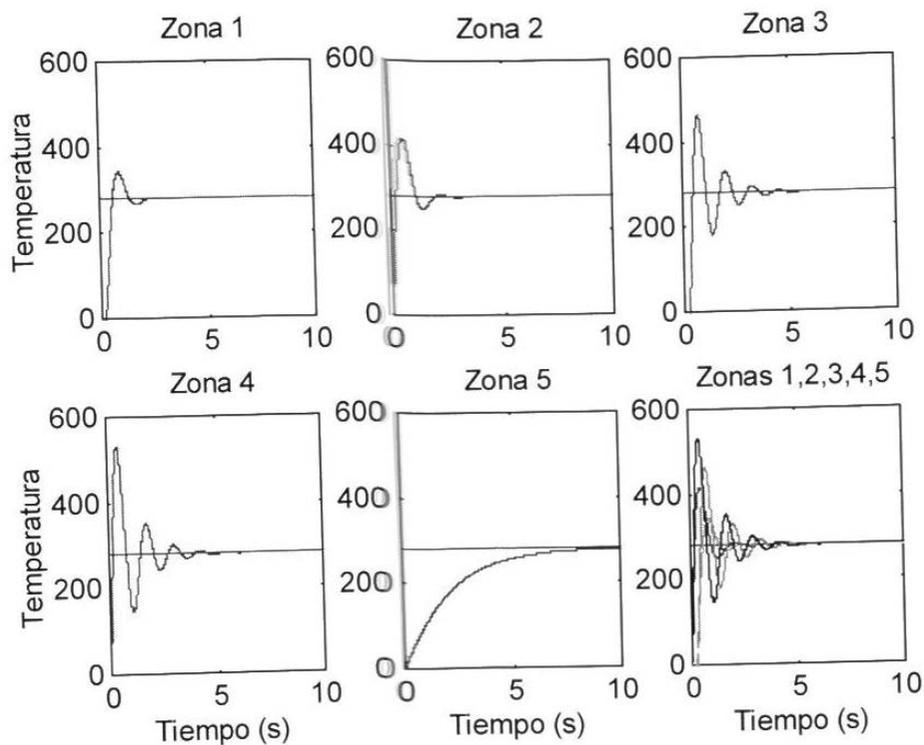


Fig. 5.4. Comportamiento del observador ante la señal de la Fig. 5.1a.

En estas gráficas se puede apreciar claramente como las salidas del observador tienden a sus valores reales, es decir

$$\mathbf{e}(k) = \mathbf{x}(k) - \tilde{\mathbf{x}}(k) = 0$$

$$\lim_{t \rightarrow \infty}$$

Este aspecto se puede apreciar en la Fig. 5.5, donde se grafican los errores entre las temperaturas del proceso y las temperaturas estimadas por el observador.

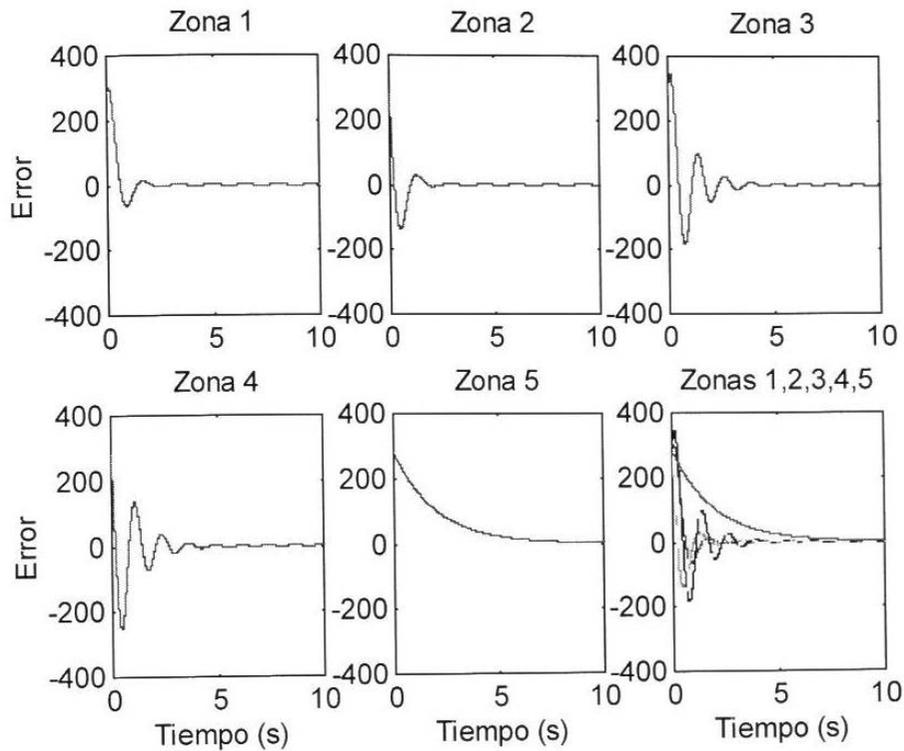


Fig. 5.5. Comportamiento de los errores ante la señal de la Fig. 5.1a.

En lo que respecta al tiempo de respuesta, éste se puede analizar en las gráficas de las Fig. 5.4 y 5.5. Los resultados muestran que en un tiempo promedio de 5 s el error del observador es prácticamente cero; la única excepción se tiene en la temperatura de la zona 5, donde el valor estimado requiere alrededor de 10 s para converger a su valor real.

Este tipo de respuesta es aceptable, ya que el objetivo del observador no es retroalimentar los estados como estrategia de control, sino más bien estimar las temperaturas del proceso como un método indirecto para validar las lecturas de los equipos de medición de temperatura. Además, considerando que el proceso de extrusión de plásticos tiene asociadas constantes de tiempo muy grandes por tratarse de un fenómeno de transferencia de calor, un tiempo de respuesta de 10 s es totalmente aceptable, si lo comparamos con la respuesta del modelo descrita en la sección 5.3.1, donde se registran cambios de $1/40^{\circ}\text{C}$ por cada segundo [2].

En las Fig. 5.6 y 5.7 se muestra el comportamiento del observador de estados y los errores entre las variables del modelo y las variables estimadas para una entrada como la indicada en la Fig. 5.1b. De nueva cuenta se puede apreciar como el tiempo de respuesta del observador es adecuado, ya que éste se estabiliza antes de que se manifiesten cambios apreciables en las temperaturas del proceso, ya sean debido a una perturbación o acción de control, cualquiera que ésta sea.

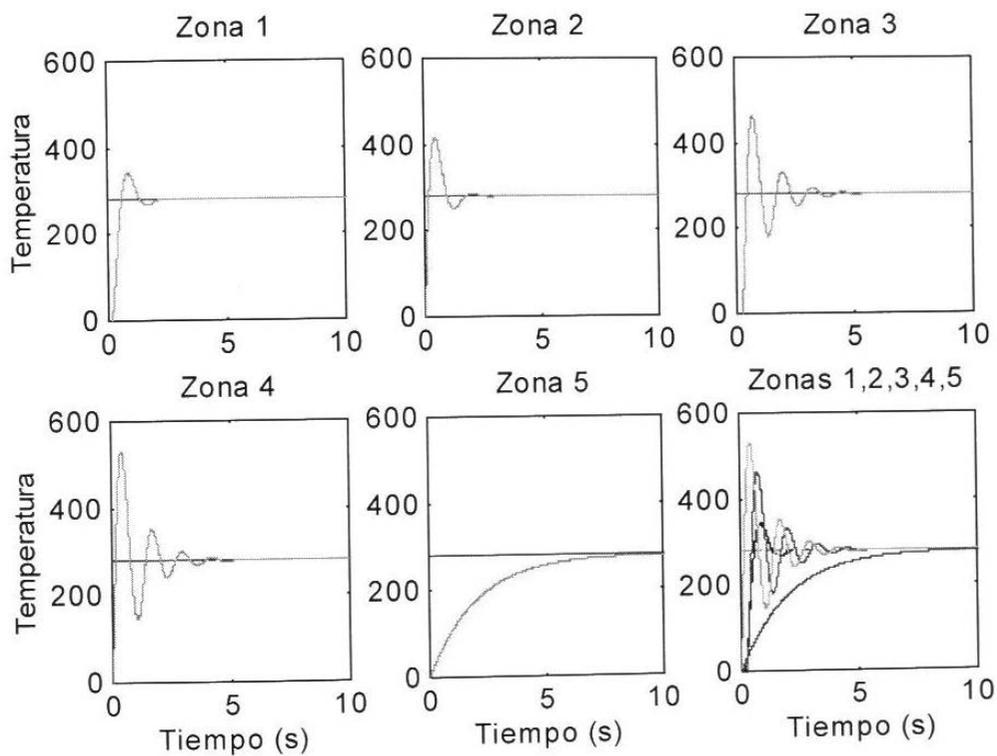


Fig. 5.6. Comportamiento del observador ante la señal de la Fig. 5.1b.

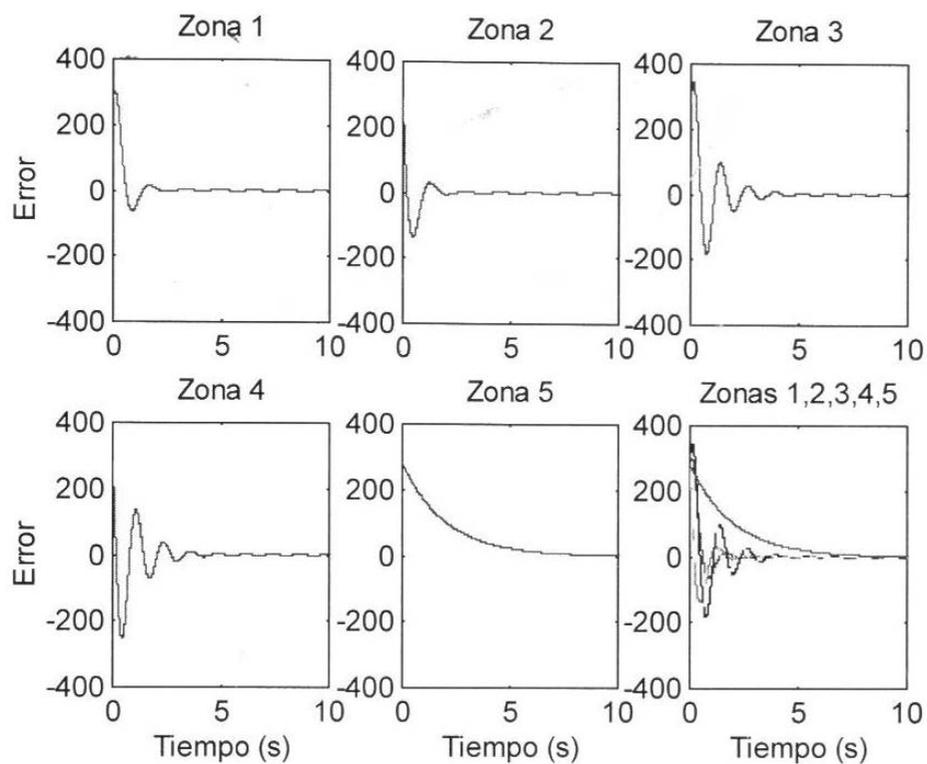


Fig. 5.7. Comportamiento de los errores ante la señal de la Fig. 5.1b.

5.4 APLICACIÓN DEL OBSERVADOR DE ESTADO EN TIEMPO REAL

En base a los resultados analizados anteriormente, se puede llegar a la conclusión de que el observador de estados desarrollado en este trabajo puede ser utilizado como un método indirecto para la verificación de los registros de temperatura de los equipos de medición.

Una vez implementado el observador en tiempo real, será posible establecer un registro histórico entre las temperaturas medidas y las estimadas del proceso; de esta

forma, una diferencia de cierta magnitud entre ambos registros sería señal de que uno de los equipos de medición está fallando, y requiere revisión.

De esta forma, las revisiones y recalibración de equipos de medición se realizarían solo en caso necesario, con lo cual se reducirían pérdidas originadas por el paro del proceso asociado al proceso de recalibración.

5.5 CONCLUSIONES DEL CAPITULO

En este capítulo se analizan los resultados de la validación del modelo matemático del extrusor, así como del comportamiento del observador de estados propuesto en esta tesis como un método indirecto para la verificación de los registros de temperatura de los equipos de medición asociados.

Para la validación del modelo del extrusor se simuló su respuesta ante dos situaciones, la pérdida de energía en las bandas calefactoras del extrusor y una acción de control encaminada a aumentar la temperatura del proceso. En ambas situaciones se observó una respuesta correcta del modelo, ya que se aprecian cambios de $1/40^{\circ}\text{C}$ por segundo, lo que coincide con la respuesta de un extrusor de plásticos real.

La respuesta del observador de estado se analizó también ante las mismas situaciones en que se validó el modelo del extrusor. En los resultados obtenidos se observa que la salida del observador converge a los valores de temperatura del modelo en forma apropiada cuando sus variables se inicializan en valor cero. El tiempo de respuesta del observador es menor a los 10 s, lo cual es bastante aceptable considerando que el proceso de extrusión de plásticos tiene asociadas constantes de tiempo muy grandes por tratarse de un fenómeno de transferencia de calor.

Adicionalmente, también se puede observar que el observador de estado se estabiliza antes de que se manifiesten cambios apreciables en las temperaturas del proceso, ya sean debido a una perturbación o acción de control, cualquiera que ésta sea.

Finalmente, y en base a los resultados obtenidos, se puede llegar a la conclusión de que el observador de estado desarrollado en esta tesis puede ser utilizado como un método indirecto para la verificación de los registros de temperatura en tiempo real, de un proceso de extrusión de plásticos.