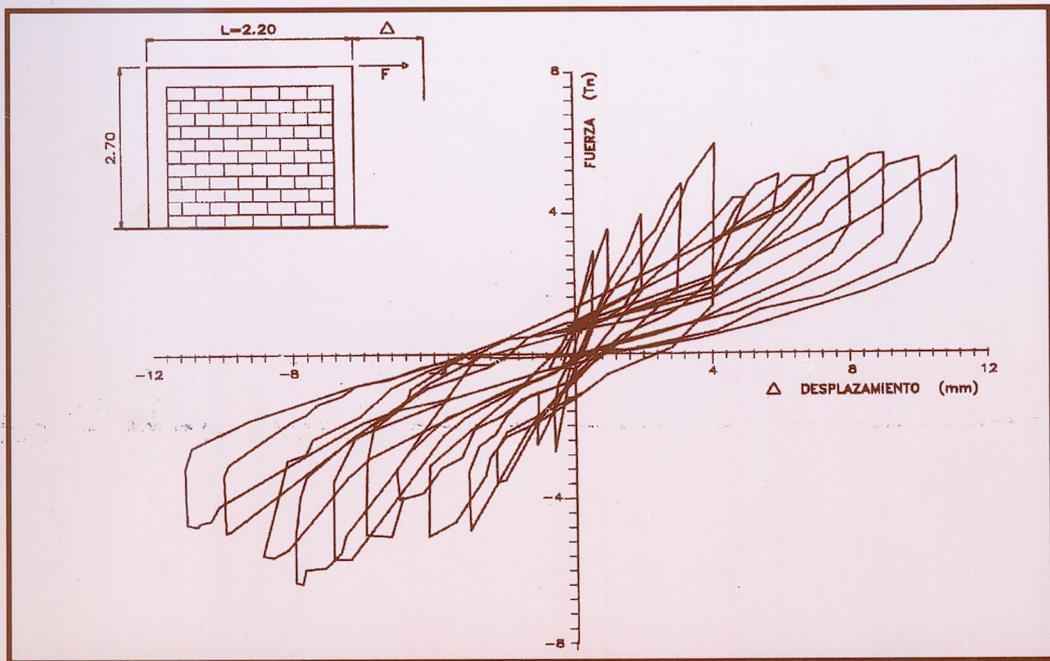


Ingeniería

Revista de la Universidad de Costa Rica
ENERO/JUNIO 1995 VOLUMEN 5 N° 1



Control Difuso de un Tren Eléctrico

Ing. Juan Carlos Rojas
M.Sc. Ismael Mazón

Resumen

En un experimento simulado se comparó el comportamiento de una estrategia clásica discreta y de una estrategia difusa para controlar la trayectoria de un tren eléctrico, utilizando un modelo matemático simplificado. Se encontró que el control difuso tiene un comportamiento muy similar al clásico bajo condiciones ideales, sin perturbaciones. Sin embargo, cuando ocurren perturbaciones significativas, el control difuso tiene una respuesta mucho mejor.

Summary

In a simulated experiment, a classic discrete control strategy and a fuzzy control strategy for the trajectory of an electric train were compared, using a simplified mathematical model. It was found that fuzzy control provides a behavior similar to classic control under ideal conditions without disturbances. But when there occur important disturbances, fuzzy control has a much better response.

1. Introducción

En este artículo se expone el diseño y resultados de un estudio sobre el comportamiento de un control difuso en un modelo simplificado de un tren eléctrico. Se comparó el resultado de un control clásico y uno difuso.

El objetivo de el artículo es mostrar que el control difuso es una opción competitiva para el control automático de sistemas lineales con alta perturbación. Todas las simulaciones presentadas se realizaron con Matlab[®].

2. El sistema

Un tren es un servomecanismo que se puede modelar como una masa g/w que es impulsada por una fuerza de propulsión proporcional a la referencia.

La aceleración resultante se puede derivar dos veces para obtener una medida de la posición. Así, el sistema se puede modelar como lo demuestra el gráfico # 1.

Las medidas de interés que se pueden obtener en un tren son la posición, velocidad y aceleración. Con base en estas tres mediciones se puede implementar la estrategia de control.

Se utilizará primero un control clásico, que tome una componente proporcional a cada una de las variables medidas y lo reste de la referencia. Luego se sustituirá por un control difuso que tenga como entradas a las tres variables indicadas.

El problema consiste en llevar el tren desde una posición inicial a una posición final d , sin superar nunca la velocidad máxima V_m , ni la aceleración máxima A_m , tanto en sentido positivo como negativo.

En el esquema de control clásico, según aparece en la figura 2, es necesario generar una trayectoria de referencia, que el sistema debe seguir sin error, pues un cambio brusco de referencia lleva a aceleraciones y velocidades muy grandes.

Para efectos de la simulación, se estimará que el tren pesa 90 000 kg. (aproximadamente 100 toneladas), y que la gravedad es de $9,8 \text{ m/s}^2$. Se asumirá que la propulsión es un motor lineal que con una corriente de entrada de 750 A. produce 180 kW., lo que se representa con una ganancia $k_2=240$. k_1 es la ampliación de la señal de control de 0 a 5 V., por lo que $k_1=300$.

El ancho de banda del sistema se observa en su diagrama de bode del sistema en lazo cerrado de la figura 3.

* Estudiante de Posgrado en Ingeniería Eléctrica U.C.R.

* Escuela de Ingeniería Eléctrica U.C.R.

El ancho de banda es aproximadamente 1,2 rad/s. Se deberá utilizar una frecuencia de 12 rad/s para tomar la acción de control digital. Esto es, se debe calcular la nueva salida cada 0,083 segundos. Para efectos de esta simulación, se realizará cada 0,08 segundos.

3. Solución mediante control clásico

Como se dijo anteriormente, se intentará controlar el servomecanismo con el esquema clásico, de la figura 2. Entre k_1 y k_2 se presenta una saturación en los actuadores.

La función de transferencia en lazo cerrado de este modelo es dada en el gráfico # 3.

Este sistema tiene dos integradores libres, por lo que tendrá un error en estado estacionario igual a cero para trayectorias tipo escalón y rampa, y será finito para una trayectoria tipo parábola.

Como la trayectoria a seguir tendrá partes uniformemente aceleradas, se deben escoger valores para las constantes de control k_3 , k_4 y k_5 , de tal manera que el sistema pueda seguir la trayectoria con el menor error posible.

Para lograr esto, se buscará que la respuesta ante un escalón sea lo más rápida posible, con poca sobreelongación.

Se procede a simular la respuesta ante una entrada escalón en $R(s)=U(s)$. Mediante ajuste empírico se encuentra que los mejores valores para k_3 , k_4 y k_5 son 0, 0,55 y 1,4 respectivamente. Las respuestas ante un escalón, una rampa, y una parábola se presentan en las figuras 4, 5 y 6.

Para utilizar este tipo de control en una ruta establecida, basta sólo con fijar una distancia a recorrer, una velocidad máxima, y una aceleración máxima. Entonces se genera una trayectoria en el tiempo que sea uniformemente acelerada hasta alcanzar la velocidad máxima, luego a velocidad uniforme, y luego uniformemente desacelerada hasta llegar al punto de destino. El sistema de control se encargará de seguir la trayectoria independientemente de las perturbaciones en el peso del tren, fricción y otros. Así, por ejemplo,

para recorrer una distancia de 1 000 metros, con una velocidad máxima de 28 m/s (100 Km/h), y con una aceleración máxima de 2 m/s², la trayectoria sería: uniformemente acelerado a 2m/s² durante 14 s., luego uniforme a 28 m/s durante 21,7 s., y luego uniformemente desacelerado a - 2m/s² durante 14 segundos. La trayectoria correspondiente, y la respuesta del sistema se presentan en la figura 7.

En las figuras 8 y 9 se presenta la velocidad y aceleración que sufrió el tren durante el recorrido. Como era de esperar, se la aceleración fue uniforme durante la primera parte del recorrido, luego disminuye a cero, y después es negativa durante la última parte del recorrido, para llegar al reposo.

Se analiza ahora la respuesta del control clásico cuando se introducen perturbaciones en las tres variables. El sistema es muy poco tolerante a perturbaciones, pues las intenta corregir con cambios bruscos en la corriente que aplica al motor, lo que representa cambios bruscos en la aceleración. Si se le impone una saturación de los actuadores igual a 150 A., lo que limita la aceleración a ± 4 m/s²., el sistema tolera perturbaciones de hasta 0,1% con una respuesta aceptable. Ante perturbaciones del 0,5% se observa que la respuesta tiene sobreelongaciones muy grandes, lo que es totalmente inconveniente en un tren de pasajeros. Además, la aceleración tiene cambios muy violentos entre sus extremos positivo y negativo.

4. Solución mediante control difuso

Se propone sustituir el control clásico por uno difuso, que tome la decisión de cuánta corriente aplicar a la propulsión, con base en la posición, velocidad y aceleración del tren, dada la distancia a recorrer, la velocidad máxima, y la aceleración máxima. El sistema propuesto se muestra en la figura #13.

La primera etapa consiste en convertir los valores precisos de la posición, velocidad y aceleración a un universo difuso. Para esto, se divide cada variable en etiquetas, y se definen las funciones de

pertenencia. Se usarán funciones de pertenencia triangulares.

Para la posición en el recorrido se diferenciará entre cinco posibilidades: comenzando, poco, bastante, terminando y pasado. El universo de discurso está definido en función de la distancia a recorrer d .

Para la velocidad, se distinguirá entre detenido, lento, bien y rápido. De nuevo, el universo está en función de V_m (velocidad máxima). Para la aceleración, se determinará si es mucha negativa, poca negativa, mucha positiva, poca positiva, o ninguna. En esta escala, A_m es el valor máximo de la aceleración.

También se etiqueta el universo de salida, que es la variable corriente. Se reconocen siete etiquetas: fuerte positivo, medio positivo, poco positivo, cero, poco negativo, medio negativo y fuerte negativo. Las funciones de pertenencia son de tipo singleton. I_m representa la máxima corriente que se le puede alimentar al motor.

Sobre los traslapes, se comprueba que cada punto de cada universo de discurso pertenece a una o dos funciones de pertenencia, lo que es recomendado.

Se establece la estrategia de control como un conjunto de reglas:

1. Si comenzando recorrido entonces poco+.
2. Si poco recorrido y lento y ninguna o poca aceleración + entonces fuerte+.
3. Si terminando recorrido velocidad bien entonces medio -.
4. Si pasado del recorrido entonces medio -.
5. Si terminando recorrido y detenido entonces medio +.
6. Si terminando recorrido y lento entonces poco -.

Para calcular el valor preciso de la salida se utiliza el método singleton, con cinco etiquetas de salida.

En una simulación sin perturbaciones el sistema sigue una trayectoria muy similar a la del sistema de control clásico.

La velocidad del tren a lo largo del recorrido se mantiene bajo la velocidad máxima, y se suavizan los cambios de velocidad.

Es interesante observar que la aceleración se mantiene confortable a lo largo del recorrido. La aceleración máxima recomendada es $2m/s^2$.

Cuando se introducen perturbaciones, la respuesta del sistema es siempre suave, pero tiende a tener error en estado estacionario. Hasta perturbaciones del 0,5%, se llega a obtener una respuesta bastante buena, sin sobreelongaciones, pero con una corrección final de la posición lenta. Para perturbaciones más grandes, no se logra corregir el error de posición.

5. Conclusiones y recomendaciones

El control difuso ha mostrado ser una opción adecuada para el problema del control de posición, velocidad y aceleración de un tren.

A pesar de que el sistema estudiado es perfectamente lineal, y el control difuso se recomienda para sistemas no-lineales o con comportamientos especiales, en este caso brinda una ventaja sobre el esquema clásico de control: evita tener que calcular la trayectoria de la referencia.

Al control difuso le toma casi el mismo tiempo en alcanzar la distancia de destino que el control clásico, tanto con o sin perturbaciones. Tiene la ventaja de que suaviza los cambios de velocidad, mientras que el clásico no.

El sistema bajo control difuso resulta ser más tolerante a perturbaciones que bajo control clásico. Mientras que para seguir la referencia, el control clásico presenta cambios bruscos de aceleración y sobreelongaciones en la posición, el control difuso siempre mantiene cambios suaves de aceleración.

La corrección del error en estado estacionario del control difuso resultó ser lenta, y del todo no

corrige para perturbaciones muy altas, pero esto puede mejorarse al agregar nuevas reglas y afinar más las reglas existentes y las funciones de pertenencia.

El sistema difuso es extensivo en cálculos, aún cuando se utilizó el método singleton para las salidas, que es más sencillo que el método del centroide.

Para implementarlo en un controlador a tiempo real se requiere de un procesador bastante poderoso. Por su parte, el control clásico no requiere de muchos cálculos, pero necesita del cálculo de las trayectorias de referencia, que puede ser bastante extensivo en cálculo.

Sobre el proceso de diseño hay que admitir que se debe dedicar más tiempo al esquema difuso de control que al clásico, pues se necesita definir todas las funciones de pertenencia y las reglas. Pero por otra parte, el diseño difuso permite un ajuste más rápido, pues tiene más parámetros que se pueden ajustar, incluyendo las funciones de pertenencia y las reglas, lo que le permite al diseñador realizar ajustes mucho más variados que lo que se puede hacer en un control clásico.

La simulación del control difuso es un poco más complicada que la del control clásico, pues requiere programar todas las funciones de pertenencia y reglas, y evaluarlas para cada intervalo de tiempo.

La ejecución de la simulación del control difuso dura unas cuatro veces más que la del control clásico incluyendo el cálculo de la trayectoria, por la cantidad de cálculos complejos que debe realiza.

Para este ejemplo se utilizó una cantidad mínima de reglas que solucionan el problema. Para aplicarlo a un ejemplo real, habría que considerar casos diferentes derivados de las perturbaciones reales.

En futuros análisis se puede introducir perturbaciones en la inercia, lo que simula el cambio de peso que sufrirá el tren con el cambio de pasajeros y fricción.

Por otra parte, muy interesante sería realizar un análisis de sensibilidad del control difuso con respecto a los diferentes parámetros, para darse una mejor idea de la robustez del sistema de control.

6. Bibliografía

1. Mazón, Ismael. Notas del curso: Teoría Moderna de Control Automático. Universidad de Costa Rica, primer semestre de 1995.
2. Haber, Rodolfo. Control Borroso. Cuadernos de Informática y Automática, 1era. jornada centroamericana de automática e informática. Set. 1994.
3. Cipriano, Aldo y Ramos, María Elena. Sistemas Expertos Difusos: Fundamentos y Aplicaciones. Cuadernos de Informática y Automática, 1era. jornada centroamericana de automática e informática. Set. 1994.
4. Tzafestas, Spyros y Papanikolopoulos, Nikolaos. Incremental Fuzzy Expert PID Control. IEEE Transactions on Industrial Electronics. Vol. 37, No. 5. Oct. 1990.
5. Cipriano, Aldo; Ramos, María Elena y Guarini, Marcelo. Comparación de Algoritmos de Identificación de Modelos Borrosos. Anales del III Seminario sobre Identificación de Sistemas. Estimación de Parámetros y Control Adaptivo. Chile, Set. 1993.
6. Chien-Lee, Chuen. Fuzzy Logic in Control Systems: Fuzzy Logic Controller. IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, Vol. 20, No. 2, Mar./Abr. 1990.
7. Takagi, Tomohiro y Sugeno, Michio. Fuzzy Identification of Systems and Its Applications to Modeling and Control. IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics. Col. SMC-15, No. 1, Ene. 1985.

FIGURAS

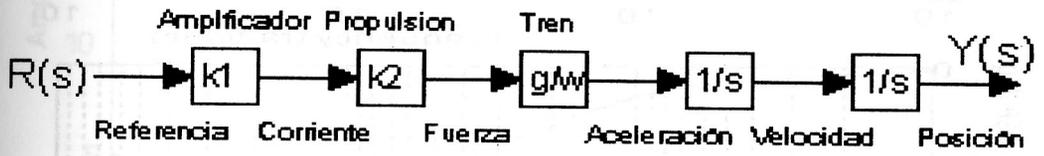


Figura 1: Modelo del sistema

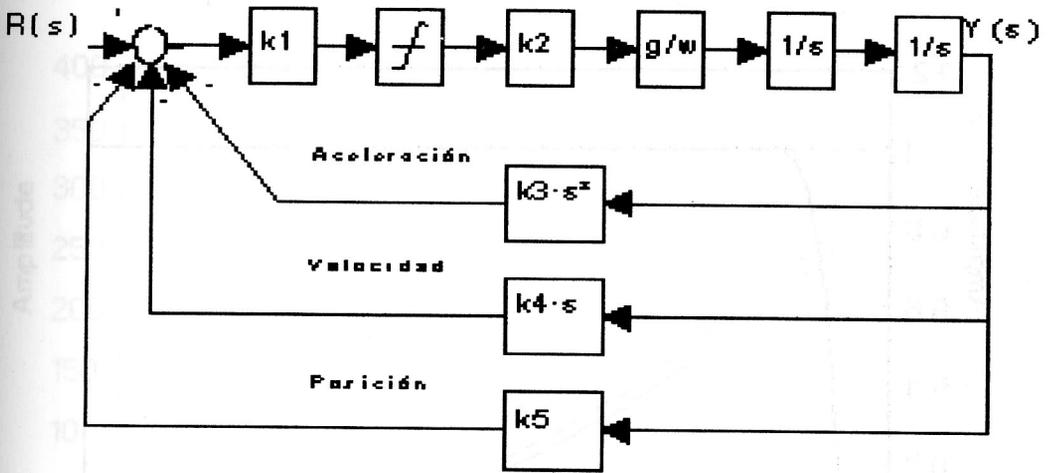


Figura 2: Control clásico

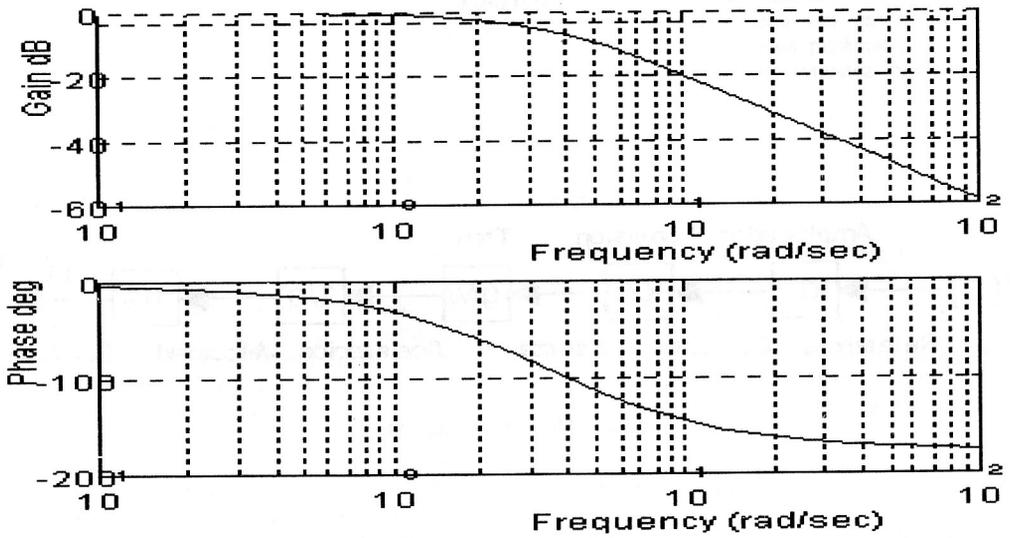


Figura 3: Diagrama de bode del sistema en lazo cerrado.

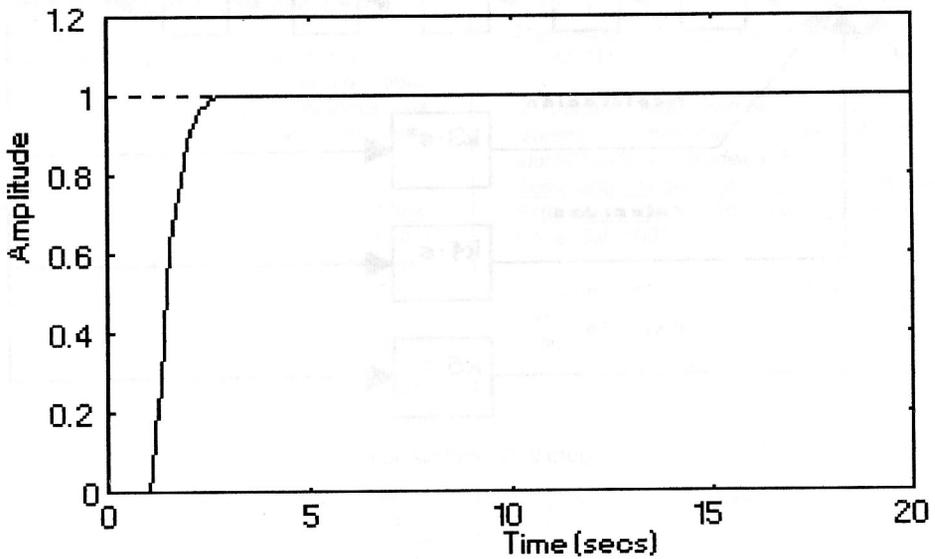


Figura 4: Respuesta al escalón del control clásico

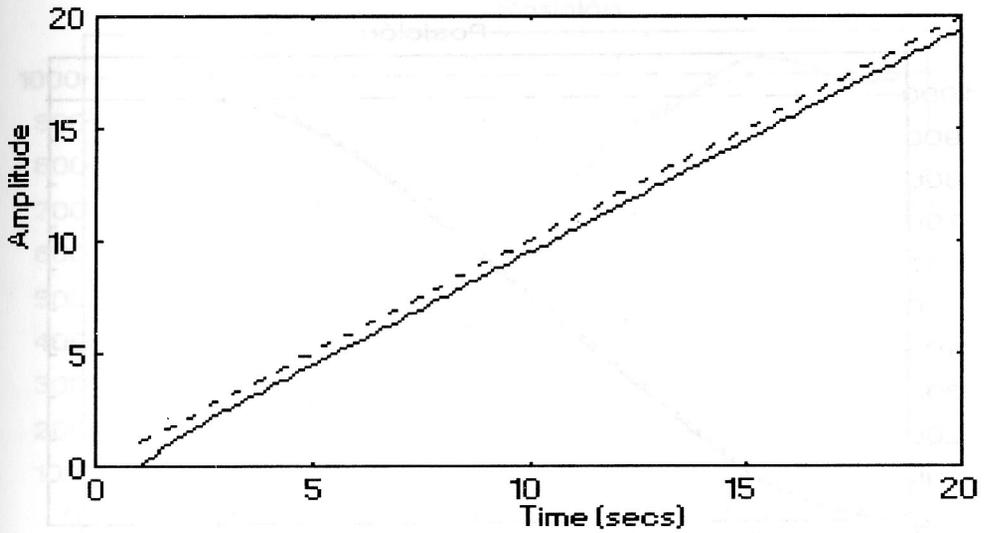


Figura 5: Respuesta a una rampa del control clásico

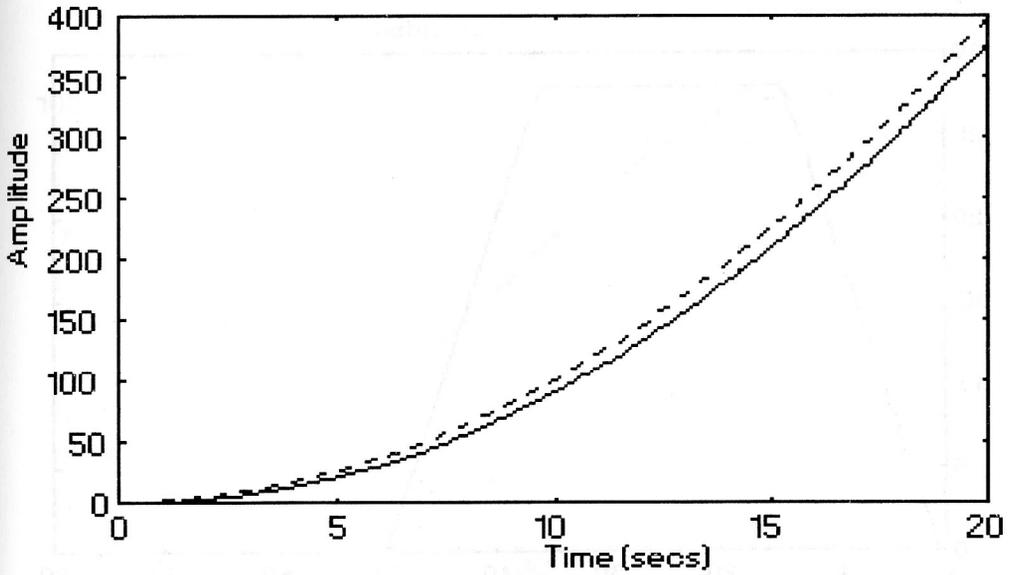


Figura 6: Respuesta ante una parábola del control clásico

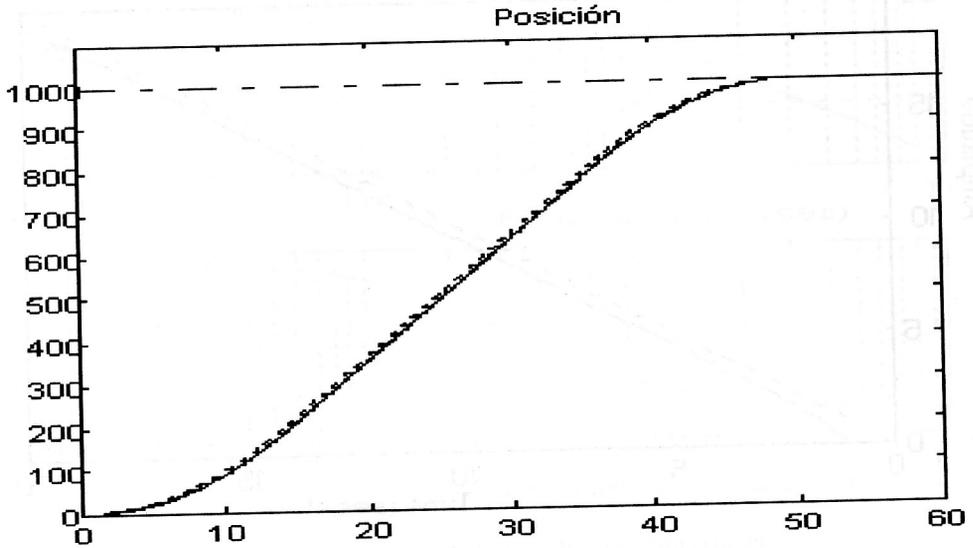


Figura 7: Trayectoria generada y respuesta de la posición del tren bajo control clásico sin perturbaciones.

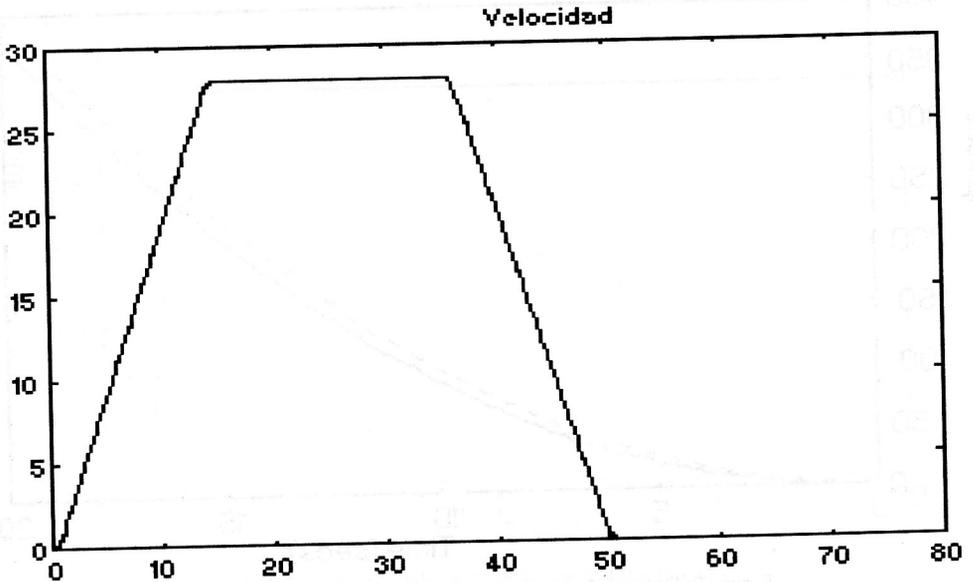


Figura 8: Velocidad del tren durante el recorrido bajo control clásico sin perturbaciones.

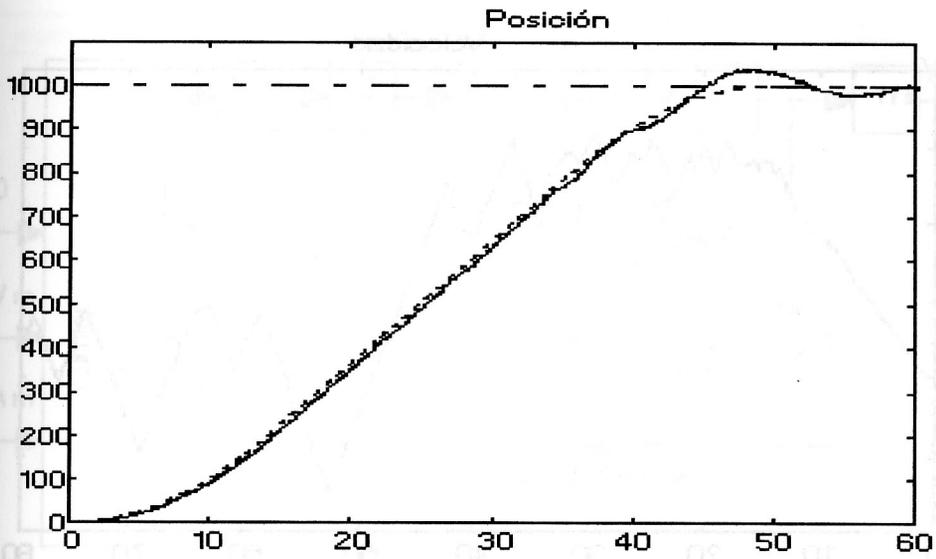


Figura 9: Aceleración del tren durante el recorrido bajo control clásico sin perturbaciones.

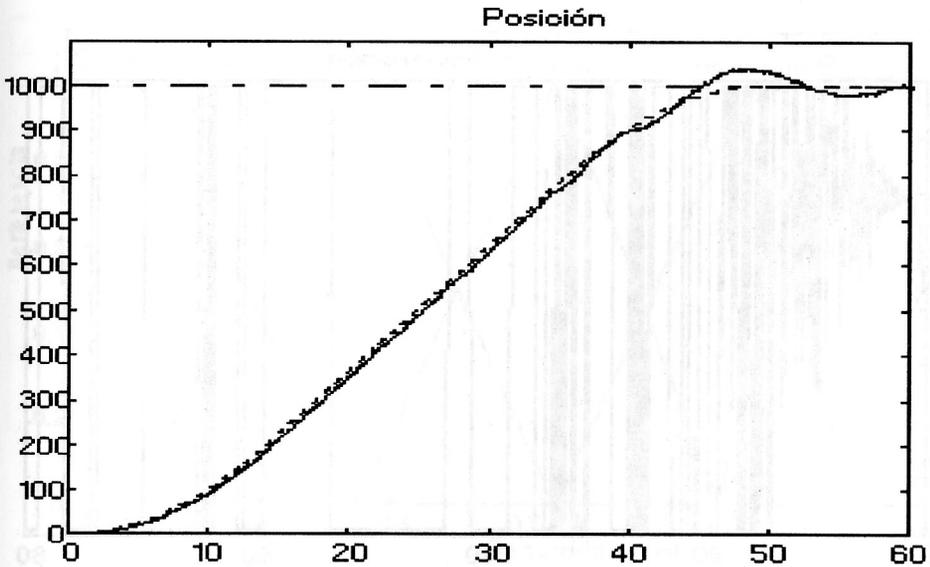


Figura 10: Recorrido del tren bajo control clásico con perturbaciones del 0,5%.

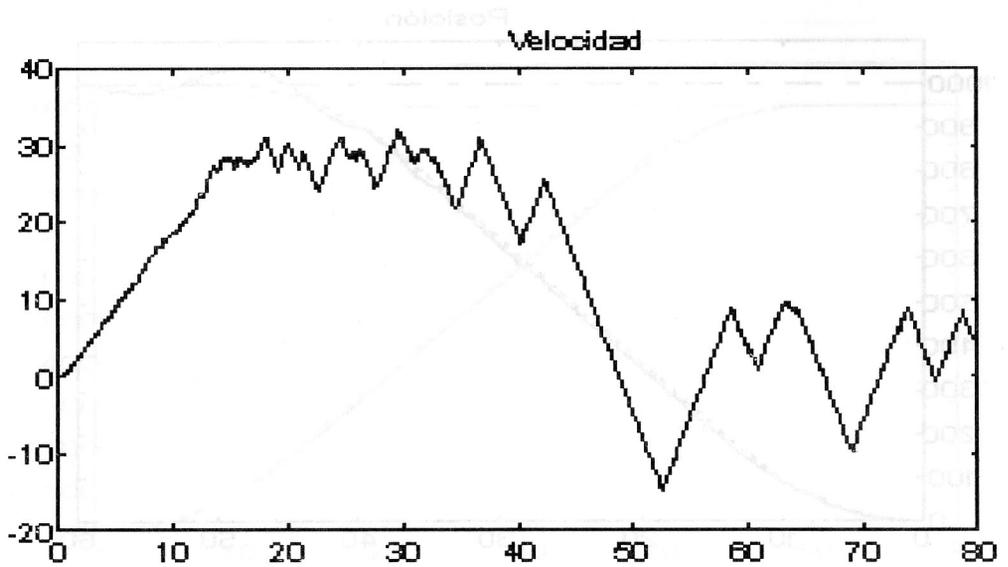


Figura 11: Velocidad del tren bajo control clásico, con perturbaciones del 0,5%.

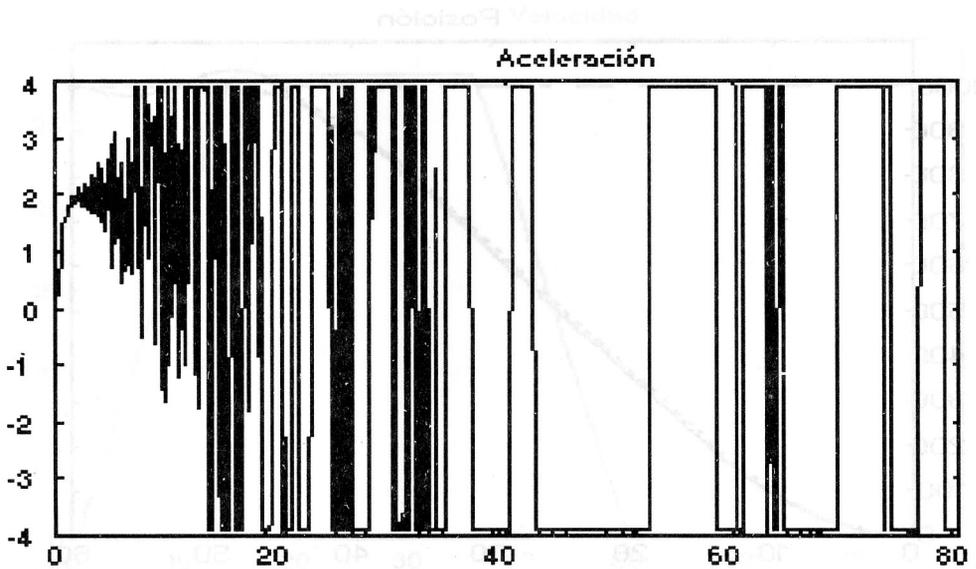


Figura 12: Aceleración del tren bajo control clásico, con perturbaciones del 0,5%.

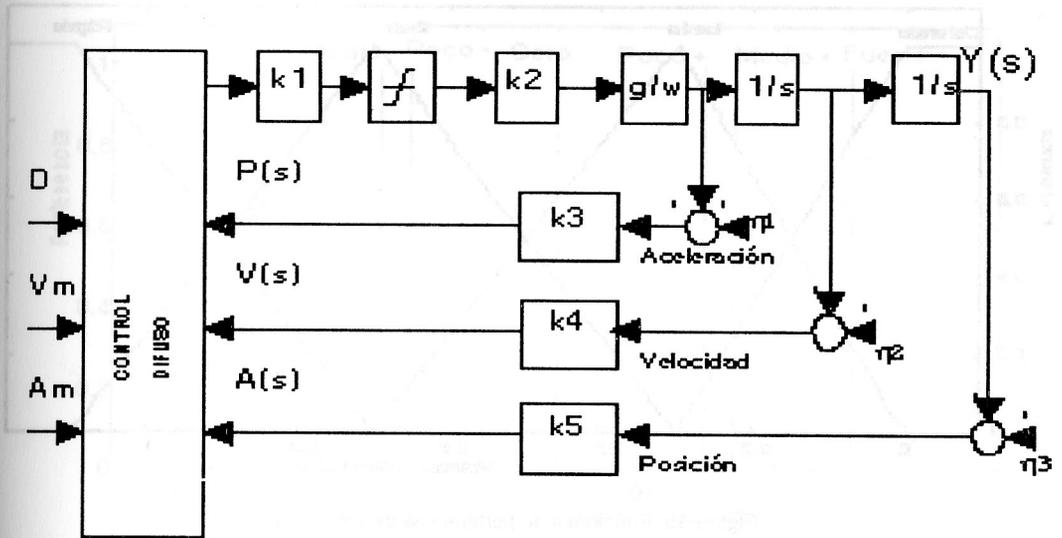


Figura 13: Esquema de control difuso

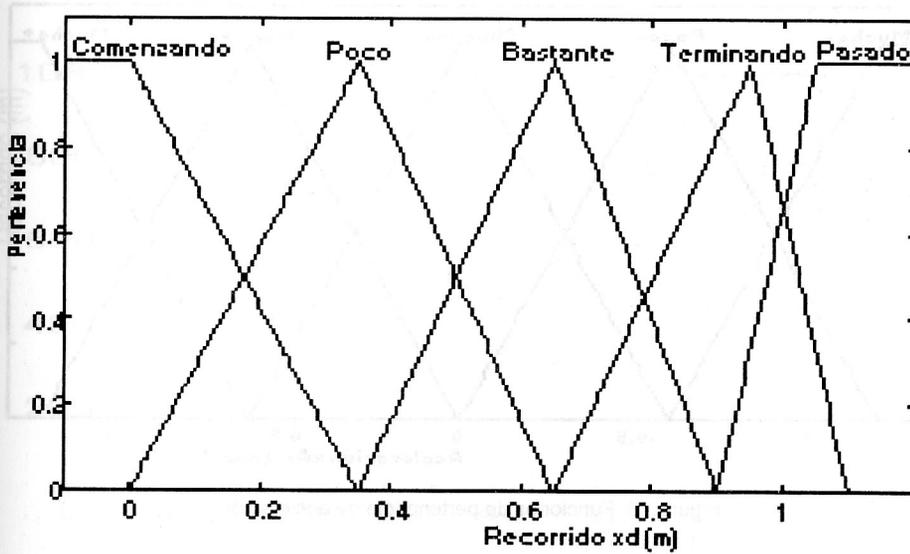


Figura 14: Funciones de pertenencia de recorrido

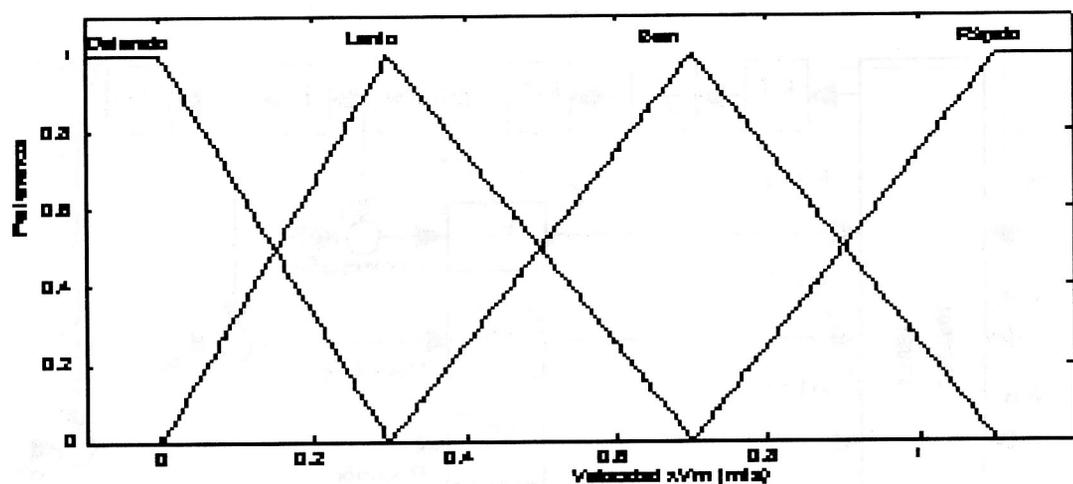


Figura 15: Funciones de pertenencia de velocidad

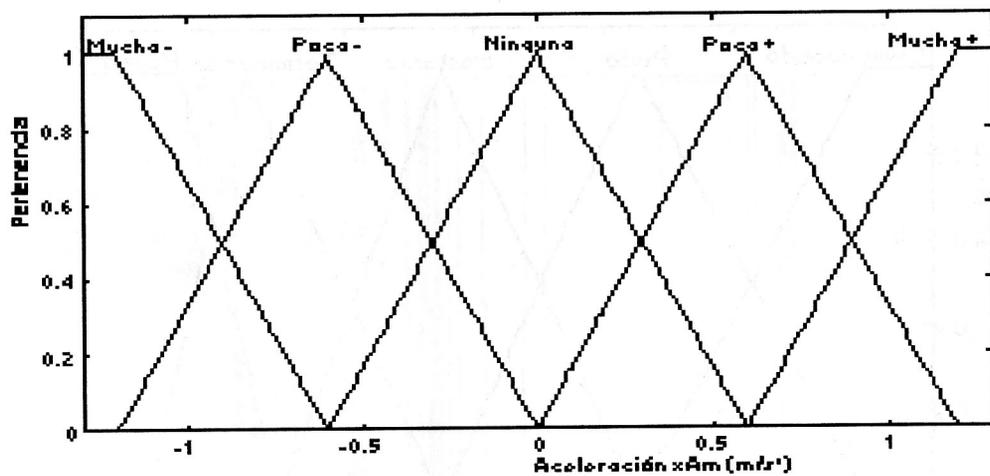


Figura 16: Funciones de pertenencia de aceleración

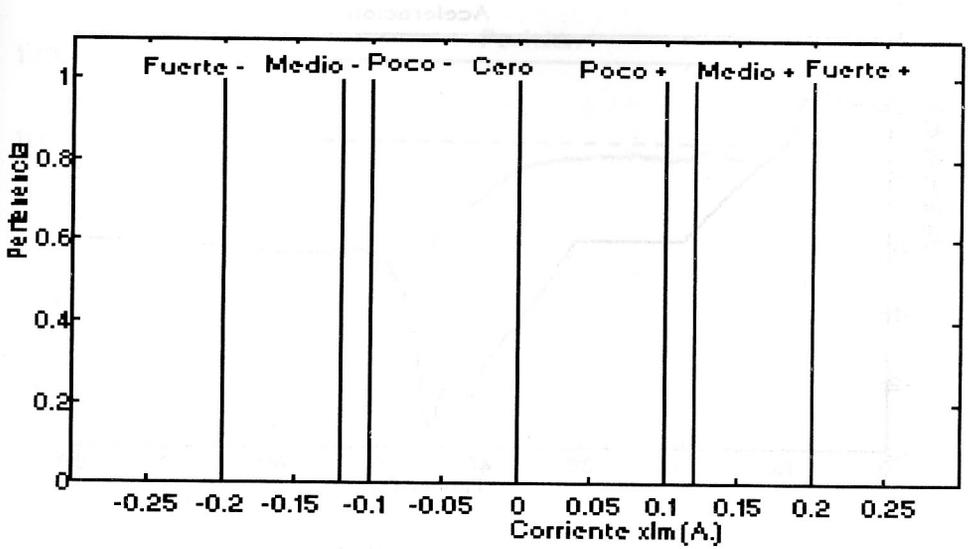


Figura 17: Funciones de pertenencia de la salida

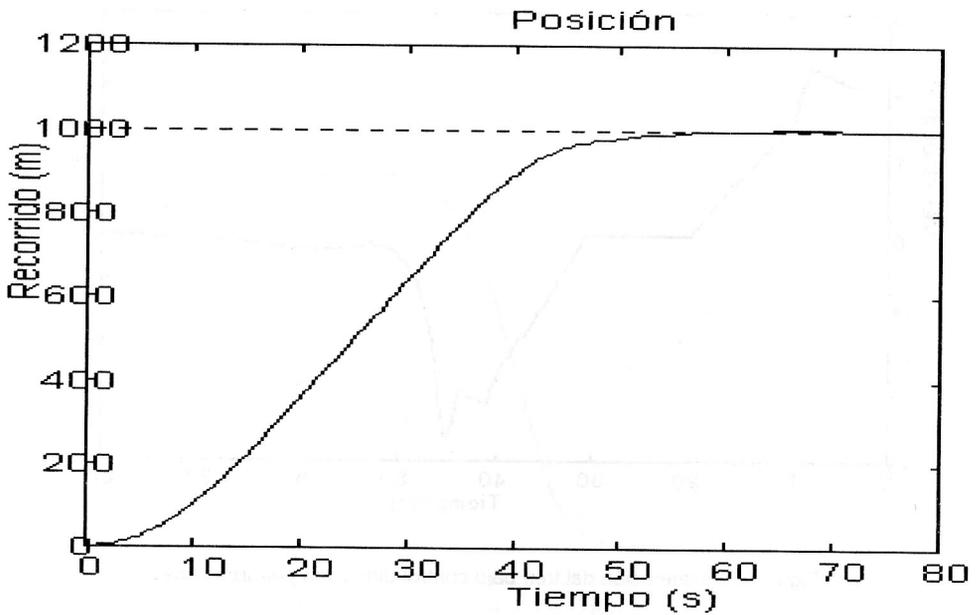


Figura 18: Recorrido del tren bajo control difuso, sin perturbaciones.

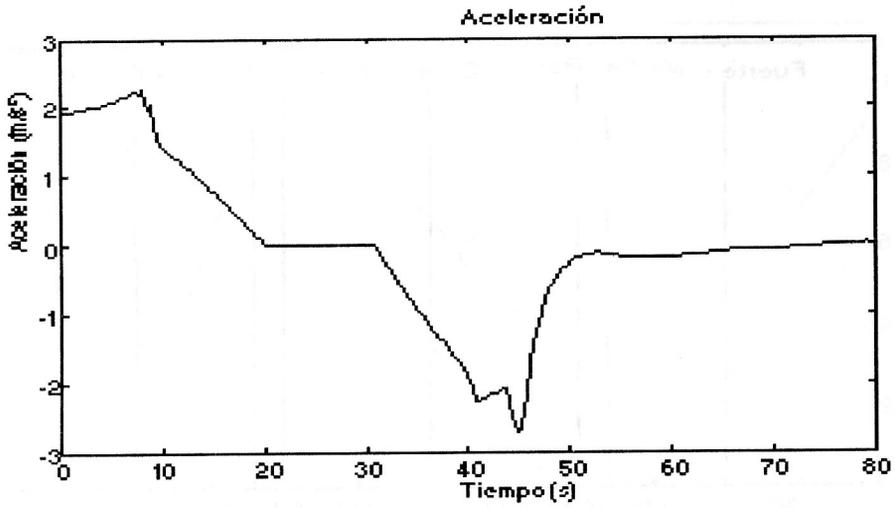


Figura 19: Velocidad del tren bajo control difuso sin perturbaciones.

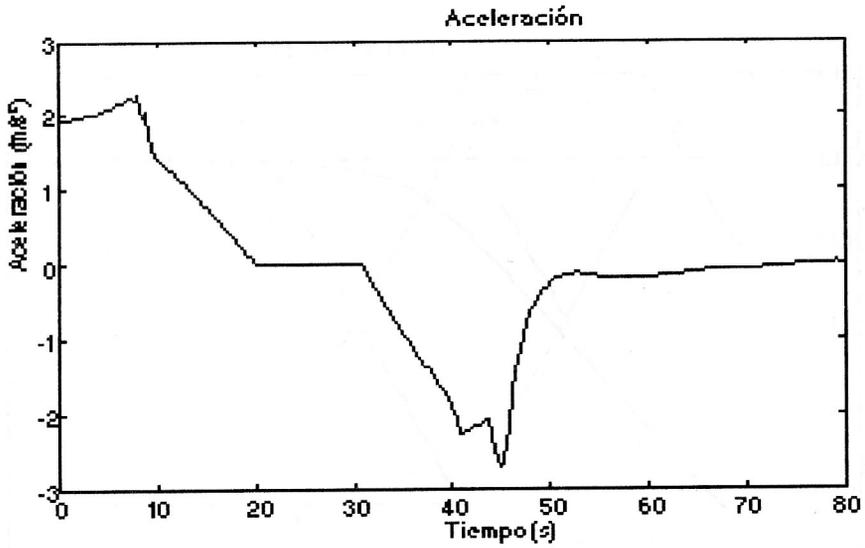


Figura 20: Aceleración del tren bajo control difuso sin perturbaciones.

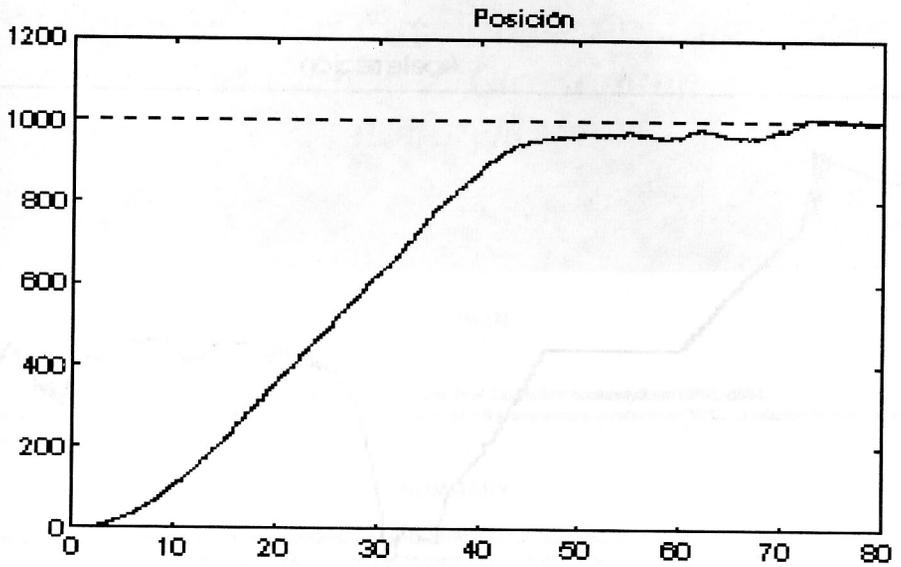


Figura 21: Recorrido del tren bajo control difuso, con perturbaciones del 0,5%,

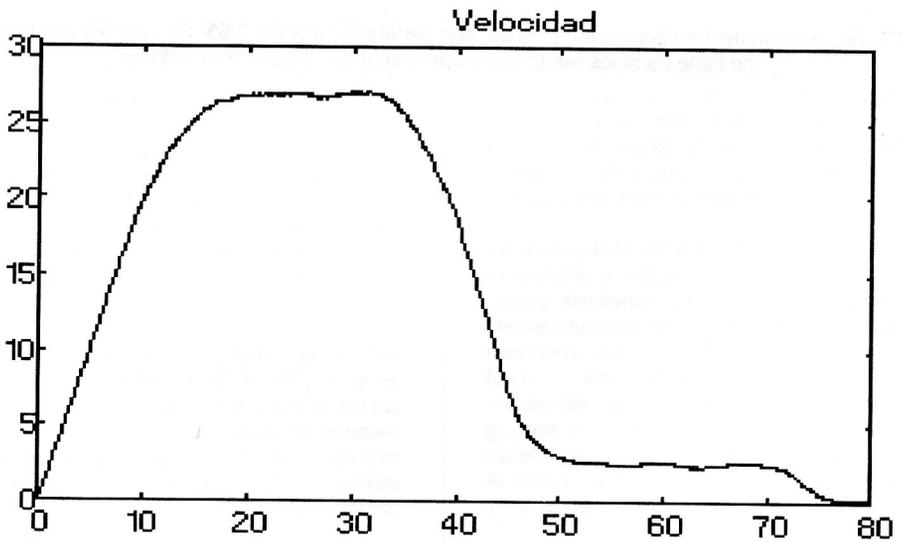


Figura 22: Velocidad del tren bajo control difuso con perturbaciones del 0,5%.

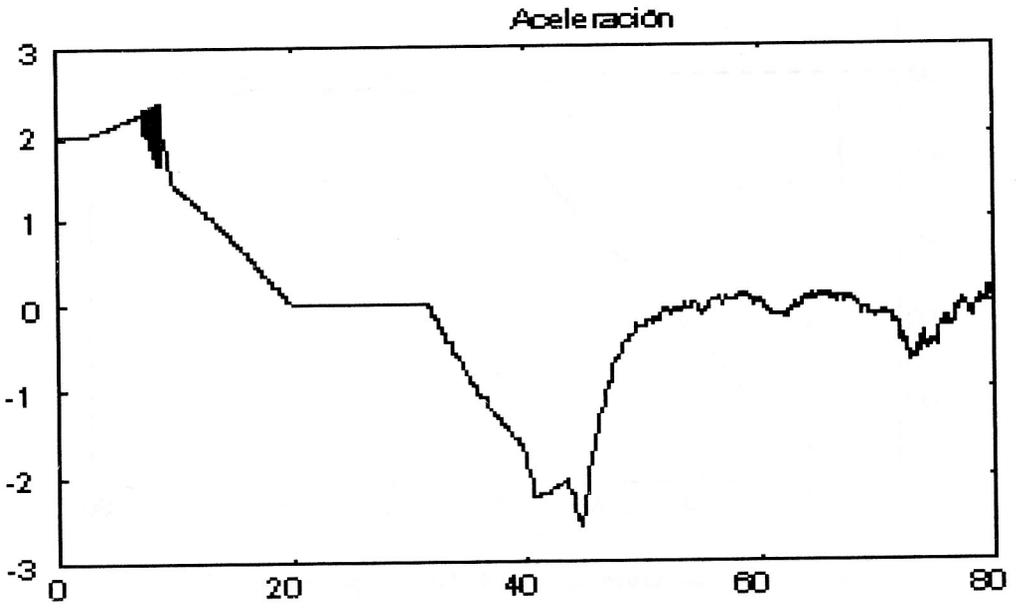


Figura 23: Aceleración del tren bajo control difuso, con perturbaciones del 0,5%. Se observa que la aceleración no tiene cambios tan bruscos como en el caso del control clásico.