



MX0500370

Consideraciones prácticas para la implantación de un algoritmo de control difuso en un DSP

Pérez Clavel Benjamín, Benítez Read Jorge Samuel¹, Pacheco Sotelo Joel O.

Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares, Gerencia de Ciencias Aplicadas

Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez, Instituto Tecnológico de Toluca

Km. 36.5 Carretera México – Toluca Municipio de Ocoyoacac, Edo. de México, C.P. 52045

Resumen

Se presenta el desarrollo de un sistema digital basado en un DSP para implantar un algoritmo de control difuso tipo Mamdani cuyo objetivo es regular la potencia neutrónica en un reactor nuclear de investigación tipo TRIGA Mark III.

Se realizan simultáneamente las etapas de agregación y desfusificación discretizando el universo de la variable de salida. Se utiliza el formato MPF para el manejo del punto flotante en las operaciones aritméticas.

1 Introducción

Los procesadores digitales de señales (DSP por sus siglas en inglés) están diseñados para realizar operaciones matemáticas en forma eficiente [1].

Se han explorado en los últimos años formas de control tales como la lógica difusa y las redes neuronales [2]. Este auge se ha debido a la versatilidad que presenta la lógica difusa para incorporar conocimiento basado en la experiencia de operadores o extraído de modelos empíricos, en el diseño de controladores. En los reactores de investigación tipo TRIGA Mark III [3], las variables comúnmente utilizadas para el control del mismo, son la desviación de la potencia instantánea con respecto a la potencia base demandada (error en potencia ne) y el período del reactor (T). La señal obtenida del controlador representa la pendiente de la reactividad externa (m_{pext}). Este último valor se utiliza para calcular la cantidad de reactividad que se debe insertar en el núcleo del reactor para incrementar o reducir la intensidad del flujo neutrónico. El propósito de este proyecto es desarrollar un controlador basado en un DSP, implantando en dicho sistema un algoritmo basado en la lógica difusa para la regulación de potencia en un modelo de la cinética puntual de un reactor nuclear TRIGA Mark III [4].

2 Metodología

Como parte del proyecto se definen: (a) Las variables de entrada al sistema de control, (b) la señal de control entregada por el DSP, (c) el formato numérico utilizado para el manejo de datos en punto flotante, (d) el algoritmo de control difuso, y (e) la forma de implantar el algoritmo en el sistema DSP.

2.1 Manipulación numérica MPF

Se desarrolló una representación propia del manejo de números de punto flotante, llamada "Movimiento de Punto Flotante" o MPF.

Existe una notación general para la representación de cualquier número en el formato de punto flotante como lo muestra la siguiente ecuación, donde f es la fracción o mantisa, b es la base y e es un entero positivo o negativo llamado exponente [1]:

$$n = f * b^e$$

Un número entero también se puede representar en una notación de punto flotante, es decir, en notación de mantisa y exponente, ambos con signo como en el siguiente ejemplo:

$$-110 = -1100 \times 10^{-1}$$

Para el caso de números de punto flotante, el punto puede ser recorrido de tal forma que la mantisa sea entera como en el siguiente caso:

$$0.125 = 125 \times 10^{-3}$$

En la lógica difusa se utilizan números fraccionarios para los grados de membresía. Si se utiliza el corrimiento del punto, se puede programar el algoritmo de control difuso haciendo operaciones con números enteros en vez de hacer rutinas para punto flotante e implantar el algoritmo de control en el DSP.

2.2 Implantación del algoritmo en el DSP

Tomando el algoritmo de control original [5], se tienen tres etapas para el controlador difuso: la difusificación, la evaluación de reglas, y la agregación y desdifusificación.

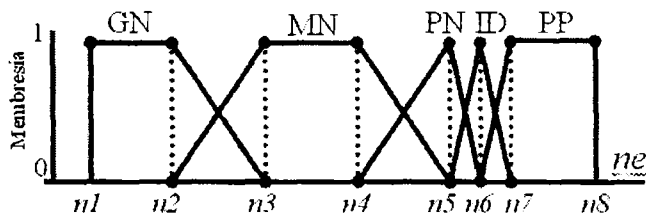


Figura 1.- Conjuntos asociados a la variable ne .

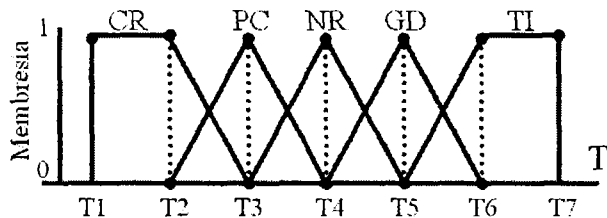


Figura 2.- Conjuntos asociados a la variable T .

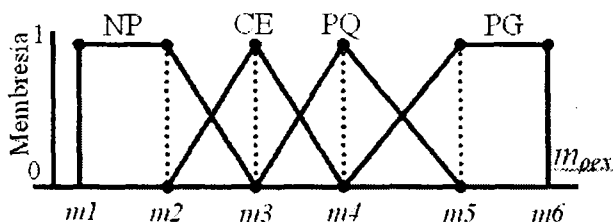


Figura 3.- Conjuntos asociados a la variable m .

El algoritmo recibe las variables de entrada ne y T y entrega la señal de salida m_{pext} . Para la difusificación de la

entrada ne se utilizan los conjuntos mostrados en la figura 1, en donde $n1=-1100 \times 10^{-1}$, $n2=-995 \times 10^{-1}$, $n3=-600 \times 10e^{-1}$, $n4=-400 \times 10^{-1}$, $n5=-1000 \times 10^{-3}$, $n6=0$, $n7=1000 \times 10^{-3}$, y $n8=1000 \times 10^{-2}$.

Los conjuntos utilizados para la entrada T se presentan en la figura 2, en donde $T1=0$, $T2=350 \times 10^2$, $T3=1 \times 10^1$, $T4=100 \times 10^2$, $T5=10 \times 10^4$, $T6=10 \times 10^6$, y $T7=1000 \times 10^6$.

La señal de salida m_{pext} con los conjuntos que se muestran en la figura 3 donde $m1=-200 \times 10^{-4}$, $m2=-100 \times 10^{-4}$, $m4=0$, $m5=100 \times 10^{-4}$, $m6=300 \times 10^{-4}$, $m7=400 \times 10^{-4}$.

2.2.1 Difusificación

Esta etapa consiste en determinar los grados de membresía en los conjuntos difusos, para los valores de las variables de entrada que recibe el DSP.

Las etiquetas lingüísticas para la variable ne son GN (grande negativo), MN (mediano negativo), PN (pequeño negativo), ID (ideal) y PP (pequeño positivo; para la variable T son: CR (crítico), PC (poco crítico), NR (normal), GD (grande) y TI (tiende a infinito).

Utilizando el formato MPF, los intervalos deben cambiar de formato respecto a los conjuntos difusos originales [5], cambiándolos como se muestra en las tablas 1 y 2.

Tabla 1.-Modificación para los intervalos de ne	
Rango de ne	Formato de rango requerido de ne
$-110 \leq ne \leq -99.5$	$-1100e-1 \leq ne \leq -995e-1$
$-99.5 < ne \leq -60$	$-995e-1 < ne \leq -600e-1$
$-60 < ne \leq -40$	$-600e-1 < ne \leq -400e-1$
$-40 < ne \leq -1$	$-400e-1 < ne \leq -10e-1$
$-1 < ne < 0$	$-1000e-3 < ne \leq 0000e-3$
$0 < ne \leq 1$	$0000e-3 < ne \leq 1000e-3$
$1 < ne \leq 10$	$100e-2 < ne \leq 1000e-2$

Los grados de membresía para las variables de entrada ne y T son determinados a partir de los siguientes pasos:

1. Determinar el intervalo en el cual se encuentra la variable de entrada.

2. Una vez determinado dicho intervalo, se obtiene el o los grados de membresía de los conjuntos difusos mediante las ecuaciones de las rectas que se encuentren entre dichos intervalos.

3. Se guardan los valores de membresía para utilizarlos en la siguiente etapa del algoritmo.

Rango de T	Formato de rango requerido de T
$0 \leq T \leq 3.5$	$000e-2 \leq T \leq 350e-2$
$3.5 < T \leq 10$	$350e-2 < T \leq 1000e-2$
$10 < T \leq 10e+3$	$1e+1 < T \leq 1000^e+1$
$10e+3 < T \leq 100e+3$	$100e+2 < T \leq 1000e+2$
$100e+3 < T \leq 10e+6$	$10e+4 < T \leq 1000e+4$
$0^e+6 < T \leq 1e+9$	$10e+6 < T \leq 1000e+6$

Para determinar el grado de membresía se utiliza la ecuación de la recta correspondiente modificada de acuerdo al formato MPF. Como ejemplo, se puede tomar la siguiente ecuación de difusificación:

$$GN = 1 + \left[\frac{-1}{39.5} \times (ne + 99.5) \right]$$

Donde ne es el valor del error de potencia que es procesado por el controlador difuso. Haciendo la división se obtiene:

$$GN = 1 + \left[(-0.0259) \times (ne + 99.5) \right]$$

Aplicando el formato MPF y ajustando exponentes se obtiene:

$$GN = 10000 \times 10^{-4} - \left[(25 \times (ne + 995) \times 10^{-4}) \right]$$

De esta última ecuación, se puede ver que el resultado tendrá un exponente $e=-4$; para todas las demás operaciones de difusificación se busca que el resultado tenga de igual forma un exponente $e=-4$. Con esto se logra que todas las operaciones sean de tipo entero e incluso a partir de aquí no tomar en cuenta el exponente de los resultados.

2.2.2 Evaluación de reglas

La etapa de evaluación de reglas (ver Tabla 5) determina los grados de activación de cada uno de los conjuntos difusos asociados a la variable de salida (m_{ext}).

Las etiquetas lingüísticas utilizadas para la variable m_{ext} son NP (negativo pequeño), CE (cero), PQ (positivo pequeño) y PG (positivo grande). En la tabla 3 se observa que cada cuadro es la intersección de dos conjuntos de entrada y en cada cuadro existe un conjunto de la variable de salida.

Tabla 3.- Tabla de evaluación de reglas m_{ext}

		GN	MN	PN	ID	PP	
T	CR	CE	CE	CE	CE	NP	m_{ext}
	PC	PQ	PQ	PQ	CE	NP	
	NR	PG	PG	PQ	CE	NP	
	GD	PG	PG	PQ	CE	NP	
	TI	PQ	PG	PQ	CE	NP	

Para determinar el grado de activación de cada conjunto de salida se sigue el procedimiento siguiente:

1. Para cada posición de los conjuntos de la variable de salida (ver figura 3), se toma como su grado de activación el valor más pequeño de los grados de membresía de los conjuntos de las variables de entrada que forman dicha intersección.

2. Una vez que se tienen los grados de activación de todas las intersecciones posibles que correspondan a un solo conjunto difuso de salida, se toma el máximo valor de ellos como el grado de activación de la variable de salida de ese conjunto difuso en particular.

3. Estos pasos se realizan para cada conjunto difuso de la variable de salida y se guardan en memoria las activaciones obtenidas para cada conjunto de la variable de salida.

2.2.3 Agregación y desdifusificación

La agregación y desdifusificación se han combinado. La desdifusificación se lleva a cabo con el método del centro de gravedad (cog). Como resultado se obtiene el valor de la pendiente que debe tener la señal de reactividad externa aplicada al reactor como señal de control. Un ejemplo de un conjunto agregado de salida arbitrario se muestra en la figura 4.

El universo de la variable de salida es discretizado. El intervalo de valores de la variable de salida es $[-200 \times 10^{-4}, 400 \times 10^{-4}]$. Para utilizar números enteros, el incremento debe ser unitario para el barrido del universo de m_{pext} obteniéndose así 600 muestras posibles.

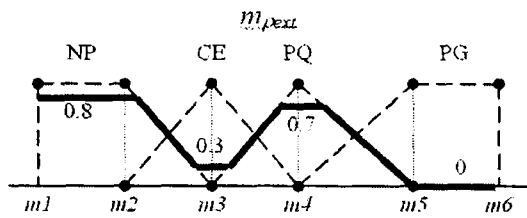


Figura 4.- Ejemplo de conjunto agregado.

Una vez determinado el incremento de m_{pext} se obtiene el valor del cog mediante la siguiente ecuación:

$$COG = \frac{\sum_{i=-0.02}^{0.04} m_i * \mu(m_i)}{\sum_{i=-0.02}^{0.04} \mu(m_i)} = \frac{num}{den}$$

Donde m_i es el valor de pendiente en el recorrido que se realiza y (m_i) es la altura del conjunto agregado para el valor de m_i .

Al igual que en la difusificación, se toman intervalos para determinar la ecuación de la recta que debe tomarse en cuenta como puede verse en la figura 3.

De acuerdo con el incremento determinado, se comienza a recorrer por todo el universo de la variable m_{pext} . Cada valor de m_{pext} es comparado para determinar el intervalo en el que se encuentra. El proceso de agregación y desfusificación se hace en forma simultánea de la siguiente forma:

1. Si m_{pext} está dentro de un intervalo en el cual solo hay una recta, se toma la activación del conjunto de salida de dicho intervalo y posteriormente se guarda para los cálculos posteriores (en caso contrario se dirige al paso 2).

2. Si m_{pext} está dentro de un intervalo en el cual hay dos rectas que pertenecen a dos conjuntos de salida se deben comparar los siguientes casos (tomando como ejemplo los conjuntos NP y CE de la figura 5):

a) Decidir si la altura del conjunto agregado, considerando exclusivamente al conjunto NP, es igual al corte (0.8) o es igual a la altura de la recta del conjunto NP en ese intervalo. Se toma el menor y se guarda dicho valor.

b) Decidir si la altura del conjunto agregado, considerando exclusivamente al conjunto CE, es igual al corte (0.3) o es igual a la altura de la recta del conjunto CE en ese intervalo. Se toma el menor de ellos y se almacena en la memoria del DSP.

c) De los dos mínimos encontrados anteriormente se toma el máximo valor como la altura real del conjunto agregado de salida, y se almacena nuevamente en la memoria.

3. El valor obtenido en los pasos 1 ó 2 se guarda en una variable denominada *agrega*.

4. Se incrementa el valor de m_{pext} y se retorna al paso 1. Este ciclo se realiza hasta llegar al límite superior del universo de m_{pext} .

En cada ciclo, durante el barrido del universo de la variable m_{pext} , se van actualizando el numerador y el denominador de la expresión para el cog de la siguiente forma:

$$num = num + (m_i \times agrega)$$

$$den = den + agrega$$

Una vez que se concluyeron todas las evaluaciones, se obtiene el cog con la siguiente expresión:

$$cog = \frac{num}{den}$$

El exponente de *num* será $e=-8$ y para el la variable *den*, el exponente será $e=-4$. y el exponente resultante de la variable *cog* será entonces $e=-4$. Sin embargo, se hizo un ajuste para que el valor del exponente del cog fuera cero utilizando la siguiente ecuación para *num*:

$$num = num + \frac{(m_i \times agrega)}{10000 \times 10^{-4}}$$

3 Resultados

Para tener un patrón de comparación de resultados, se creó un programa en C++ del controlador difuso.

Como *num* es mas pequeño que *den* y esto implica división fraccionaria, se optó por resolver el inverso del cog en vez del cog normal, por lo que la respuesta que entrega el DSP es:

$$cog^{-1} = \frac{den}{num}$$

Para observar el desempeño del algoritmo implantado en el DSP se realizaron las comparaciones con el programa de C++. El error obtenido con respecto al programa de C++ comprende desde -1.5% a 5%. Este error se debe a que el método utilizado y las adecuaciones hechas al programa original utilizan redondeo como base de funcionamiento.

Respecto al tiempo de ejecución del algoritmo implantado éste tarda en promedio 41.225 μ s en ejecutarse.

4 Conclusiones

En general, el desempeño del programa es aceptable. Se debe tomar en cuenta de que al llegar al estado estable de potencia, los valores de respuesta se mantendrán en el conjunto difuso CE asociado a la variable de salida, región en la cual se tiene el menor error de salida (0.5% en promedio) y que la velocidad de ejecución del algoritmo es muy alta comparada con la velocidad de respuesta de la potencia del reactor.

Para simular el comportamiento del sistema en lazo cerrado, se propone como continuación del proyecto incorporar el modelo que describe la cinética puntual de un reactor tipo TRIGA, el cual consiste de un sistema de ecuaciones dinámicas no lineales, en una PC [6].

5 Agradecimientos

Este proyecto fue realizado con el financiamiento parcial del CONACYT, proyecto 33797, y del COSNET, proyectos 463.01-PR y 628.02-P.

6 Referencias

[1] TI, "TMS320C5x DSP User's Guide", 1996, Texas Instruments, Inc.

[2] Motorola, "Fuzzy Logic Education Program", 1992, Motorola, Inc.

[3] DeGroot M.N., "TRIGA Mark III Reactor, Instrumentation, Maintenance Manual"; 1968, Document No. GA-8585; Gulf General Atomic, Inc.

[4] Benítez-Read J.S., Vélez-Díaz D., "Comparative study of fuzzy control algorithms for a nuclear reactor"; 1998, Robotic and Manufacturing Systems, TSI Press Series, USA; ISBN: 1-889335-08-8; Vol. 7, pp. 73-78.

[5] Benítez Read J.S, Pérez Clavel B.; "Implantación en un DSP de un controlador difuso para la regulación de potencia neutrónica en un reactor tipo TRIGA"; Memorias ELECTRO 2002, Vol. XXIV, pp.563-568.

[6] Benítez Read J.S., Pérez Carbajal V., "Diseño y simulación de un control no lineal para un reactor de investigación"; 1993; Memorias del IV Congreso Anual de la Sociedad Nuclear Mexicana, A.C., Zacatecas, Zac.; Vol. I, pp. 81-84.