

Universidad de Chile

Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas
Departamento de Ingeniería Civil Eléctrica
EL7038 Introducción a la Teoría de Conjuntos
Difusos y Sistemas Inteligentes



PROYECTO N° 1

Controlador por Lógica Difusa

Profesor: Claudio Held

Profesor Auxiliar: Francisco Soto

Ayudante: Jorge Zambrano

Integrante: Camilo Fuentealba Vásquez

Semestre: Otoño 2025

Universidad de Chile

Abril 2025

Índice

Resumen	1
1. Descripción del Proyecto	2
2. Supuestos Considerados	3
3. Resultados Máquina Simplificada	6
3.1. Resultados por método de des-difusión centro de gravedad	6
3.2. Resultados por método de des-difusión Promedio de los Supremos	14
3.3. Resultados por método de des-difusión Alturas	21
4. Resultados Máquina Simplificada con variación de reglas y conjuntos	29
4.1. Resultados considerando reducción de reglas	29
4.1.1. Resultados por método de des-difusión Promedio de los Supremos .	29
4.1.2. Resultados por método de des-difusión Centro de Gravedad	32
4.1.3. Resultados por método de des-difusión Alturas	35
4.2. Resultados sistema deficiente mínimo de reglas reducidas	38
4.2.1. Resultados por método de des-difusión Promedio de los Supremos .	38
4.2.2. Resultados por método de des-difusión Centro de Gravedad	41
4.2.3. Resultados por método de des-difusión Alturas	43
4.3. Resultados sistema eficiente: reducción de conjuntos y cambio de reglas . .	46
4.3.1. Resultados por método de des-difusión Promedio de los Supremos .	46
4.3.2. Resultados por método de des-difusión Centro de Gravedad	49
4.3.3. Resultados por método de des-difusión Alturas	52
5. Resultados Máquina Compleja	54
5.1. Resultados por método de des-difusión centro de gravedad	54
5.2. Resultados por método de des-difusión Promedio de los Supremos	62

5.3. Resultados por método de des-difusión Alturas	69
6. Discusión y Conclusiones	78
Anexo A: Código fuente del sistema simplificado	80
Anexo A: Código fuente del sistema simplificado	89

Índice de figuras

1.	Mapa de activación de reglas difusas para el sistema con presión inicial de 620 y presión objetivo de 700. Se muestran las etiquetas de las reglas activadas para cada combinación de EP y TP.	4
2.	Mapa de activación de reglas difusas considerando eliminación de reglas 9 y 16.	4
3.	Mapa de activación de reglas difusas considerando deficiencia del sistema mediante reducción de reglas 1, 9 y 16.	5
4.	Mapa de activación de reglas difusas considerando reducción de conjuntos y modificación de reglas de activación.	5
5.	Evolución de la presión y del calor aplicado para el sistema con presión inicial de 620 y presión objetivo de 700, en 50 iteraciones.	6
6.	Mapa de desdifusificación para el sistema con presión inicial de 620 y presión objetivo de 700, usando centroide como método de desdifusificación. . .	7
7.	Trayectoria del sistema en el espacio EP vs TP, con etiquetas difusas de salida (DH). Simulación con presión inicial de 620 y presión objetivo de 700. .	8
8.	Secuencia de activación de reglas por iteración en el sistema con presión inicial de 620 y presión objetivo de 700.	8
9.	Evolución de la presión y del calor aplicado para el sistema con presión inicial de 720 y presión objetivo de 700, en 50 iteraciones.	9
10.	Mapa de desdifusificación para el sistema con presión inicial de 720 y presión objetivo de 700, usando centroide como método de desdifusificación. .	10
11.	Trayectoria del sistema en el espacio EP vs TP, con etiquetas difusas de salida (DH). Simulación con presión inicial de 720 y presión objetivo de 700. .	10
12.	Secuencia de activación de reglas por iteración en el sistema con presión inicial de 720 y presión objetivo de 700.	11
13.	Evolución de la presión y del calor aplicado para el sistema con presión inicial de 830 y presión objetivo de 700, en 50 iteraciones.	12
14.	Mapa de desdifusificación para el sistema con presión inicial de 830 y presión objetivo de 700, usando centroide como método de desdifusificación. .	12
15.	Trayectoria del sistema en el espacio EP vs TP, con etiquetas difusas de salida (DH). Simulación con presión inicial de 830 y presión objetivo de 700. .	13
16.	Secuencia de activación de reglas por iteración en el sistema con presión inicial de 830 y presión objetivo de 700.	13

17.	Evolución de la presión y del calor aplicado para el sistema con presión inicial de 620 y presión objetivo de 700, en 50 iteraciones.	14
18.	Mapa de desdifusificación para el sistema con presión inicial de 620 y presión objetivo de 700, usando promedio de los supremos como método de desdifusificación.	15
19.	Trayectoria del sistema en el espacio EP vs TP, con etiquetas difusas de salida (DH). Simulación con presión inicial de 620 y presión objetivo de 700.	15
20.	Secuencia de activación de reglas por iteración en el sistema con presión inicial de 620 y presión objetivo de 700.	16
21.	Evolución de la presión y del calor aplicado para el sistema con presión inicial de 720 y presión objetivo de 700, en 50 iteraciones.	17
22.	Mapa de desdifusificación para el sistema con presión inicial de 720 y presión objetivo de 700, usando promedio de los supremos como método de desdifusificación.	17
23.	Trayectoria del sistema en el espacio EP vs TP, con etiquetas difusas de salida (DH). Simulación con presión inicial de 720 y presión objetivo de 700.	18
24.	Secuencia de activación de reglas por iteración en el sistema con presión inicial de 720 y presión objetivo de 700.	18
25.	Evolución de la presión y del calor aplicado para el sistema con presión inicial de 830 y presión objetivo de 700, en 50 iteraciones.	19
26.	Mapa de desdifusificación para el sistema con presión inicial de 830 y presión objetivo de 700, usando centroide como método de desdifusificación.	20
27.	Trayectoria del sistema en el espacio EP vs TP, con etiquetas difusas de salida (DH). Simulación con presión inicial de 830 y presión objetivo de 700.	20
28.	Secuencia de activación de reglas por iteración en el sistema con presión inicial de 830 y presión objetivo de 700.	21
29.	Evolución de la presión y del calor aplicado para el sistema con presión inicial de 620 y presión objetivo de 700, en 50 iteraciones.	22
30.	Mapa de des-difusión para el sistema con presión inicial de 620 y presión objetivo de 700, usando alturas como método de desdifusificación.	22
31.	Trayectoria del sistema en el espacio EP vs TP, con etiquetas difusas de salida (DH). Simulación con presión inicial de 620 y presión objetivo de 700.	23
32.	Secuencia de activación de reglas por iteración en el sistema con presión inicial de 620 y presión objetivo de 700.	23

33.	Evolución de la presión y del calor aplicado para el sistema con presión inicial de 720 y presión objetivo de 700, en 50 iteraciones.	24
34.	Mapa de desdifusificación para el sistema con presión inicial de 720 y presión objetivo de 700, usando alturas como método de desdifusificación.	25
35.	Trayectoria del sistema en el espacio EP vs TP, con etiquetas difusas de salida (DH). Simulación con presión inicial de 720 y presión objetivo de 700.	25
36.	Secuencia de activación de reglas por iteración en el sistema con presión inicial de 720 y presión objetivo de 700.	26
37.	Evolución de la presión y del calor aplicado para el sistema con presión inicial de 830 y presión objetivo de 700, en 50 iteraciones.	27
38.	Mapa de desdifusificación para el sistema con presión inicial de 830 y presión objetivo de 700, usando alturas como método de desdifusificación.	27
39.	Trayectoria del sistema en el espacio EP vs TP, con etiquetas difusas de salida (DH). Simulación con presión inicial de 830 y presión objetivo de 700.	28
40.	Secuencia de activación de reglas por iteración en el sistema con presión inicial de 830 y presión objetivo de 700.	28
41.	Evolución de la presión y del calor aplicado para el sistema con presión inicial de 620 y presión objetivo de 700, en 50 iteraciones.	30
42.	Mapa de des-difusión para el sistema con presión inicial de 620 y presión objetivo de 700, usando promedio de los supremos como método de des-difusión.	30
43.	Trayectoria del sistema en el espacio EP vs TP, con etiquetas difusas de salida (DH). Simulación con presión inicial de 620 y presión objetivo de 700.	31
44.	Secuencia de activación de reglas por iteración en el sistema con presión inicial de 620 y presión objetivo de 700.	32
45.	Evolución de la presión y del calor aplicado para el sistema con presión inicial de 620 y presión objetivo de 700, en 50 iteraciones.	33
46.	Mapa de des-difusión para el sistema con presión inicial de 620 y presión objetivo de 700, usando promedio de los supremos como método de des-difusión.	33
47.	Trayectoria del sistema en el espacio EP vs TP, con etiquetas difusas de salida (DH). Simulación con presión inicial de 620 y presión objetivo de 700.	34
48.	Secuencia de activación de reglas por iteración en el sistema con presión inicial de 620 y presión objetivo de 700.	35

49.	Evolución de la presión y del calor aplicado para el sistema con presión inicial de 620 y presión objetivo de 700, en 50 iteraciones.	36
50.	Mapa de des-difusión para el sistema con presión inicial de 620 y presión objetivo de 700, usando promedio de los supremos como método de des-difusión.	36
51.	Trayectoria del sistema en el espacio EP vs TP, con etiquetas difusas de salida (DH). Simulación con presión inicial de 620 y presión objetivo de 700.	37
52.	Secuencia de activación de reglas por iteración en el sistema con presión inicial de 620 y presión objetivo de 700.	38
53.	Evolución de la presión y del calor aplicado para el sistema con presión inicial de 620 y presión objetivo de 700, en 50 iteraciones.	39
54.	Mapa de des-difusión para el sistema con presión inicial de 620 y presión objetivo de 700, usando promedio de los supremos como método de des-difusión.	39
55.	Trayectoria del sistema en el espacio EP vs TP, con etiquetas difusas de salida (DH). Simulación con presión inicial de 620 y presión objetivo de 700.	40
56.	Secuencia de activación de reglas por iteración en el sistema con presión inicial de 620 y presión objetivo de 700.	40
57.	Evolución de la presión y del calor aplicado para el sistema con presión inicial de 620 y presión objetivo de 700, en 50 iteraciones.	41
58.	Mapa de des-difusión para el sistema con presión inicial de 620 y presión objetivo de 700, usando promedio de los supremos como método de des-difusión.	42
59.	Trayectoria del sistema en el espacio EP vs TP, con etiquetas difusas de salida (DH). Simulación con presión inicial de 620 y presión objetivo de 700.	42
60.	Secuencia de activación de reglas por iteración en el sistema con presión inicial de 620 y presión objetivo de 700.	43
61.	Evolución de la presión y del calor aplicado para el sistema con presión inicial de 620 y presión objetivo de 700, en 50 iteraciones.	44
62.	Mapa de des-difusión para el sistema con presión inicial de 620 y presión objetivo de 700, usando promedio de los supremos como método de des-difusión.	44
63.	Trayectoria del sistema en el espacio EP vs TP, con etiquetas difusas de salida (DH). Simulación con presión inicial de 620 y presión objetivo de 700.	45
64.	Secuencia de activación de reglas por iteración en el sistema con presión inicial de 620 y presión objetivo de 700.	45

65.	Evolución de la presión y del calor aplicado para el sistema con presión inicial de 620 y presión objetivo de 700, en 50 iteraciones.	47
66.	Mapa de des-difusión para el sistema con presión inicial de 620 y presión objetivo de 700, usando promedio de los supremos como método de des-difusión.	47
67.	Trayectoria del sistema en el espacio EP vs TP, con etiquetas difusas de salida (DH). Simulación con presión inicial de 620 y presión objetivo de 700.	48
68.	Secuencia de activación de reglas por iteración en el sistema con presión inicial de 620 y presión objetivo de 700.	48
69.	Evolución de la presión y del calor aplicado para el sistema con presión inicial de 620 y presión objetivo de 700, en 50 iteraciones.	50
70.	Mapa de des-difusión para el sistema con presión inicial de 620 y presión objetivo de 700, usando promedio de los supremos como método de des-difusión.	50
71.	Trayectoria del sistema en el espacio EP vs TP, con etiquetas difusas de salida (DH). Simulación con presión inicial de 620 y presión objetivo de 700.	51
72.	Secuencia de activación de reglas por iteración en el sistema con presión inicial de 620 y presión objetivo de 700.	51
73.	Evolución de la presión y del calor aplicado para el sistema con presión inicial de 620 y presión objetivo de 700, en 50 iteraciones.	52
74.	Mapa de des-difusión para el sistema con presión inicial de 620 y presión objetivo de 700, usando promedio de los supremos como método de des-difusión.	53
75.	Trayectoria del sistema en el espacio EP vs TP, con etiquetas difusas de salida (DH). Simulación con presión inicial de 620 y presión objetivo de 700.	53
76.	Secuencia de activación de reglas por iteración en el sistema con presión inicial de 620 y presión objetivo de 700.	54
77.	Evolución de la presión y del calor aplicado para el sistema con presión inicial de 620 y presión objetivo de 700, en 50 iteraciones.	55
78.	Mapa de desdiferenciación para el sistema con presión inicial de 620 y presión objetivo de 700, usando centroide como método de des-difusión.	56
79.	Trayectoria del sistema en el espacio EP vs TP, con etiquetas difusas de salida (DH). Simulación con presión inicial de 620 y presión objetivo de 700.	56
80.	Secuencia de activación de reglas por iteración en el sistema con presión inicial de 620 y presión objetivo de 700.	57

81.	Evolución de la presión y del calor aplicado para el sistema con presión inicial de 720 y presión objetivo de 700, en 50 iteraciones.	58
82.	Mapa de des-difusión para el sistema con presión inicial de 720 y presión objetivo de 700, usando centroide como método de des-difusión.	58
83.	Trayectoria del sistema en el espacio EP vs TP, con etiquetas difusas de salida (DH). Simulación con presión inicial de 720 y presión objetivo de 700.	59
84.	Secuencia de activación de reglas por iteración en el sistema con presión inicial de 720 y presión objetivo de 700.	59
85.	Evolución de la presión y del calor aplicado para el sistema con presión inicial de 830 y presión objetivo de 700, en 50 iteraciones.	60
86.	Mapa de des-difusión para el sistema con presión inicial de 830 y presión objetivo de 700, usando centroide como método de des-difusión.	61
87.	Trayectoria del sistema en el espacio EP vs TP, con etiquetas difusas de salida (DH). Simulación con presión inicial de 830 y presión objetivo de 700.	61
88.	Secuencia de activación de reglas por iteración en el sistema con presión inicial de 830 y presión objetivo de 700.	62
89.	Evolución de la presión y del calor aplicado para el sistema con presión inicial de 620 y presión objetivo de 700, en 50 iteraciones.	63
90.	Mapa de des-difusión para el sistema con presión inicial de 620 y presión objetivo de 700, usando promedio de los supremos como método de des-difusión.	63
91.	Trayectoria del sistema en el espacio EP vs TP, con etiquetas difusas de salida (DH). Simulación con presión inicial de 620 y presión objetivo de 700.	64
92.	Secuencia de activación de reglas por iteración en el sistema con presión inicial de 620 y presión objetivo de 700.	64
93.	Evolución de la presión y del calor aplicado para el sistema con presión inicial de 720 y presión objetivo de 700, en 50 iteraciones.	65
94.	Mapa de desdiferenciación para el sistema con presión inicial de 720 y presión objetivo de 700, usando promedio de los supremos como método de desdiferenciación.	66
95.	Trayectoria del sistema en el espacio EP vs TP, con etiquetas difusas de salida (DH). Simulación con presión inicial de 720 y presión objetivo de 700.	66
96.	Secuencia de activación de reglas por iteración en el sistema con presión inicial de 720 y presión objetivo de 700.	67

97.	Evolución de la presión y del calor aplicado para el sistema con presión inicial de 830 y presión objetivo de 700, en 50 iteraciones.	68
98.	Mapa de desdifusificación para el sistema con presión inicial de 830 y presión objetivo de 700, usando centroide como método de desdifusificación.	68
99.	Trayectoria del sistema en el espacio EP vs TP, con etiquetas difusas de salida (DH). Simulación con presión inicial de 830 y presión objetivo de 700.	69
100.	Secuencia de activación de reglas por iteración en el sistema con presión inicial de 830 y presión objetivo de 700.	69
101.	Evolución de la presión y del calor aplicado para el sistema con presión inicial de 620 y presión objetivo de 700, en 50 iteraciones.	70
102.	Mapa de des-difusión para el sistema con presión inicial de 620 y presión objetivo de 700, usando alturas como método de des-difusión.	71
103.	Trayectoria del sistema en el espacio EP vs TP, con etiquetas difusas de salida (DH). Simulación con presión inicial de 620 y presión objetivo de 700.	71
104.	Secuencia de activación de reglas por iteración en el sistema con presión inicial de 620 y presión objetivo de 700.	72
105.	Evolución de la presión y del calor aplicado para el sistema con presión inicial de 720 y presión objetivo de 700, en 50 iteraciones.	73
106.	Mapa de des-difusión para el sistema con presión inicial de 720 y presión objetivo de 700, usando alturas como método de des-difusión.	73
107.	Trayectoria del sistema en el espacio EP vs TP, con etiquetas difusas de salida (DH). Simulación con presión inicial de 720 y presión objetivo de 700.	74
108.	Secuencia de activación de reglas por iteración en el sistema con presión inicial de 720 y presión objetivo de 700.	74
109.	Evolución de la presión y del calor aplicado para el sistema con presión inicial de 830 y presión objetivo de 700, en 50 iteraciones.	75
110.	Mapa de des-difusión para el sistema con presión inicial de 830 y presión objetivo de 700, usando alturas como método de des-difusión.	76
111.	Trayectoria del sistema en el espacio EP vs TP, con etiquetas difusas de salida (DH). Simulación con presión inicial de 830 y presión objetivo de 700.	76
112.	Secuencia de activación de reglas por iteración en el sistema con presión inicial de 830 y presión objetivo de 700.	77

Resumen

En este proyecto se diseñó y analizó un sistema de control basado en lógica difusa para una máquina industrial simplificada, cuya misión principal es regular la presión interna hacia un valor objetivo predefinido. Se implementaron dos configuraciones de prueba, una máquina simplificada con condiciones tal que la presión se regula en función del error residual de presiones y la tasa de error acumulada, y una máquina compleja considerando un modelo dinámico de transferencia de calor adicional.

El estudio se estructuró en distintas etapas. En primer lugar, se analizaron los resultados de la máquina simplificada para presiones iniciales de 620, 720 y 830 unidades, aplicando tres métodos de des-difusión: centro de gravedad, promedio de los supremos y altura un total de 9 conjuntos difusos y 17 reglas. Los resultados muestran que el método de centro de gravedad ofrece mejor desempeño general en términos de estabilidad en la convergencia, pese a ello, el método de altura proporciona oscilaciones más ajustadas alrededor de la presión objetivo, particularmente para presiones iniciales alejadas de la presión objetivo caso 620 y 830 como presión inicial.

Posteriormente, se exploró el impacto de la reducción de reglas críticas del sistema. La eliminación de dos reglas principales alteró significativamente el comportamiento, generando trayectorias escalonadas o divergencias, dependiendo del método de des-difusión. La eliminación de tres reglas críticas provocó un comportamiento deficiente en todos los métodos.

Adicionalmente, se propuso una estrategia de mejora mediante la reducción de conjuntos difusos y ajuste de reglas, obteniendo una mejora notable en el tiempo de respuesta, aunque con un incremento en la cantidad de activaciones de reglas.

Finalmente, se analizó el desempeño de la máquina compleja bajo condiciones dinámicas de calor. Se observó que métodos como el centro de gravedad permiten una convergencia gradual, mientras que los métodos de promedio de supremos y altura tienden a generar divergencias y comportamientos oscilatorios amplificados.

El estudio confirma que la selección adecuada del método de des-difusión, el diseño cuidadoso de las reglas y el ajuste de la base de conocimientos son fundamentales para el desempeño eficiente de controladores difusos en sistemas industriales ya sea simplificado o reales.

1. Descripción del Proyecto

Para el desarrollo de este proyecto se utilizó el lenguaje de programación Python, haciendo uso de librerías de propósito general tales como `numpy` para operaciones numéricas y `matplotlib` para visualización de resultados. Se evitó la utilización de librerías específicas para sistemas difusos, con el objetivo de construir todo el proceso de inferencia, desdiferenciación y simulación desde la base, permitiendo una mejor comprensión de cada etapa del controlador lógico difuso (CLD).

El proyecto contempla el estudio de tres métodos de desdiferenciación principales: el promedio de los supremos (*mean*), el centro de gravedad (*centroide*) y el método de altura (*altura*). Cada método fue aplicado a tres presiones de entrada iniciales diferentes, generando así un total de nueve simulaciones para la máquina simplificada.

En la segunda etapa del trabajo, titulada *Resultados Máquina Simplificada con variación de reglas y conjuntos*, se realizan modificaciones puntuales en la base de conocimientos para evaluar su impacto en el desempeño del sistema. Se utiliza como caso base una presión de entrada de 620 unidades, estudiando los resultados bajo cada uno de los tres métodos de desdiferenciación. Esto permitió simplificar el análisis sin perder la generalidad de los resultados.

Las variaciones consideradas en esta sección incluyen:

- **Resultados considerando reducción de reglas:** se eliminan reglas específicas para analizar la pérdida de desempeño, regla 9 y 16.
- **Resultados sistema deficiente mínimo de reglas reducidas:** se determinó el mínimo número de reglas cuya eliminación provoca un desempeño inaceptable, reglas 1, 9 y 16.
- **Resultados sistema eficiente: reducción de conjuntos y cambio de reglas:** se simplificó la estructura de conjuntos difusos y se ajustó el conjunto de reglas de activación, buscando mejorar la eficiencia del sistema.

Finalmente, se realizó un análisis del sistema complejo (dinámico) del comportamiento del sistema frente a la presión de entrada y variación de calor, replicando las condiciones iniciales de operación de la máquina simplificada para validar el comportamiento bajo los cambios introducidos a nivel de código.

2. Supuestos Considerados

En el presente trabajo se han establecido los siguientes supuestos y condiciones iniciales para el desarrollo del modelo difuso:

- **Normalización del universo de discurso:** Las variables Error de Presión (EP), Tasa de Cambio del Error (TP) y Delta de Calor (DH) se han normalizado en un rango de $[-1, 1]$. Esta normalización permite que el sistema mantenga escalas coherentes y facilite el diseño de los conjuntos difusos. En el código, se destaca que la normalización de EP y TP se ejecuta en una estructura anidad del paso de desdifusión, por tanto, no es de extrañar que en los parámetros iniciales estén en un rango $[-12, 12]$.
- **Definición de funciones de pertenencia:** Las funciones de pertenencia empleadas son trapezoidales. En casos donde los límites de los trapecios son iguales (por ejemplo, $(-1, -1, -0,8, -0,7)$), se ha definido una activación completa del conjunto, permitiendo una toma de decisiones adecuada en los extremos del universo de discurso.
- **Condición inicial de presión:** Se asume que la presión en el estado previo a la primera iteración, es decir, $P(t-1)$, es igual a cero. Esta condición inicial implica que la primera tasa de error (TP) sea elevada, pero regulada mediante la normalización.
- **Manejo de activaciones iniciales fuera de rango:** Dado que las primeras iteraciones pueden presentar valores de error y tasa de cambio elevados, se ha establecido que los conjuntos difusos activan completamente cuando los valores exceden el rango normalizado, garantizando un arranque controlado del sistema.

A lo largo del desarrollo del proyecto, se considera un mapa de reglas difusas previamente establecido, el cual se presenta en la Figura 1. Este mapa sirve como base para todos los procesos de inferencia ejecutados en las distintas etapas de simulación para el punto 3. Resultados Máquina Simplificada.

Aunque el mapa de reglas permanece invariante entre iteraciones, la activación específica de cada regla varía dinámicamente según los valores que adoptan las variables de entrada en cada momento. El patrón de activaciones se detalla explícitamente en las secciones correspondientes.

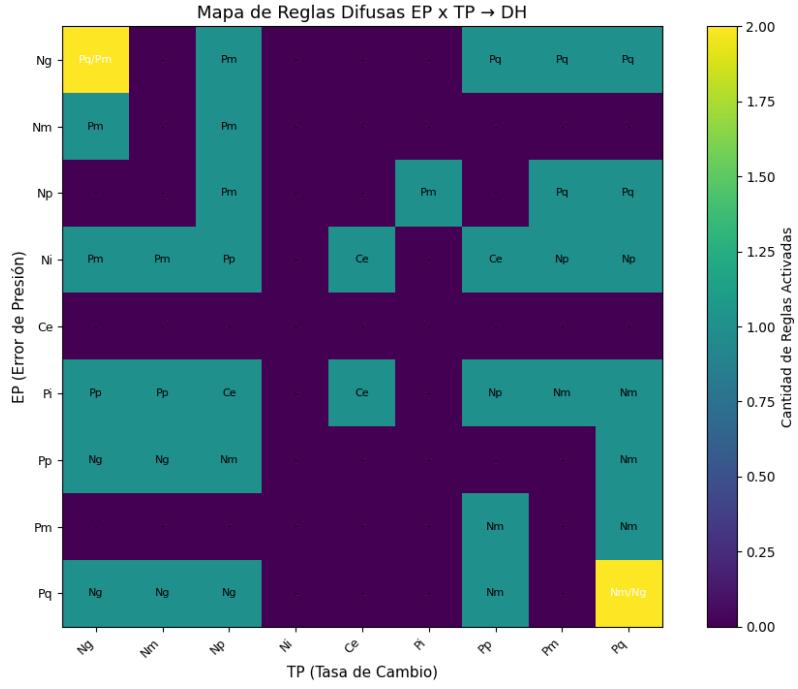


Figura 1: Mapa de activación de reglas difusas para el sistema con presión inicial de 620 y presión objetivo de 700. Se muestran las etiquetas de las reglas activadas para cada combinación de EP y TP.

Adicionalmente, se utilizaron distintas variantes de mapas de reglas según las modificaciones aplicadas en cada escenario de prueba, de los tópicos 4 y 5. Se aprecian en figura 2, 3 y 4.

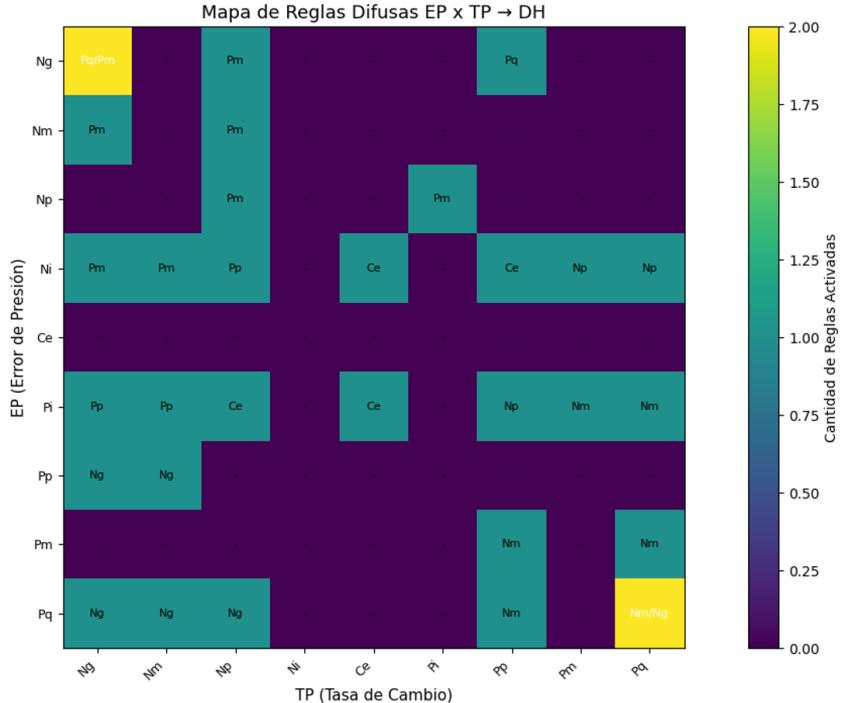


Figura 2: Mapa de activación de reglas difusas considerando eliminación de reglas 9 y 16.

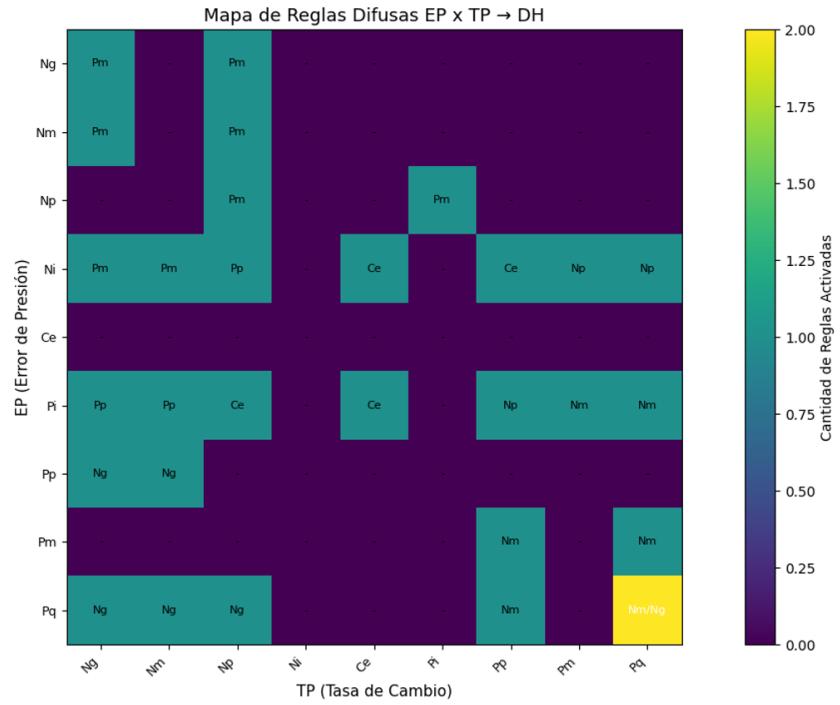


Figura 3: Mapa de activación de reglas difusas considerando deficiencia del sistema mediante reducción de reglas 1, 9 y 16.

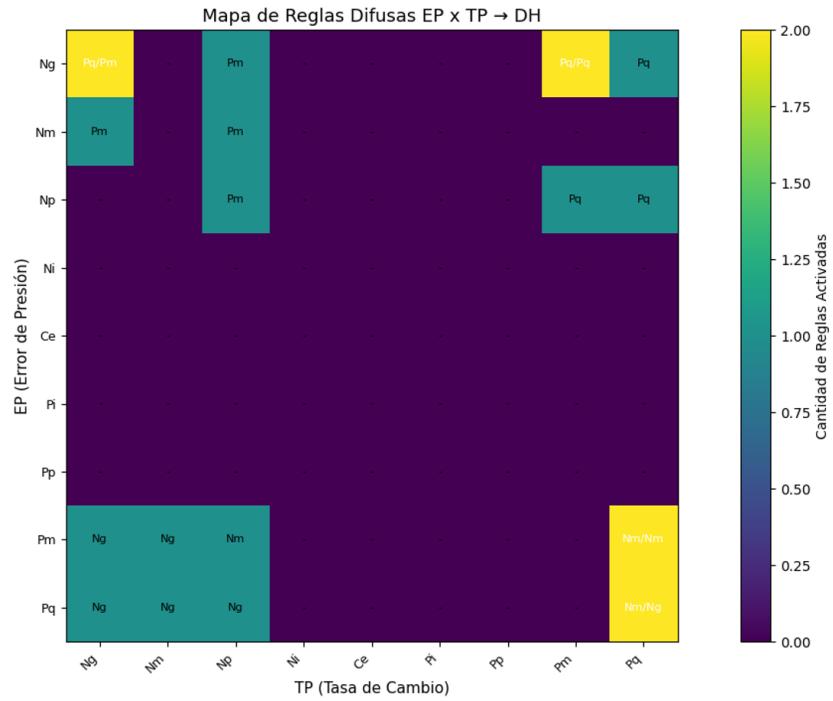


Figura 4: Mapa de activación de reglas difusas considerando reducción de conjuntos y modificación de reglas de activación.

3. Resultados Máquina Simplificada

3.1. Resultados por método de des-difusión centro de gravedad

Configuración Inicial caso 1

- Presión Objetivo (PO): 700
- Presión Inicial (P_0): 620
- Iteraciones: 50
- Método de des-difusión: centro de gravedad

En este apartado se presentan los resultados obtenidos para el caso de la máquina simplificada, utilizando una presión inicial de $P_0 = 620$ y una presión objetivo de $P_O = 700$. El sistema fue evaluado durante 50 iteraciones, empleando el método de des-difusión por centro de gravedad (centroide), que calcula el valor de salida difusa como el centroide del área bajo la curva de inferencia.

La Figura 5 muestra el comportamiento dinámico del sistema en 50 iteraciones. En la parte superior se observa la evolución de la presión, donde se aprecia una rápida aproximación desde el valor inicial hacia el objetivo, impulsada por una aplicación inicial alta de ΔH .

Posteriormente, el sistema presenta oscilaciones en torno al valor objetivo, iteración 12 en adelante, atribuibles a la sensibilidad del método centroide frente a pequeños errores residuales. En la parte inferior de la figura se ilustra la señal de control ΔH aplicada en cada iteración, evidenciando tanto la fase de ascenso como la de estabilización oscilatoria.

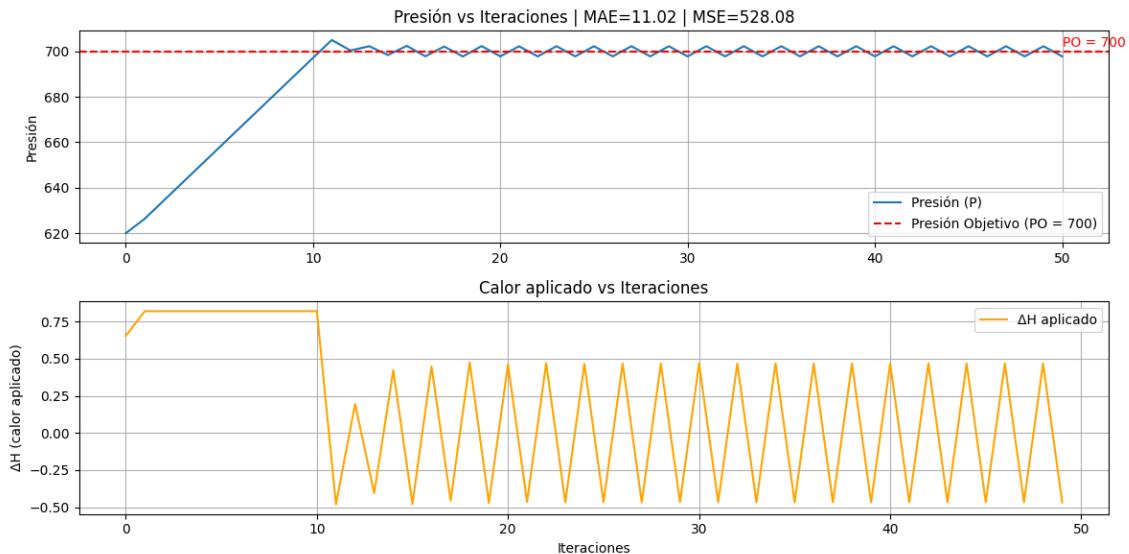


Figura 5: Evolución de la presión y del calor aplicado para el sistema con presión inicial de 620 y presión objetivo de 700, en 50 iteraciones.

La Figura 6, presenta una visualización continua del espacio de inferencia difusa, donde se muestra el valor de salida ΔH obtenido tras aplicar el método de desdiferenciamación por centroide. Aunque esta representación no permite identificar reglas específicas, sí entrega una perspectiva visual clara sobre cómo varía la salida del sistema según las combinaciones posibles de EP y TP .

Esta figura permite apreciar zonas de alta y baja intensidad de respuesta, evidenciando la suavidad de transición entre regiones del sistema difuso.

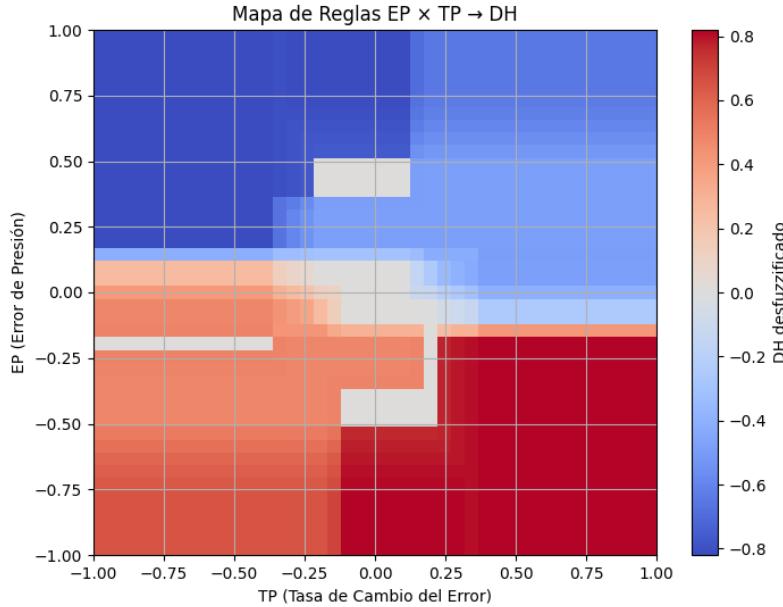


Figura 6: Mapa de desdiferenciamación para el sistema con presión inicial de 620 y presión objetivo de 700, usando centroide como método de desdiferenciamación.

La Figura 7, muestra la trayectoria del sistema difuso en el espacio de entrada formado por el Error de Presión (EP) y la Tasa de Cambio del Error (TP). La línea blanca representa el recorrido que sigue el sistema a lo largo de las 50 iteraciones, reflejando con precisión la evolución observada en las gráficas anteriores.

Esta visualización permite comprender cómo varía la activación de reglas en cada momento, al desplazarse por regiones del espacio $EP\text{-}TP$ que corresponden a diferentes etiquetas difusas de salida (ΔH). Aunque se aprecia una clara tendencia hacia la región central (etiquetas neutras), el sistema no alcanza una convergencia total dentro del periodo de iteración considerado, oscilando en torno al punto de equilibrio sin estabilizarse completamente.

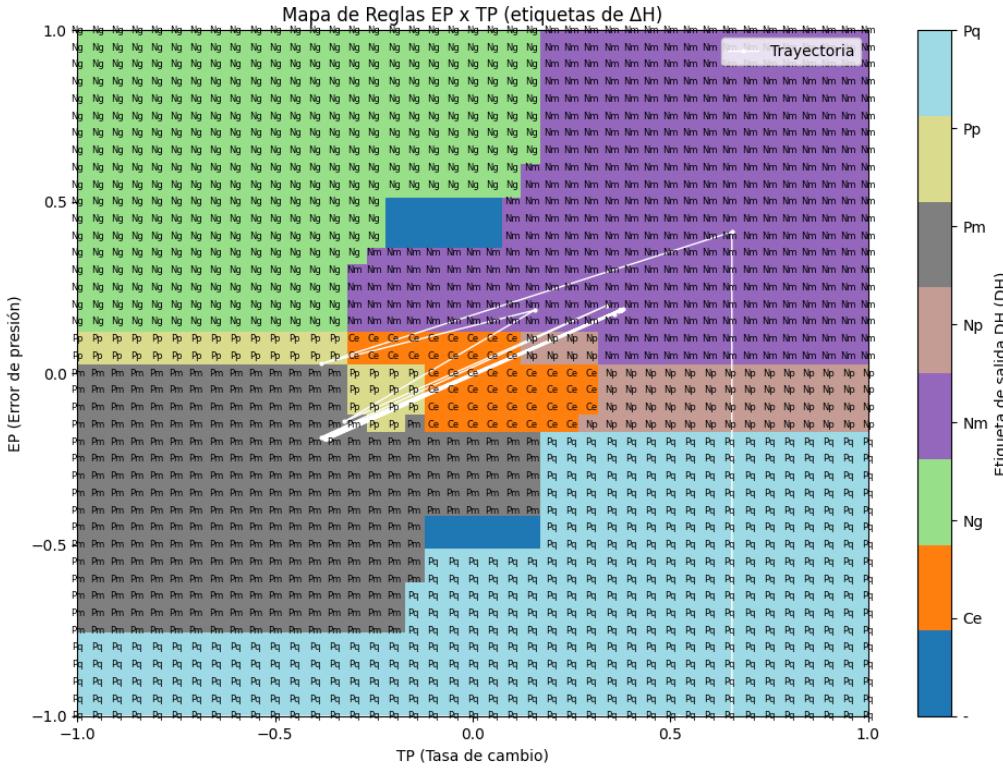


Figura 7: Trayectoria del sistema en el espacio EP vs TP, con etiquetas difusas de salida (DH). Simulación con presión inicial de 620 y presión objetivo de 700.

La Figura 8 muestra la activación de reglas durante 50 iteraciones. Inicialmente dominan R1, R2 y R16, impulsando el aumento de presión. Luego, toman relevancia reglas moderadas como R9 y R13, estabilizando el sistema alrededor del objetivo.

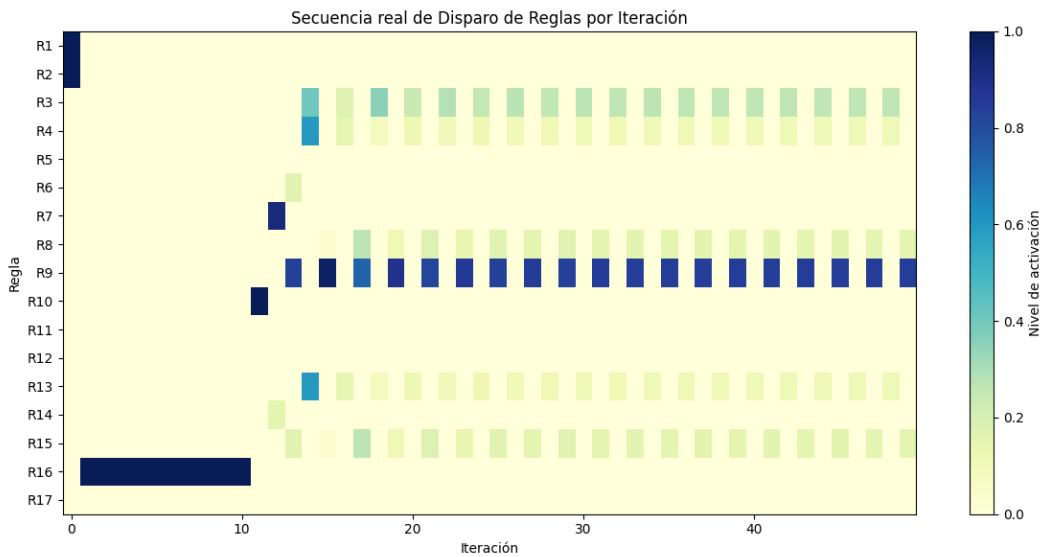


Figura 8: Secuencia de activación de reglas por iteración en el sistema con presión inicial de 620 y presión objetivo de 700.

Configuración Inicial caso 2

- Presión Objetivo (PO): 700
- Presión Inicial (P_0): 720
- Iteraciones: 50
- Método de desdifusificación: centro de gravedad

En este caso, se utiliza una presión inicial de $P_0 = 720$ para alcanzar una presión objetivo de $P_O = 700$, bajo el método de desdifusificación por centroide. La Figura 9 muestra la respuesta dinámica del sistema en 50 iteraciones, donde se observa una rápida convergencia hacia el valor de referencia en muy pocas iteraciones, debido a la cercanía entre la presión inicial y el objetivo. Posteriormente, el sistema mantiene un comportamiento oscilatorio alrededor del objetivo, fenómeno atribuido a la alta sensibilidad del método centroide frente a pequeños errores residuales. La señal de control ΔH refleja esta dinámica de corrección periódica, alternando entre valores positivos y negativos de manera consistente para mantener la estabilidad del sistema.

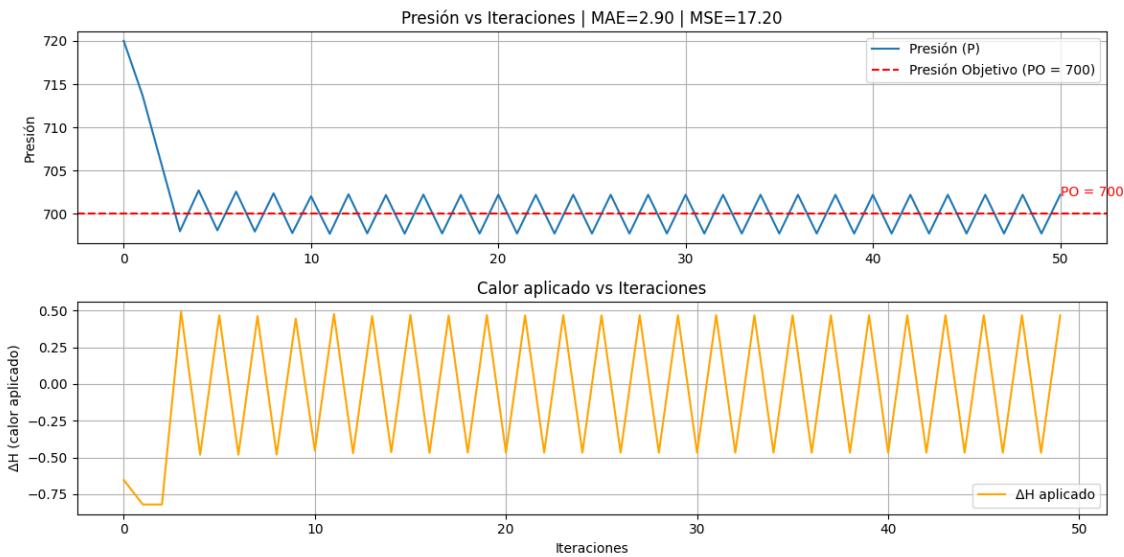


Figura 9: Evolución de la presión y del calor aplicado para el sistema con presión inicial de 720 y presión objetivo de 700, en 50 iteraciones.

La Figura 10, muestra el mapa de desdifusificación para el sistema bajo condiciones de operación más cercanas al objetivo. Se aprecia una distribución relativamente homogénea de las zonas de acción, donde los rangos de salida ΔH son coherentes con las variaciones de error (EP) y su tasa de cambio (TP). A diferencia de la Figura 6, se observa un mayor suavizado en las transiciones, producto de la activación predominante de reglas menos extremas, lo cual facilita un control más fino y menos abrupto del sistema.

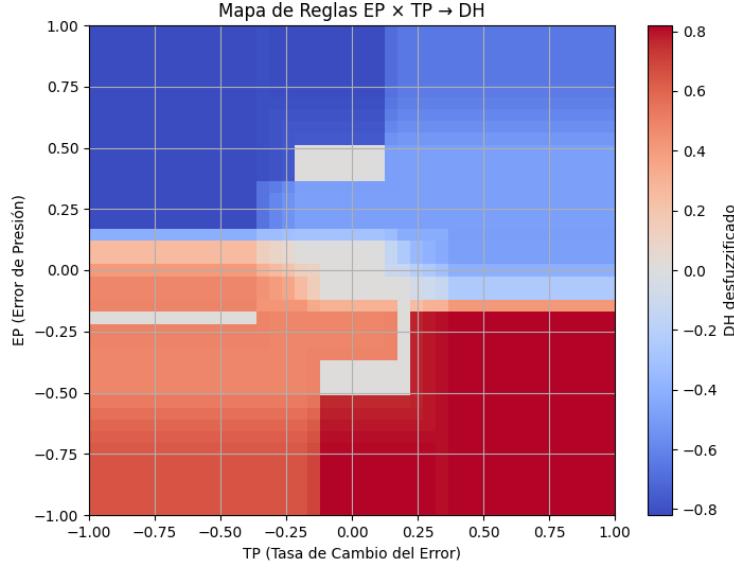


Figura 10: Mapa de desdiferenciación para el sistema con presión inicial de 720 y presión objetivo de 700, usando centroide como método de desdiferenciación.

La Figura 11, representa el mapa de etiquetas de reglas difusas junto con la trayectoria seguida por el sistema (línea blanca). Similar a la Figura 7, se observa que el movimiento inicial y la estabilización ocurren recorriendo distintas regiones de activación, reflejando los cambios dinámicos en el error de presión y su tasa de cambio a medida que el sistema se acerca al valor objetivo.

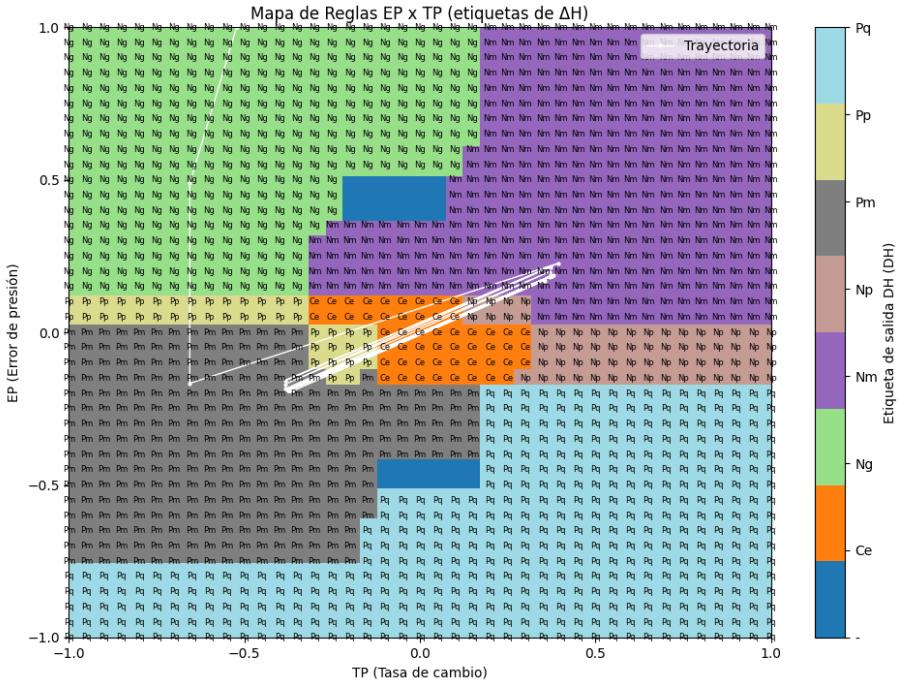


Figura 11: Trayectoria del sistema en el espacio EP vs TP, con etiquetas difusas de salida (ΔH). Simulación con presión inicial de 720 y presión objetivo de 700.

La Figura 12, muestra la secuencia real de activaciones de reglas, donde se observan los disparos principales durante las iteraciones que permitieron controlar y estabilizar la presión del sistema.

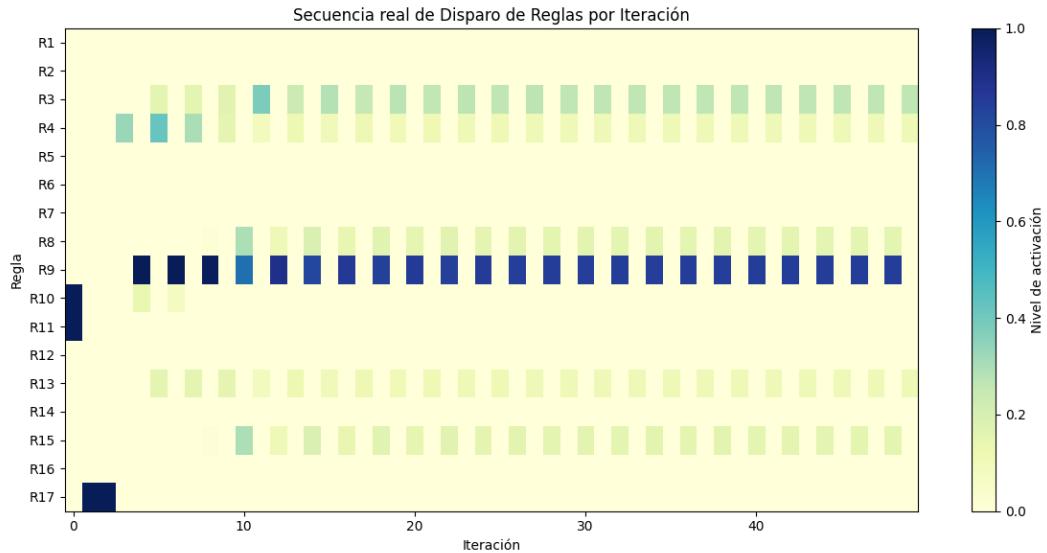


Figura 12: Secuencia de activación de reglas por iteración en el sistema con presión inicial de 720 y presión objetivo de 700.

Configuración Inicial caso 3

- Presión Objetivo (PO): 700
- Presión Inicial (P0): 830
- Iteraciones: 50
- Método de desdifusificación: centro de gravedad

En este escenario, el sistema parte de una presión inicial de $P_0 = 830$, buscando alcanzar la presión objetivo $P_O = 700$, utilizando el método de desdifusificación por centro de gravedad. Tal como se aprecia en la Figura 13, la convergencia hacia el objetivo ocurre de manera mas lenta que en el caso 2 para las primeras iteraciones. A partir de ahí, el comportamiento evoluciona hacia una oscilación controlada alrededor del objetivo, similar a los casos 1 y 2.

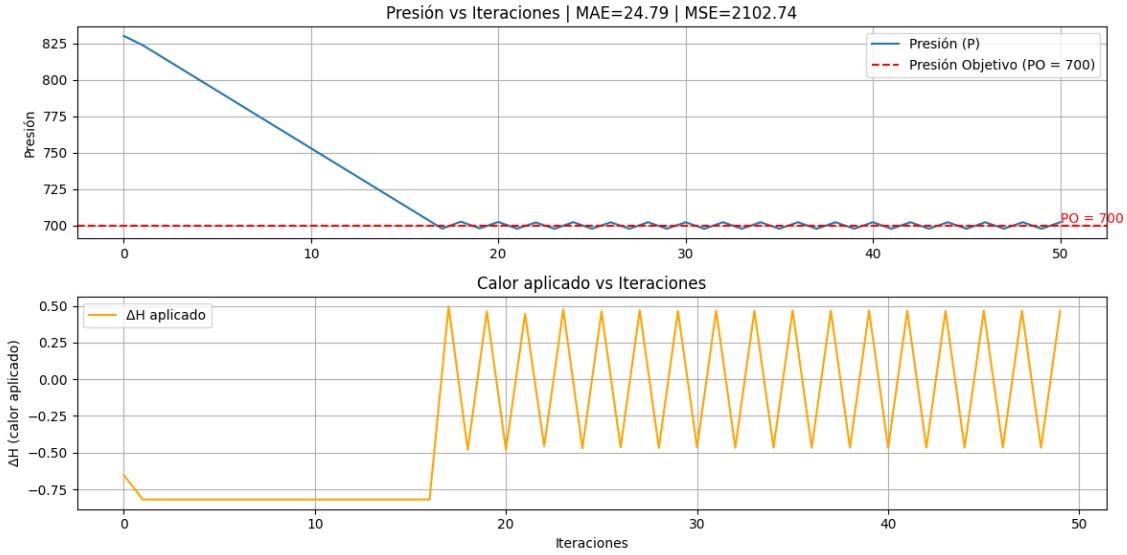


Figura 13: Evolución de la presión y del calor aplicado para el sistema con presión inicial de 830 y presión objetivo de 700, en 50 iteraciones.

La Figura 14 muestra una leve variación en las activaciones representadas en color, donde resulta complejo percibir a priori la diferencia respecto a los casos 1 y 2. Sin embargo, entrega información inicial sobre cómo se estructura el mapa de reglas.

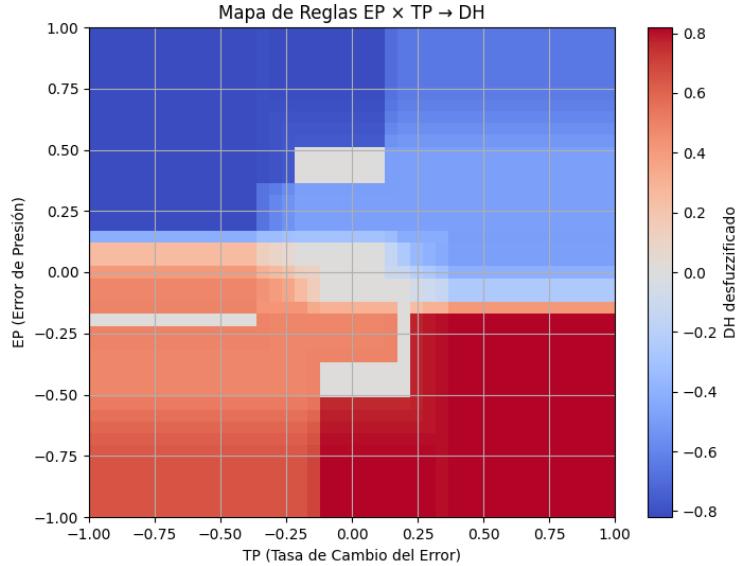


Figura 14: Mapa de desdifusificación para el sistema con presión inicial de 830 y presión objetivo de 700, usando centroide como método de desdifusificación.

En la Figura 15 se aprecia la trayectoria en blanco que sigue el ciclo iterativo, similar a los casos 1 y 2. No obstante, la activación de reglas define una región inicial en la parte superior izquierda, correspondiente a la zona verde donde se establece el conjunto N_g , lo cual es esperado dado que el sistema debe disminuir la presión.

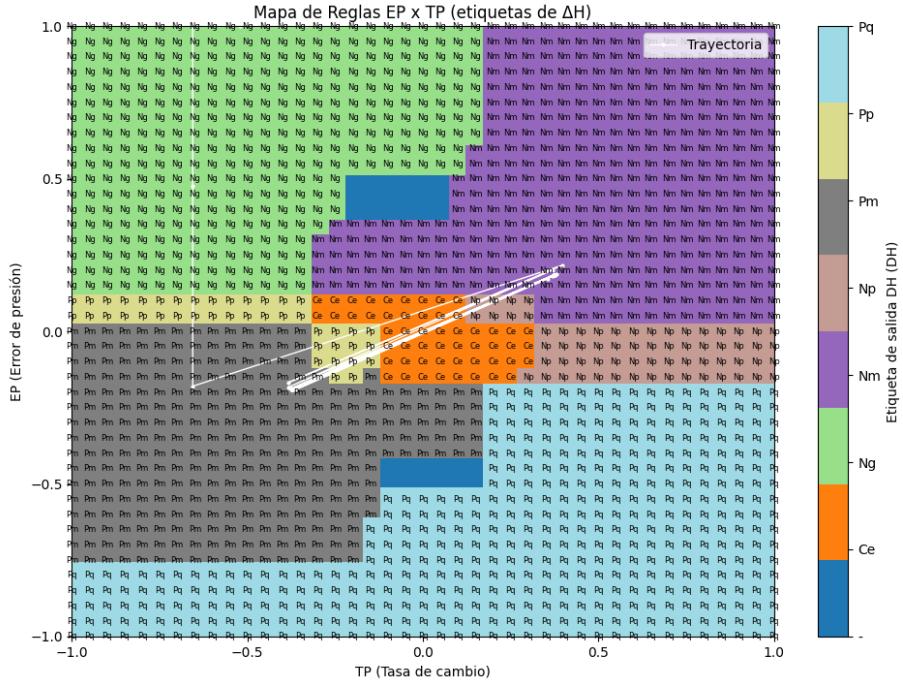


Figura 15: Trayectoria del sistema en el espacio EP vs TP, con etiquetas difusas de salida (DH). Simulación con presión inicial de 830 y presión objetivo de 700.

En la Figura 16 se aprecia que las reglas 10 y 11 se activan inicialmente, y luego la regla 17 establece un amplio rango de activación durante varias iteraciones. Posteriormente, al acercarse a la presión objetivo, el sistema comienza a oscilar entre distintas reglas de activación.

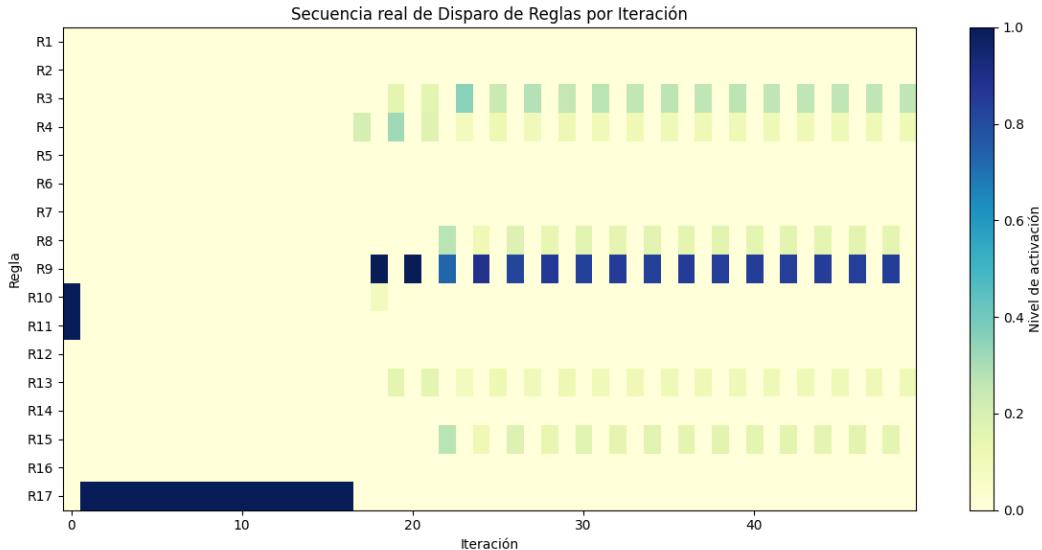


Figura 16: Secuencia de activación de reglas por iteración en el sistema con presión inicial de 830 y presión objetivo de 700.

3.2. Resultados por método de des-difusión Promedio de los Supremos

Configuración Inicial caso 1

- Presión Objetivo (PO): 700
- Presión Inicial (P0): 620
- Iteraciones: 50
- Método de des-difusión: Promedio de los Supremos

En este caso, utilizando el método de des-difusión por **promedio de los supremos**, la Figura 17, muestra que el sistema alcanza la presión objetivo alrededor de la iteración 10. A diferencia del método centroide, se observa que la presión oscila de manera sostenida sobre el valor de referencia, manteniendo un rango de variación positivo más amplio. La señal de control ΔH refleja esta dinámica, alternando valores para estabilizar el sistema en torno a una sobrepresión controlada.

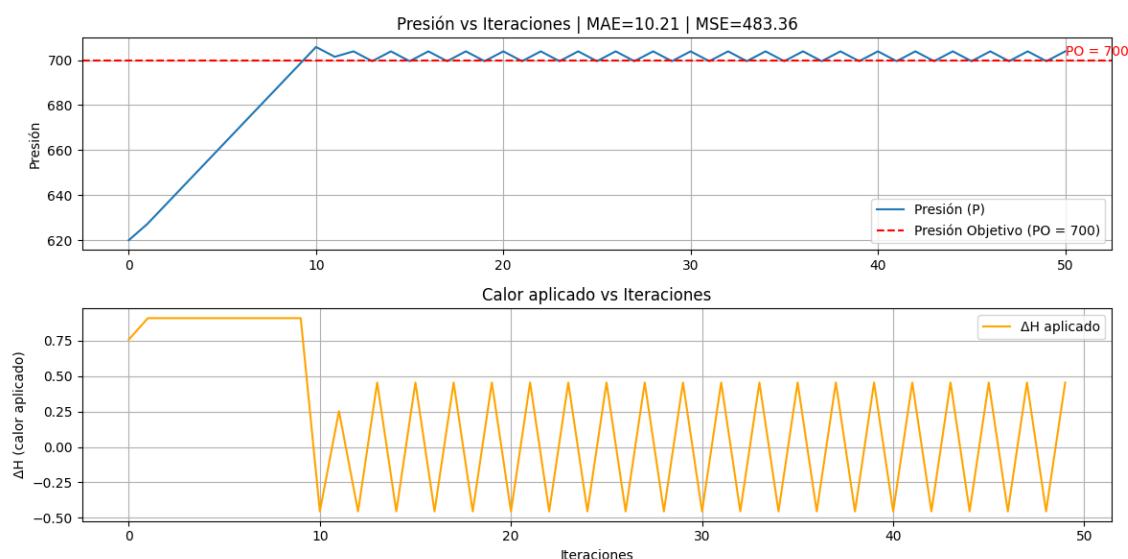


Figura 17: Evolución de la presión y del calor aplicado para el sistema con presión inicial de 620 y presión objetivo de 700, en 50 iteraciones.

En el mapa de reglas mostrado en figura 18, tiene una distribución más segmentada en comparación a los casos anteriores con des-difusión por centro de gravedad. Se observan zonas de oscilación claramente diferenciadas, donde las regiones de activación corresponden a rangos de error y tasa de cambio bien delimitados, reflejando el comportamiento más categórico propio del método de promedio de supremos.

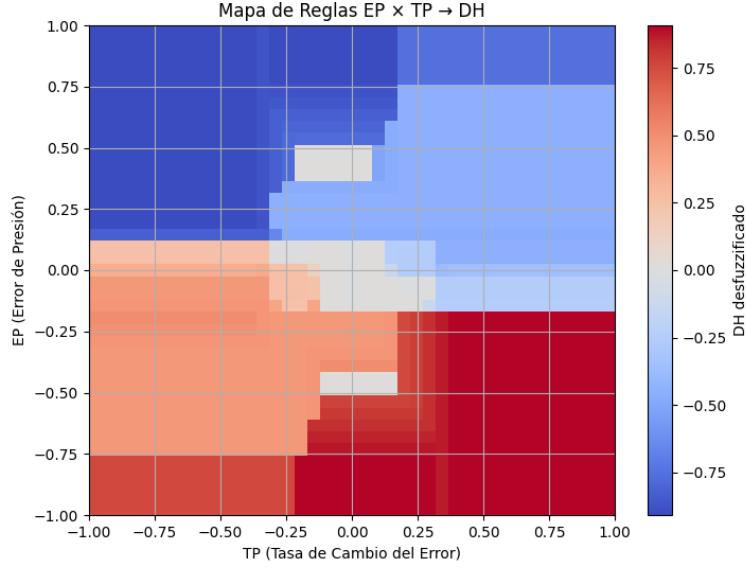


Figura 18: Mapa de desdiferenciación para el sistema con presión inicial de 620 y presión objetivo de 700, usando promedio de los supremos como método de desdiferenciación.

En la Figura 19, se observa que la trayectoria del sistema inicia en la región celeste (P_q), asociada a altas magnitudes positivas de acción de control. Este comportamiento es coherente, dado que el sistema requiere aplicar un alto ΔH inicialmente para corregir la presión. A medida que transcurren las iteraciones, la trayectoria avanza hacia zonas de menor intensidad, estabilizándose progresivamente cerca del objetivo.

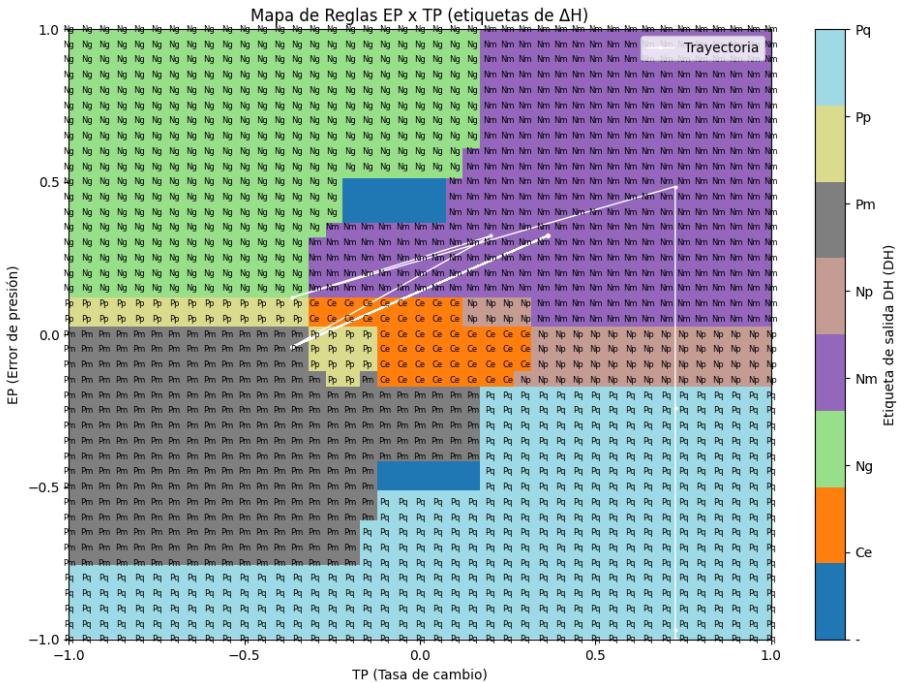


Figura 19: Trayectoria del sistema en el espacio EP vs TP, con etiquetas difusas de salida (DH). Simulación con presión inicial de 620 y presión objetivo de 700.

En la Figura 20, se muestra la secuencia de disparo de reglas para el caso de estudio. Similar al primer escenario por centro de gravedad caso 1, se observa la activación inicial de las reglas R1 y R2, seguida por la predominancia de la regla R16, lo cual es consistente con la condición inicial elevada. Posteriormente, el sistema transita hacia una activación alternante de reglas de ajuste fino, coherente con la trayectoria observada en el espacio de reglas.

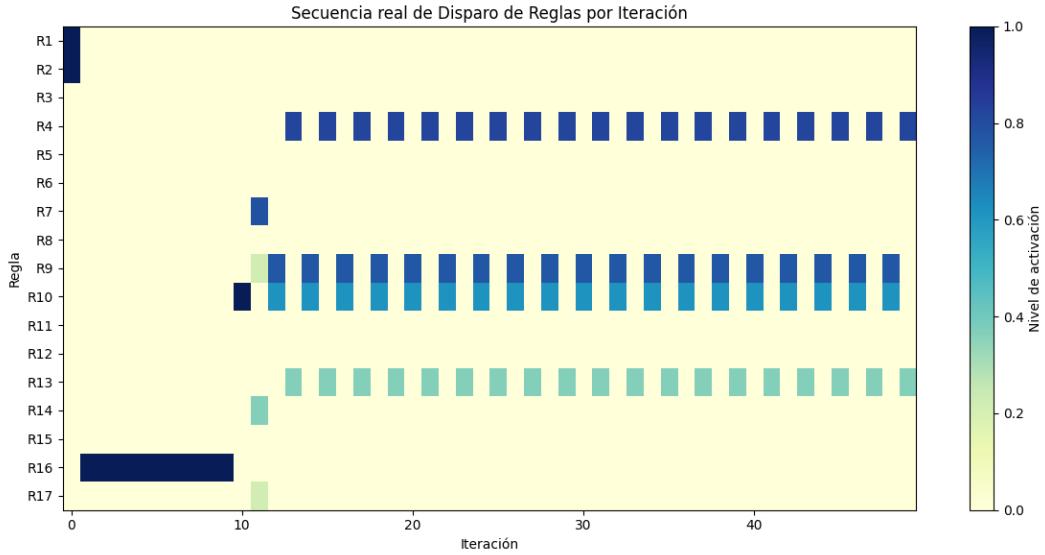


Figura 20: Secuencia de activación de reglas por iteración en el sistema con presión inicial de 620 y presión objetivo de 700.

Configuración Inicial caso 2

- Presión Objetivo (PO): 700
- Presión Inicial (P0): 720
- Iteraciones: 50
- Método de desdiferenciación: Promedio de los Supremos

En este caso, con presión inicial $P_0 = 720$ y empleando el método de des-difusión por promedio de los supremos, la Figura 21, evidencia una rápida estabilización hacia el objetivo alrededor de la iteración 5. Sin embargo, a diferencia del centroide, la presión oscila consistentemente por encima de P_O , predominando en el rango superior. La señal de control ΔH muestra una dinámica de corrección periódica menos amortiguada, con un salto más abrupto en las primeras iteraciones.

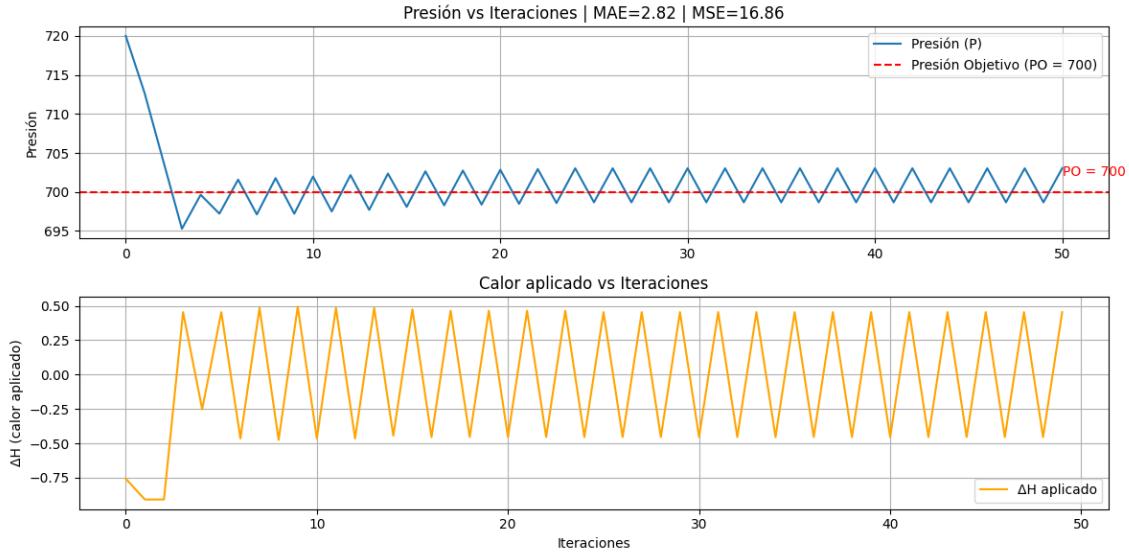


Figura 21: Evolución de la presión y del calor aplicado para el sistema con presión inicial de 720 y presión objetivo de 700, en 50 iteraciones.

La Figura 22, muestra un patrón de activación similar al observado en el primer caso usando el metodo de promedio de los supremos, aunque con ligeras variaciones. En este caso, las activaciones tienden a distribuirse de manera más "dienteada" entre los rangos positivos y negativos, reflejando la dinámica propia del método de promedio de los supremos, que genera una respuesta menos suavizada frente a las variaciones de entrada.

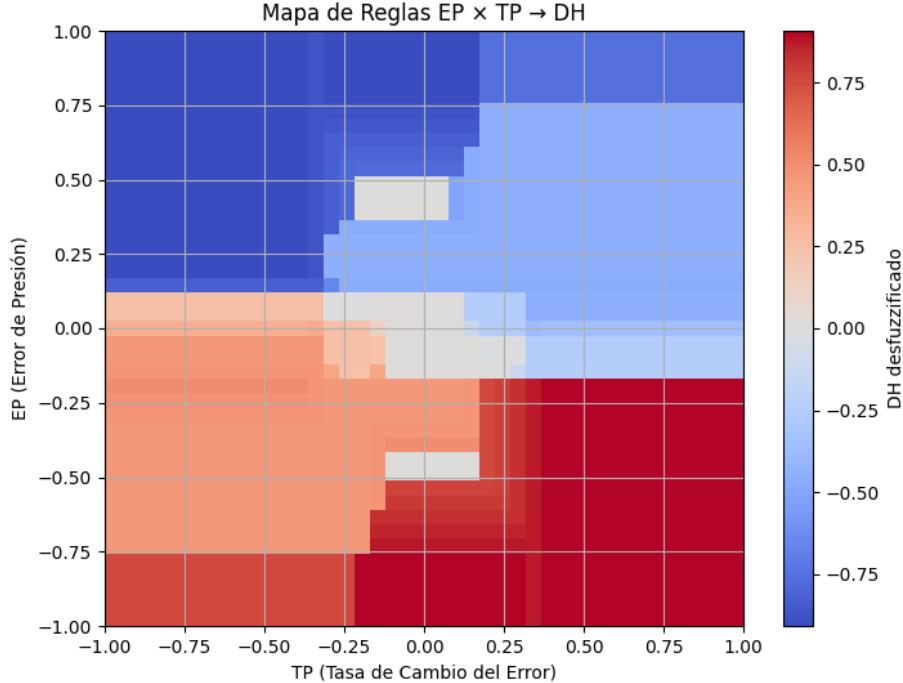


Figura 22: Mapa de desdifusificación para el sistema con presión inicial de 720 y presión objetivo de 700, usando promedio de los supremos como método de desdifusificación.

En la figura 23, se observa que la trayectoria inicia en la región verde (Ng), correspondiente a errores de presión negativos importantes, y avanza progresivamente hacia el centro del mapa a medida que el sistema se aproxima al objetivo. Esta dinámica es coherente con la fase de corrección inicial intensa seguida de ajustes más finos en torno al valor deseado.

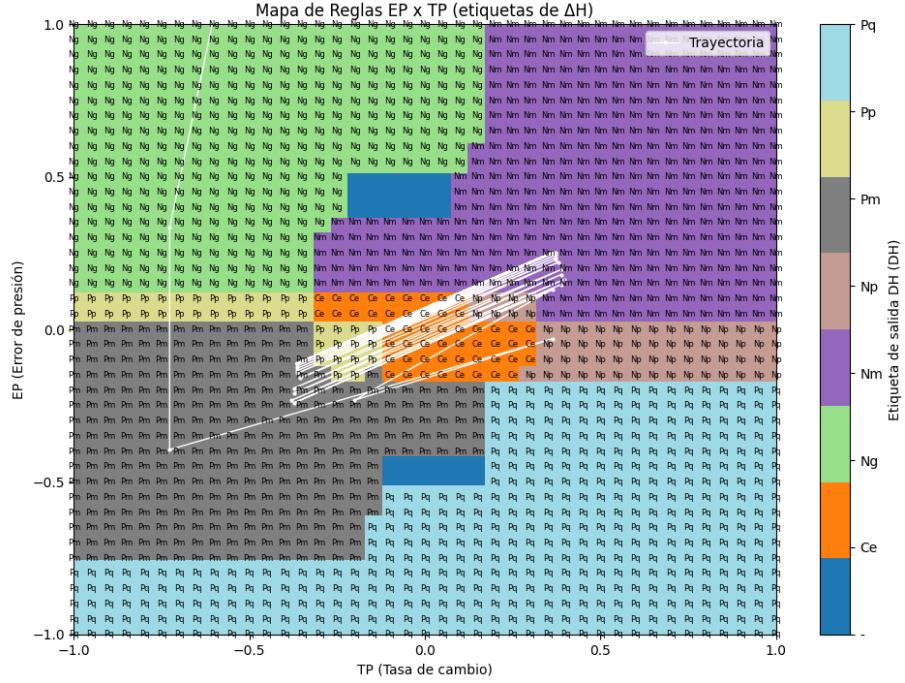


Figura 23: Trayectoria del sistema en el espacio EP vs TP, con etiquetas difusas de salida (DH). Simulación con presión inicial de 720 y presión objetivo de 700.

En la figura 24, se observa que las reglas se activan más rápidamente que en el caso anterior, pero presentan una activación de mayor cantidad de reglas con bajo nivel de activación. Esto refleja una dinámica de control menos estable, donde el sistema alterna frecuentemente entre varias reglas para mantener el comportamiento alrededor del objetivo.

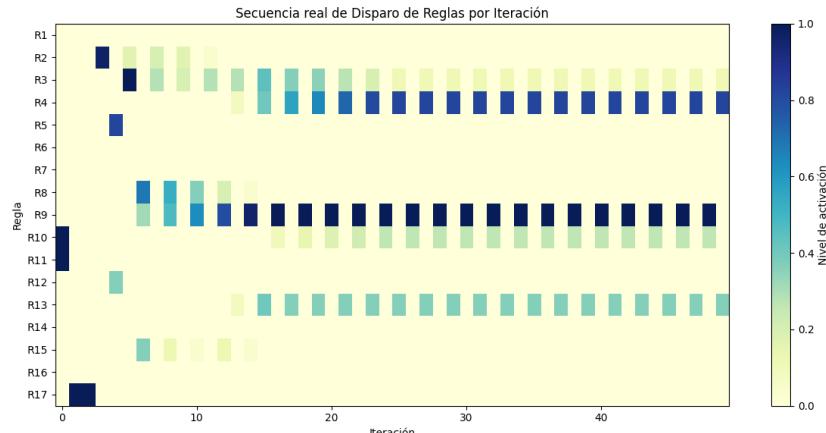


Figura 24: Secuencia de activación de reglas por iteración en el sistema con presión inicial de 720 y presión objetivo de 700.

Configuración Inicial caso 3

- Presión Objetivo (PO): 700
- Presión Inicial (P₀): 830
- Iteraciones: 50
- Método de des-difusión: Promedio de los Supremos

En este caso, con presión inicial $P_0 = 830$ y utilizando el método de des-difusión por promedio de los supremos, la Figura 25 muestra una aproximación al objetivo $P_O = 700$ en menos de 20 iteraciones. Posteriormente, la presión se mantiene oscilando en torno al valor de referencia de manera más precisa y controlada que en casos anteriores. La dinámica observada sugiere que este método ofrece un mejor desempeño para condiciones de presión inicial elevada, logrando una estabilización efectiva con menores sobreoscilaciones residuales en comparación al método de centro de gravedad.

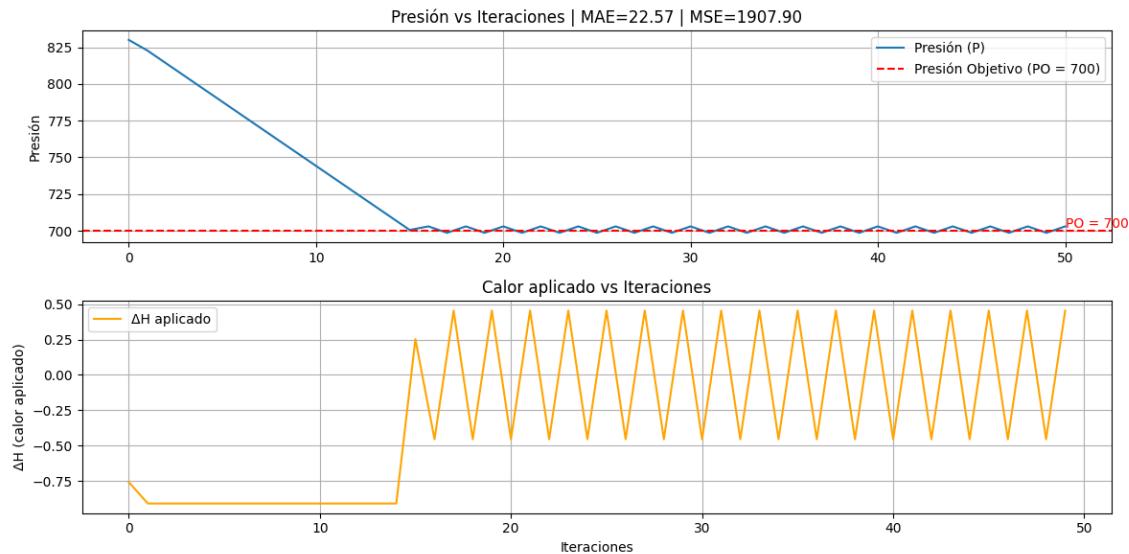


Figura 25: Evolución de la presión y del calor aplicado para el sistema con presión inicial de 830 y presión objetivo de 700, en 50 iteraciones.

La Figura 26 presenta el mapa de activación de reglas para el caso con presión inicial de $P_0 = 830$. Se observa que las regiones de activación son similares a las del caso 2, manteniendo una estructura consistente en la distribución de los valores de salida ΔH . Esto evidencia que el sistema tiende a activar reglas ubicadas en sectores cercanos al equilibrio dinámico, incluso con condiciones iniciales de presión más elevadas.

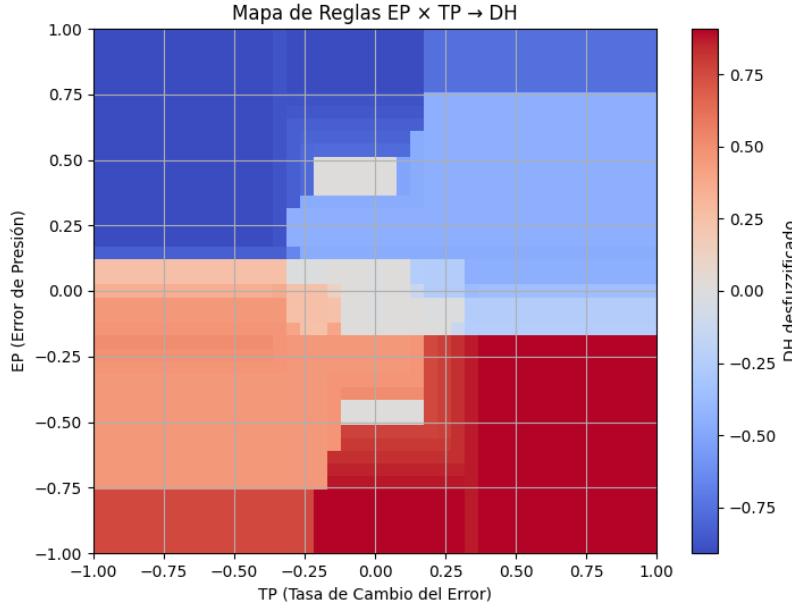


Figura 26: Mapa de desdiferenciación para el sistema con presión inicial de 830 y presión objetivo de 700, usando centroide como método de desdiferenciación.

La Figura 27 muestra la trayectoria seguida por el sistema en el espacio EPTP. Se observa que el ciclo inicia en la región asociada al conjunto Ng dada las presiones altas, para luego transitar de manera controlada hacia la zona central, recorriendo regiones etiquetadas como Pm y Ce, en donde oscila en esta última, no entrando en el conjunto.

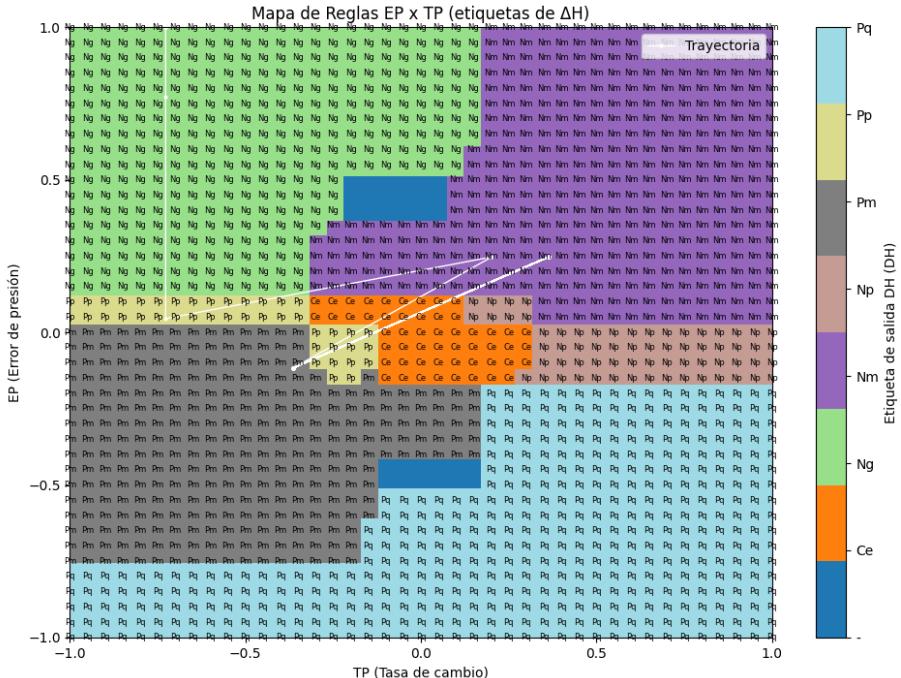


Figura 27: Trayectoria del sistema en el espacio EP vs TP, con etiquetas difusas de salida (DH). Simulación con presión inicial de 830 y presión objetivo de 700.

la secuencia de disparos figura 28, es un símil del caso 2, solo que se activan reglas con mayor fuerza en respuesta de la estabilización de la presión.

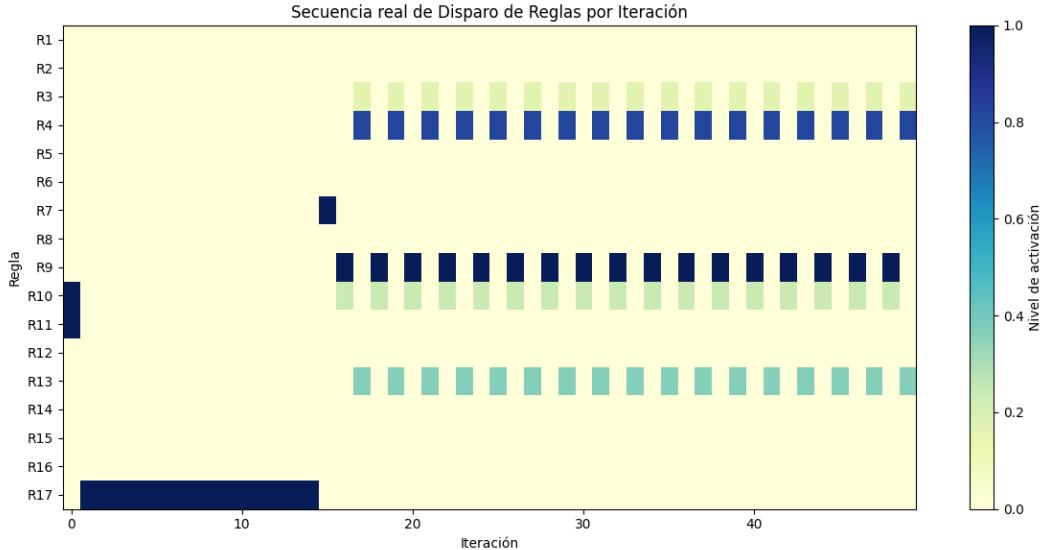


Figura 28: Secuencia de activación de reglas por iteración en el sistema con presión inicial de 830 y presión objetivo de 700.

3.3. Resultados por método de des-difusión Alturas

Configuración Inicial caso 1

- Presión Objetivo (PO): 700
- Presión Inicial (P0): 620
- Iteraciones: 50
- Método de des-difusión: Alturas

En este caso, con presión inicial $P_0 = 620$ y utilizando el método de des-difusión por **altura**, la Figura muestra que el sistema logra una aproximación estable hacia el objetivo $P_O = 700$ alrededor de la iteración 12. Posteriormente, la presión se mantiene oscilando de manera controlada y con menor amplitud en comparación a métodos anteriores, evidenciando un ajuste eficaz del controlador para presiones iniciales moderadas.

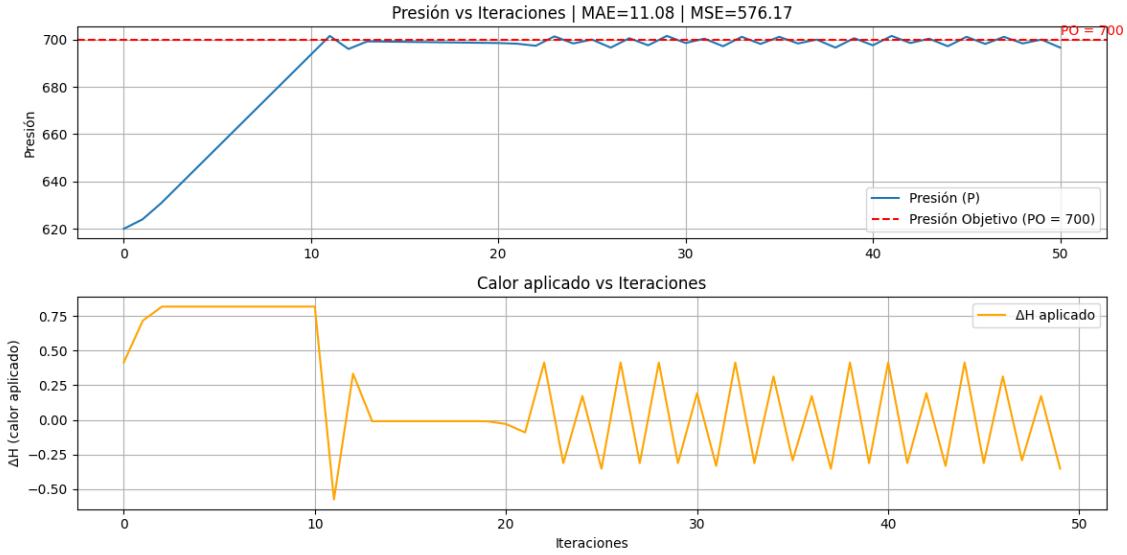


Figura 29: Evolución de la presión y del calor aplicado para el sistema con presión inicial de 620 y presión objetivo de 700, en 50 iteraciones.

En este caso figura 30, el patrón de activación es similar al observado para el método de promedios de los supremos.

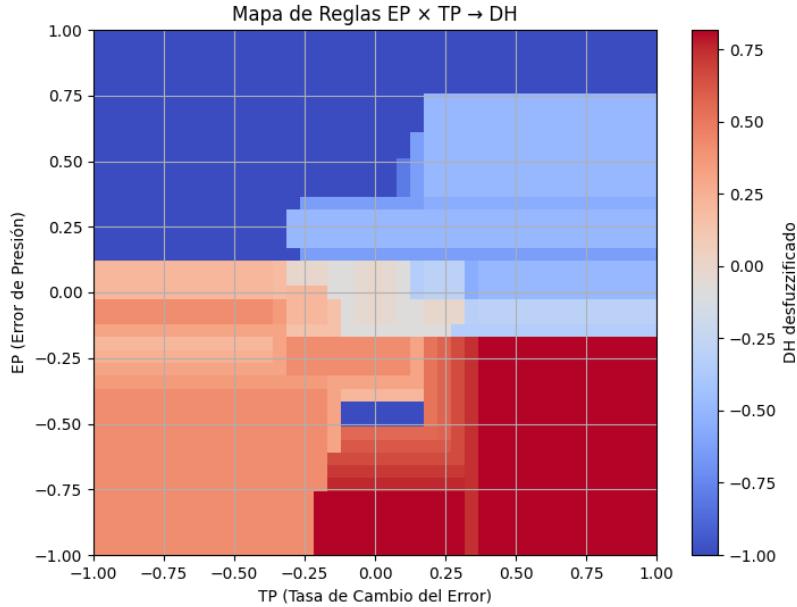


Figura 30: Mapa de des-difusión para el sistema con presión inicial de 620 y presión objetivo de 700, usando alturas como método de desdiferenciación.

En la figura se observa que la trayectoria iterativa comienza en la región dominada por la etiqueta Pq , asociada a altas acciones de corrección, y avanza progresivamente hacia la zona central del mapa, donde se encuentran los conjuntos intermedios, conforme el error de presión disminuye.

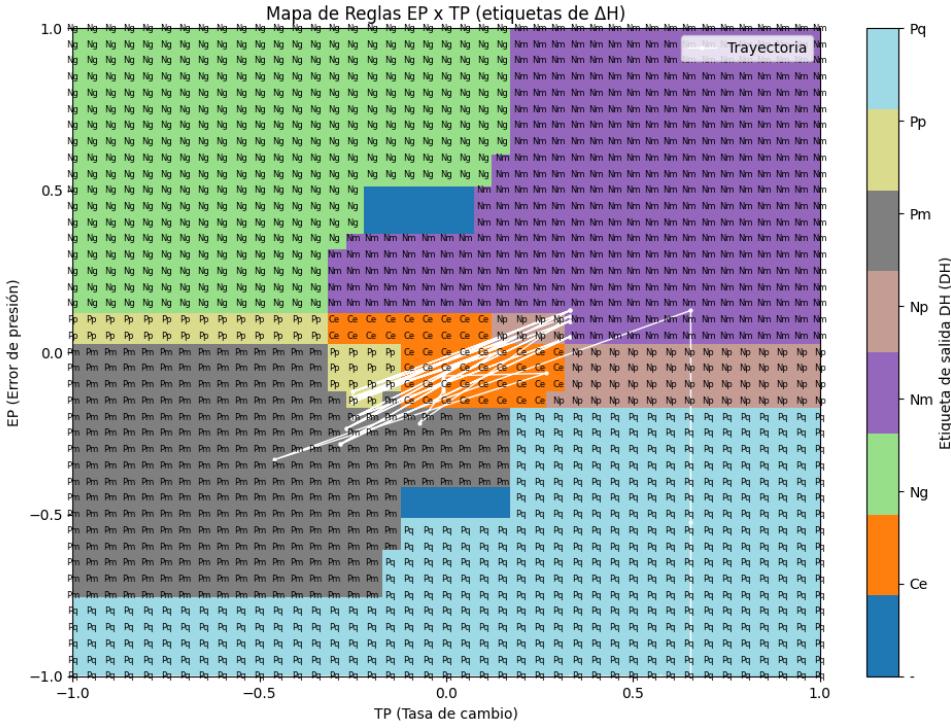


Figura 31: Trayectoria del sistema en el espacio EP vs TP, con etiquetas difusas de salida (DH). Simulación con presión inicial de 620 y presión objetivo de 700.

En figura 32, se observa que el método de alturas promueve una mayor activación de reglas en comparación a los métodos anteriores. Inicialmente, predominan las reglas R1, R2 y R16, lo que permite una corrección rápida del error. Posteriormente, se produce una transición hacia activaciones más diversas, con énfasis en la regla R6, aunque debido a la dinámica del error, se propaga la activación en múltiples reglas. Este comportamiento aporta una mayor suavidad y variabilidad en la trayectoria de iteraciones, favoreciendo un control más adaptativo.

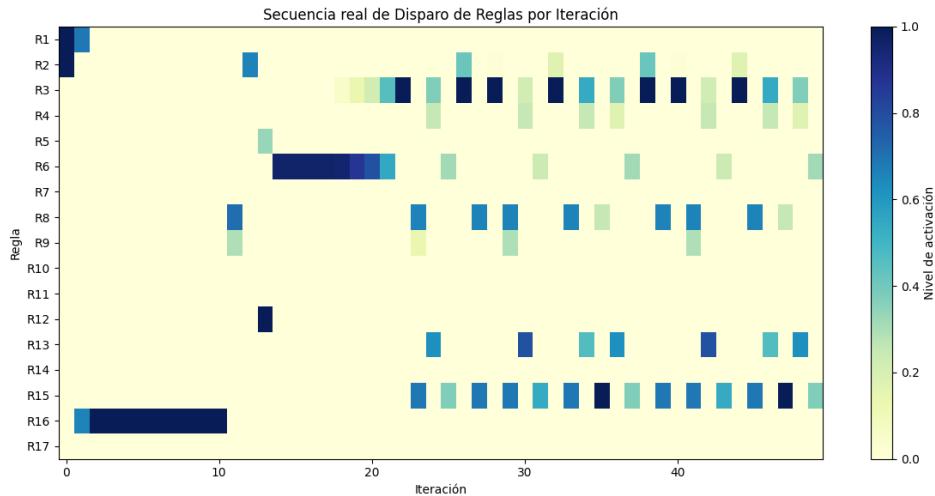


Figura 32: Secuencia de activación de reglas por iteración en el sistema con presión inicial de 620 y presión objetivo de 700.

Configuración Inicial caso 2

- Presión Objetivo (PO): 700
- Presión Inicial (P₀): 720
- Iteraciones: 50
- Método de desdiferenciamiento: Alturas

En este caso, con presión inicial $P_0 = 720$ y empleando el método de des-difusión por **altura**, la Figura muestra una rápida aproximación al objetivo $P_O = 700$ en torno a la iteración 5. Posteriormente, la presión oscila de manera controlada bajo el objetivo, siguiendo un patrón escalonado como triple montaña periódico.

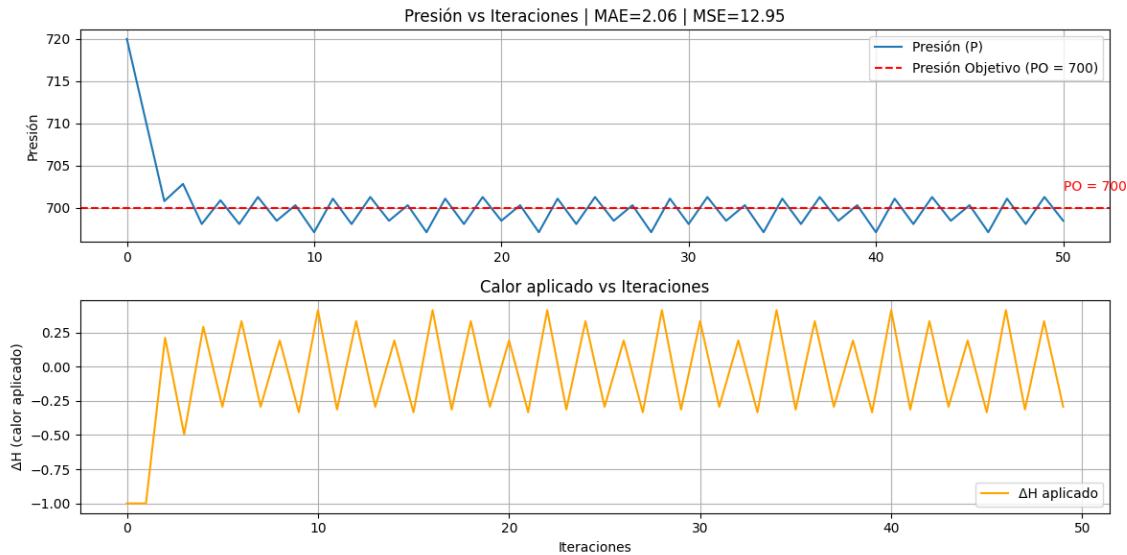


Figura 33: Evolución de la presión y del calor aplicado para el sistema con presión inicial de 720 y presión objetivo de 700, en 50 iteraciones.

El mapa de reglas obtenido presenta una distribución similar a la observada en el caso 1 bajo el método de altura. Sin embargo, se aprecia una leve variación en la forma de las regiones activadas, atribuible a la activación diferencial de reglas intermedias en torno al cero.

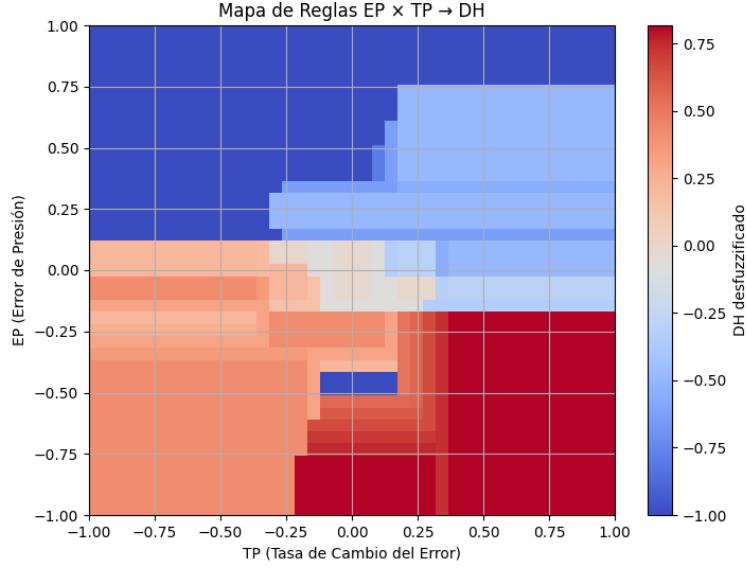


Figura 34: Mapa de desdiferenciación para el sistema con presión inicial de 720 y presión objetivo de 700, usando alturas como método de desdiferenciación.

En este caso, la trayectoria comienza en la región asociada al conjunto Nm , realizando un salto rápido hacia la región verde correspondiente a Ng . Posteriormente, la iteración desciende buscando estabilizarse en torno a la zona central, intentando alcanzar el conjunto Ce , aunque oscilando como es de esperar entre conjuntos adyacentes durante la fase de ajuste fino.

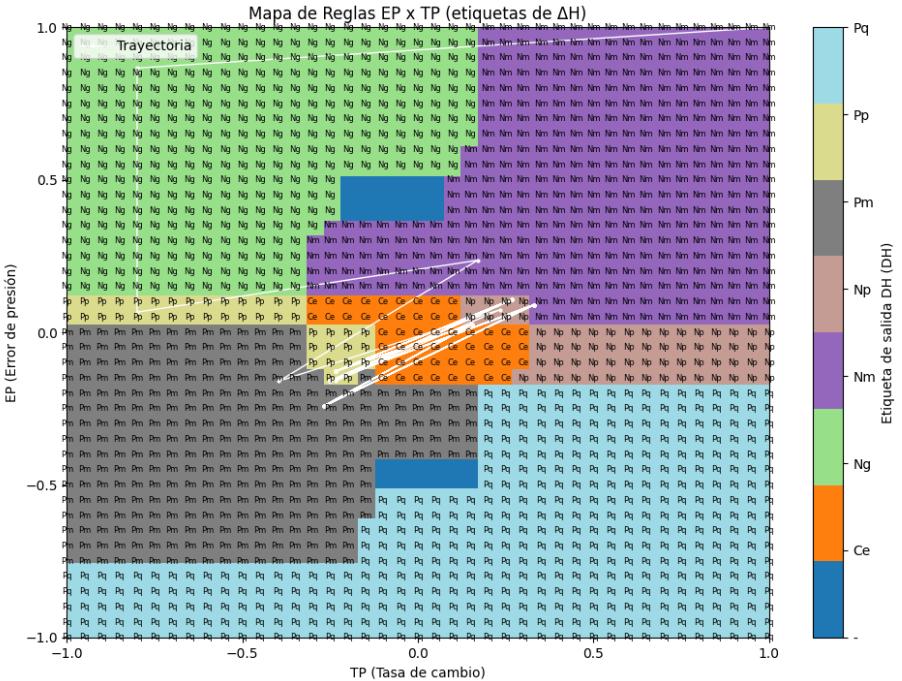


Figura 35: Trayectoria del sistema en el espacio EP vs TP, con etiquetas difusas de salida (ΔH). Simulación con presión inicial de 720 y presión objetivo de 700.

La secuencia de activaciones muestra inicialmente un disparo fuerte de las reglas $R10$ y $R11$, seguido por una transición hacia la regla $R17$. Posteriormente, el sistema desarrolla un patrón más complejo de activaciones múltiples, donde varias reglas comienzan a dispararse con distintos niveles de intensidad, reflejando una dinámica de ajuste más distribuida y menos concentrada en pocas reglas dominantes.

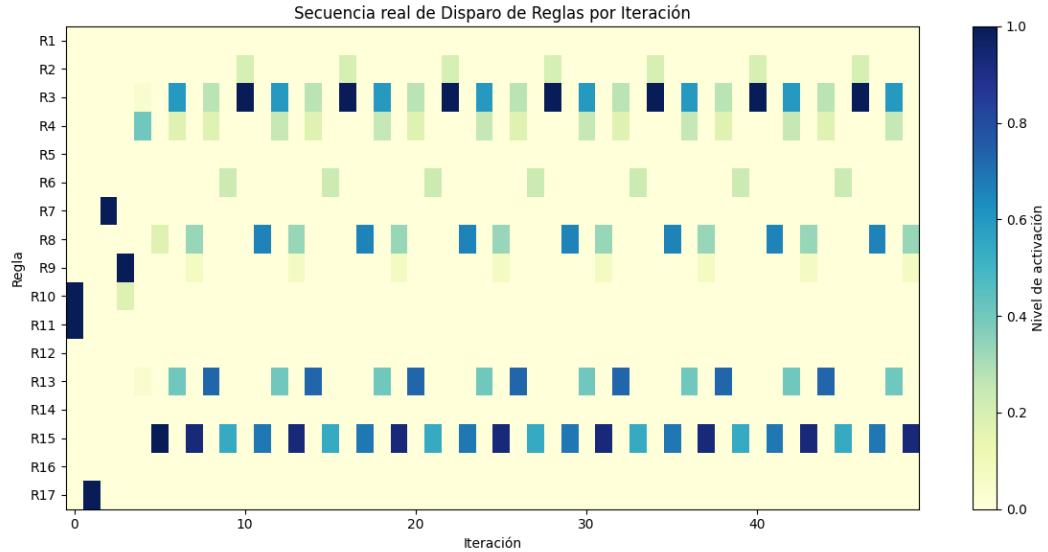


Figura 36: Secuencia de activación de reglas por iteración en el sistema con presión inicial de 720 y presión objetivo de 700.

Configuración Inicial caso 3

- Presión Objetivo (PO): 700
- Presión Inicial (P0): 830
- Iteraciones: 50
- Método de desdifusificación: Alturas

En el caso 3, con presión inicial $P_0 = 830$ y utilizando el método de des-difusión por altura, la Figura 37, muestra que el sistema alcanza el objetivo $P_O = 700$ alrededor de la iteración 14. Posteriormente, la presión mantiene un comportamiento oscilatorio muy ajustado en torno a la línea de referencia, evidenciando un control más preciso y estable que en el casos 2 anterior.

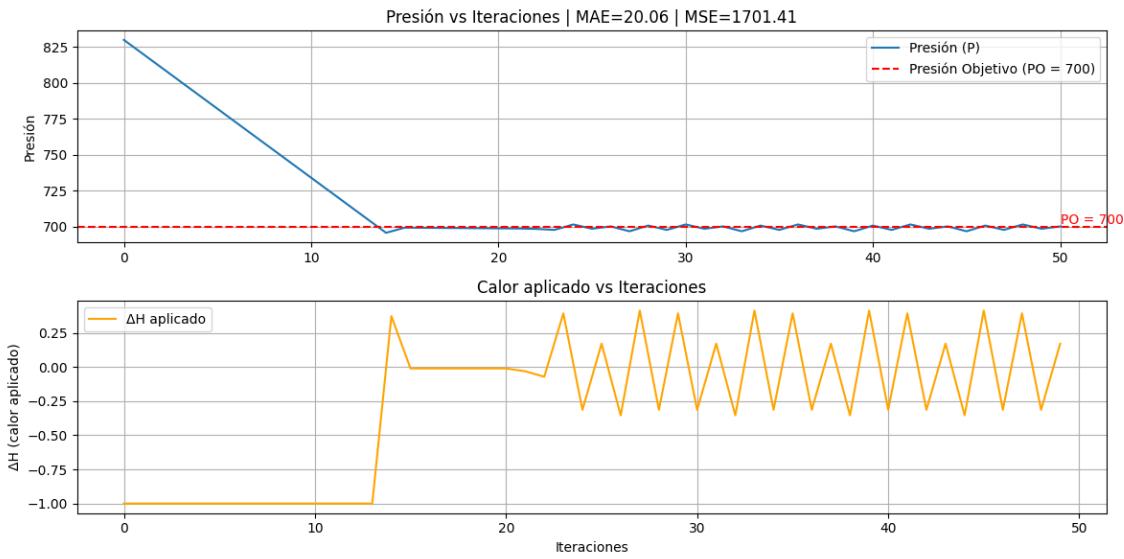


Figura 37: Evolución de la presión y del calor aplicado para el sistema con presión inicial de 830 y presión objetivo de 700, en 50 iteraciones.

En este caso, el patrón de activación es similar al observado en el caso 2, ya que, al partir de una presión inicial superior al objetivo, el sistema sigue una lógica de activaciones que prioriza regiones de corrección negativa, buscando una rápida convergencia hacia P_O .

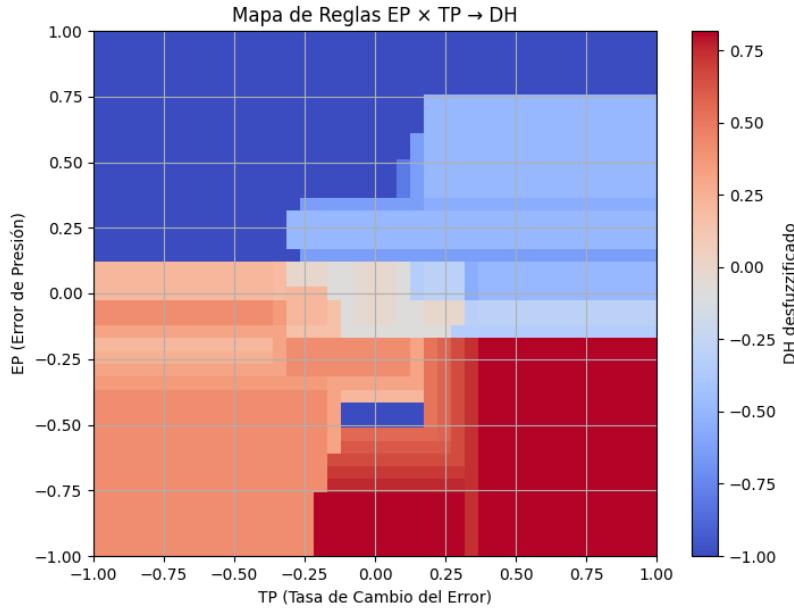


Figura 38: Mapa de desdifusificación para el sistema con presión inicial de 830 y presión objetivo de 700, usando alturas como método de desdifusificación.

En este caso, Figura 40, el patrón de activación de reglas es similar al observado en el caso 2. Inicialmente, se produce una activación de reglas 10 , 11 y 17 con alta activación para

conducir el sistema hacia el objetivo. Al acercarse al rango de presión deseado, el número de reglas activas disminuye, estabilizando el comportamiento. Sin embargo, una vez dentro del margen de oscilación fina, se incrementa nuevamente la activación de múltiples reglas, ajustando de forma dinámica pequeñas variaciones residuales.

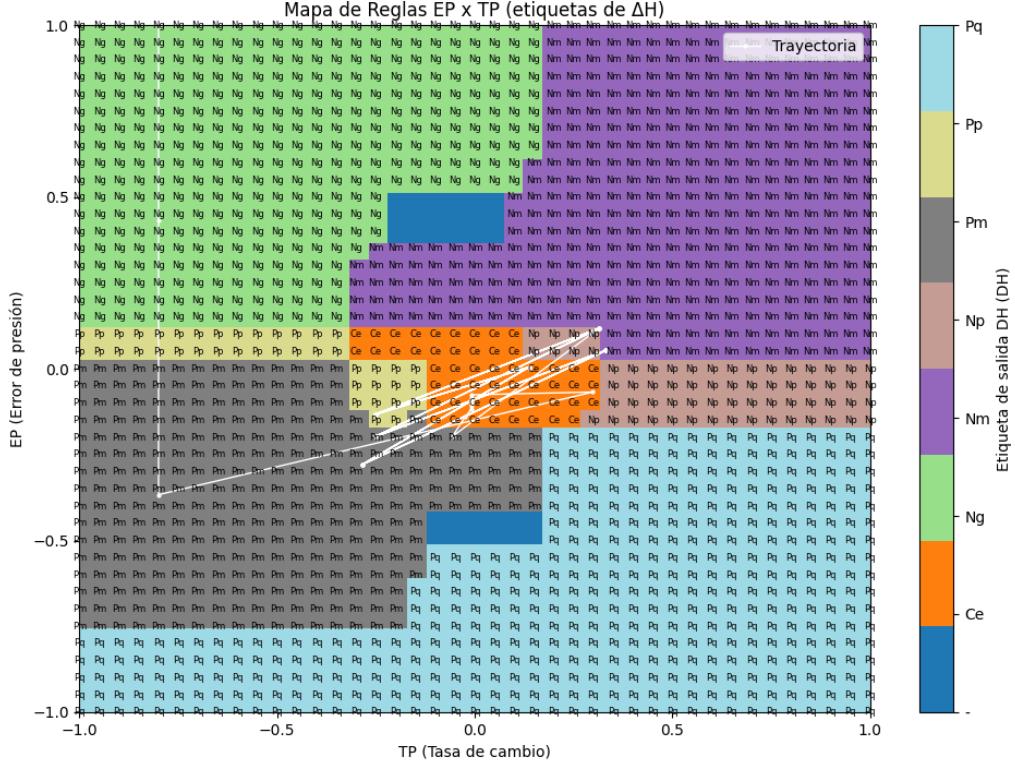


Figura 39: Trayectoria del sistema en el espacio EP vs TP, con etiquetas difusas de salida (DH). Simulación con presión inicial de 830 y presión objetivo de 700.

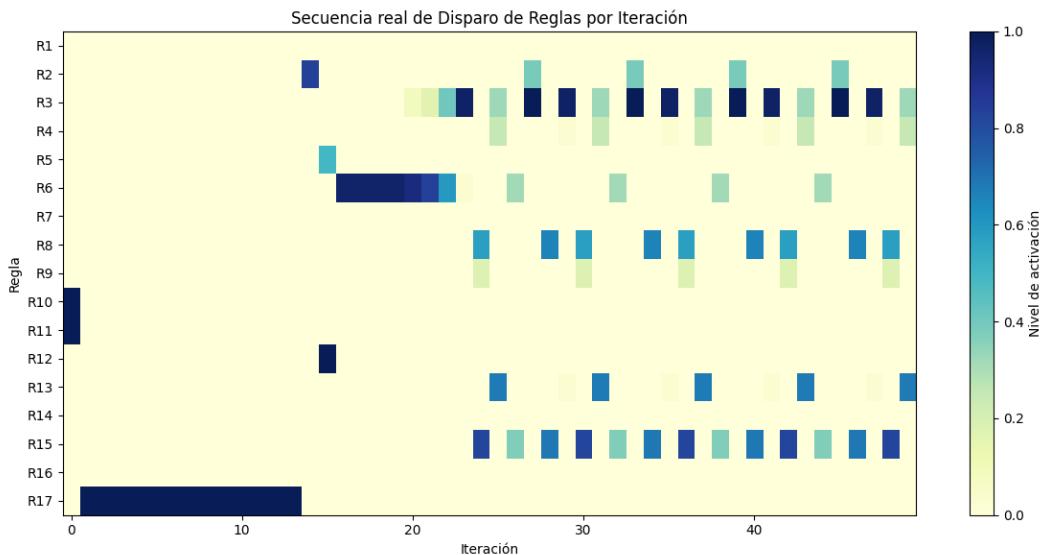


Figura 40: Secuencia de activación de reglas por iteración en el sistema con presión inicial de 830 y presión objetivo de 700.

4. Resultados Máquina Simplificada con variación de reglas y conjuntos

4.1. Resultados considerando reducción de reglas

4.1.1. Resultados por método de des-difusión Promedio de los Supremos

Configuración Inicial caso 1: Eliminación de reglas 9 y 16

- Presión Objetivo (PO): 700
- Presión Inicial (P0): 620
- Iteraciones: 50
- Método de des-difusión: Promedio de los Supremos
- Reglas excluidas:
 - Regla 9: EP: Pp, TP: [Np, Pq], DH: Nm
 - Regla 16: EP: [Ng, Np], TP: [Pm, Pq], DH: Pq

En este apartado se evalúa la respuesta del sistema ante la **eliminación de las reglas 9 y 16**, utilizando como caso base una presión inicial de $P_0 = 620$ y aplicando el método de des-difusión por **promedio de los supremos**. La Figura 41, muestra que la trayectoria de aproximación ya no sigue un patrón lineal suave, sino que adquiere un comportamiento **escalonado**, evidenciando interrupciones en la convergencia hacia el objetivo.

Esta dinámica se explica por la exclusión de reglas prioritarias para esta condición de entrada, en particular las reglas 9 y 16, las cuales juegan un rol clave en la corrección inicial del error. Tal comportamiento es confirmado al analizar la secuencia de activación de reglas, donde se observan vacíos y cambios abruptos en los patrones de disparo.

Este fenómeno podría extrapolarse a otros escenarios (casos 2 y 3) si se aplicara la misma metodología de reducción de reglas, debiendo ajustarse en cada caso las reglas relevantes según su activación en el sistema original.

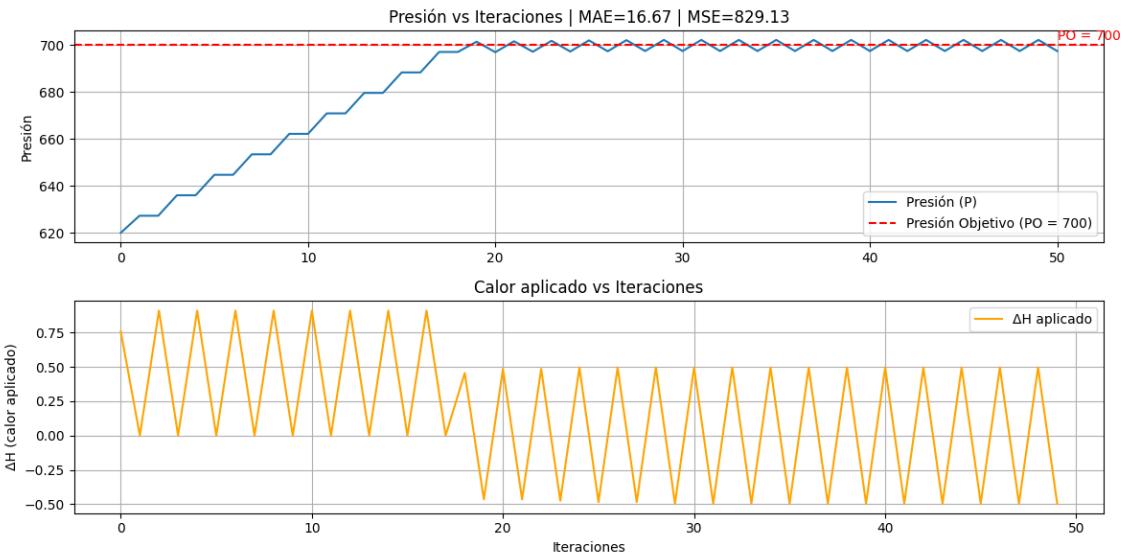


Figura 41: Evolución de la presión y del calor aplicado para el sistema con presión inicial de 620 y presión objetivo de 700, en 50 iteraciones.

En el mapa de reglas se evidencia un cambio significativo en la distribución de las activaciones. La eliminación de las reglas 9 y 16 altera la estructura del espacio EPTP, modificando claramente las regiones de salida y los patrones de color respecto al caso completo. El área de acción se vuelve menos continua, reflejando la pérdida de conexiones críticas que afectaban la transición suave hacia el objetivo en el método de promedio de los supremos.

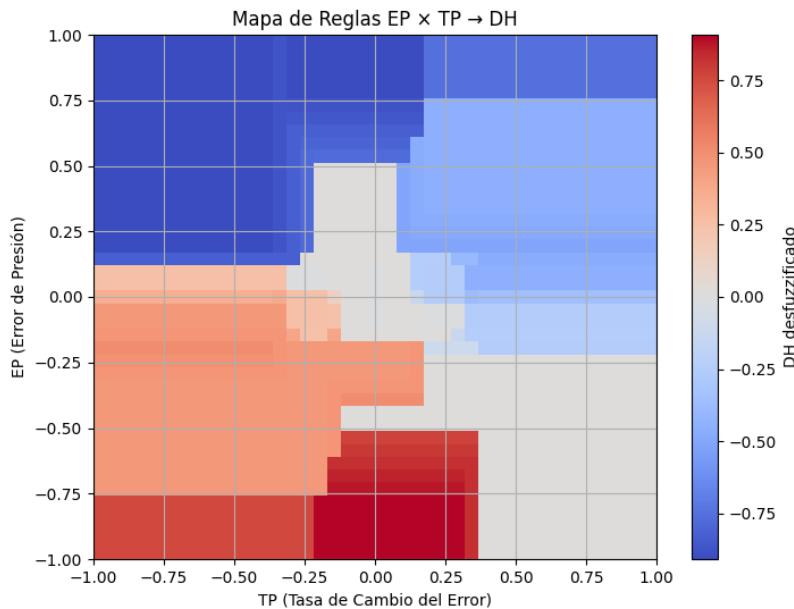


Figura 42: Mapa de des-difusión para el sistema con presión inicial de 620 y presión objetivo de 700, usando promedio de los supremos como método de des-difusión.

En figura 43, como era de esperar, la trayectoria del sistema se ve significativamente alterada al eliminar reglas clave, en particular la regla 16. El recorrido muestra un comportamiento más abrupto y zigzagueante, evidenciando mayores oscilaciones en la búsqueda de la región central de control. Esta inestabilidad refleja la pérdida de suavidad y dirección que aportaban las reglas eliminadas, afectando el ajuste progresivo del sistema hacia el objetivo.

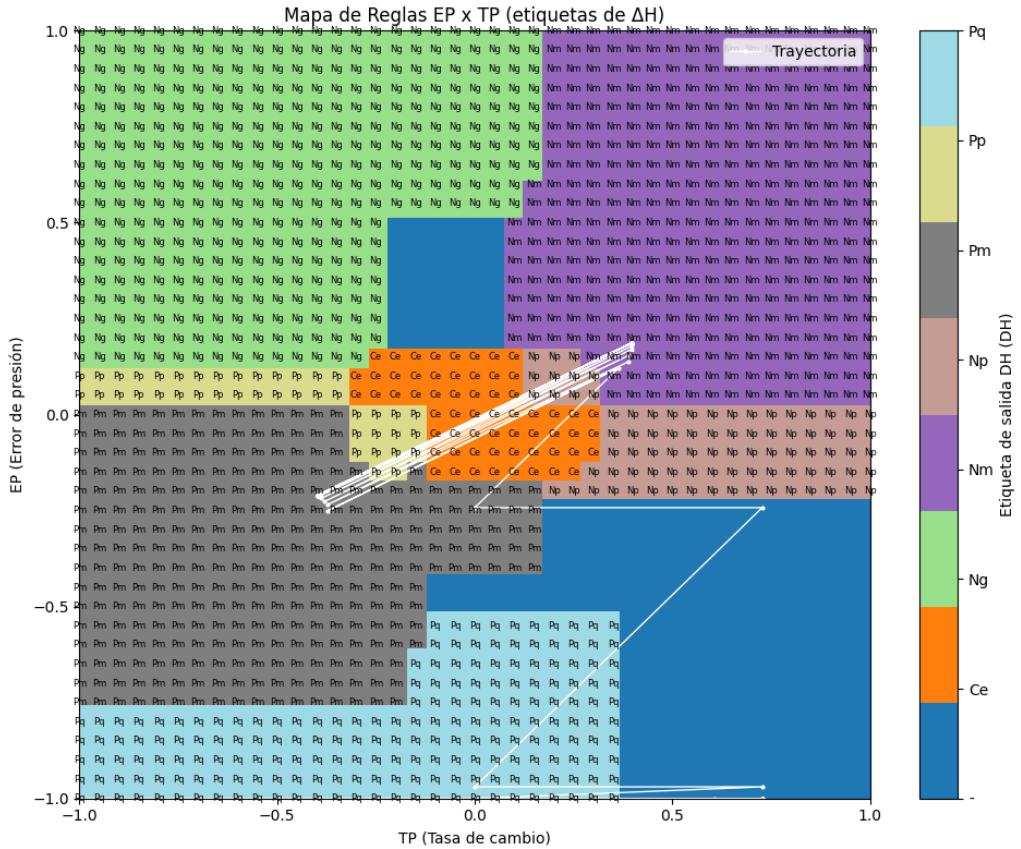


Figura 43: Trayectoria del sistema en el espacio EP vs TP, con etiquetas difusas de salida (DH). Simulación con presión inicial de 620 y presión objetivo de 700.

En la secuencia de activaciones se evidencia que no ocurre la activación inicial de la regla 16, como sí sucedía en el caso original con todas las reglas. En su lugar, se observa la activación de la regla 1, que actúa como compensación en la toma de decisiones para aproximar el modelo a la presión objetivo. Posteriormente, en la región de oscilaciones, se percibe una activación más baja de reglas, destacando además la ausencia de la regla 9, lo que provoca un disparo de reglas diferentes, como las reglas 3 y 8. Cabe destacar que, al eliminar dos reglas para esta prueba, se ajustó el orden en el diagrama considerando un total de 15 reglas, reasignando los índices (por ejemplo, la antigua regla 10 pasó a ser la nueva 9, la 11 pasó a 10, y así sucesivamente). Este ajuste puede revisarse directamente en el código de simulación.

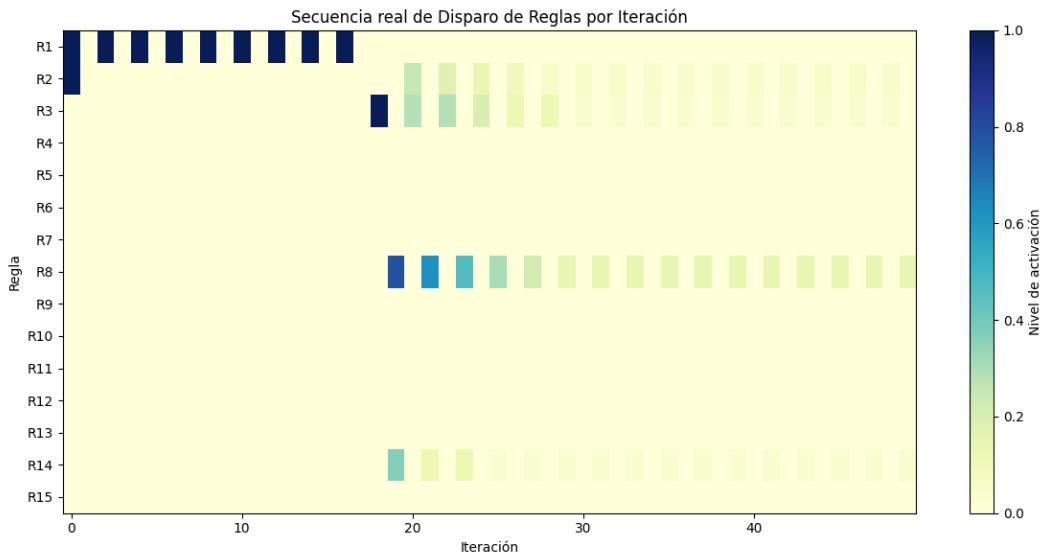


Figura 44: Secuencia de activación de reglas por iteración en el sistema con presión inicial de 620 y presión objetivo de 700.

4.1.2. Resultados por método de des-difusión Centro de Gravedad

Configuración Inicial caso 2: Eliminación de reglas 9 y 16

- Presión Objetivo (P_O): 700
- Presión Inicial (P_0): 620
- Iteraciones: 50
- Método de des-difusión: Centro de Gravedad
- Reglas excluidas:
 - Regla 9: EP: P_p , TP: $[N_p, P_q]$, DH: N_m
 - Regla 16: EP: $[N_g, N_p]$, TP: $[P_m, P_q]$, DH: P_q

En este apartado, aplicando nuevamente la eliminación de las reglas 9 y 16, pero empleando el método de des-difusión por centro de gravedad, se observa un comportamiento similar al caso anterior. La Figura 45 muestra que el sistema alcanza rápidamente el objetivo alrededor de la iteración 20, aunque manteniendo oscilaciones menores y un ajuste más gradual hacia $P_O = 700$. La trayectoria evidencia un patrón más continuo en comparación al método de supremos, pero con perturbaciones notorias atribuibles a la reducción de reglas críticas.

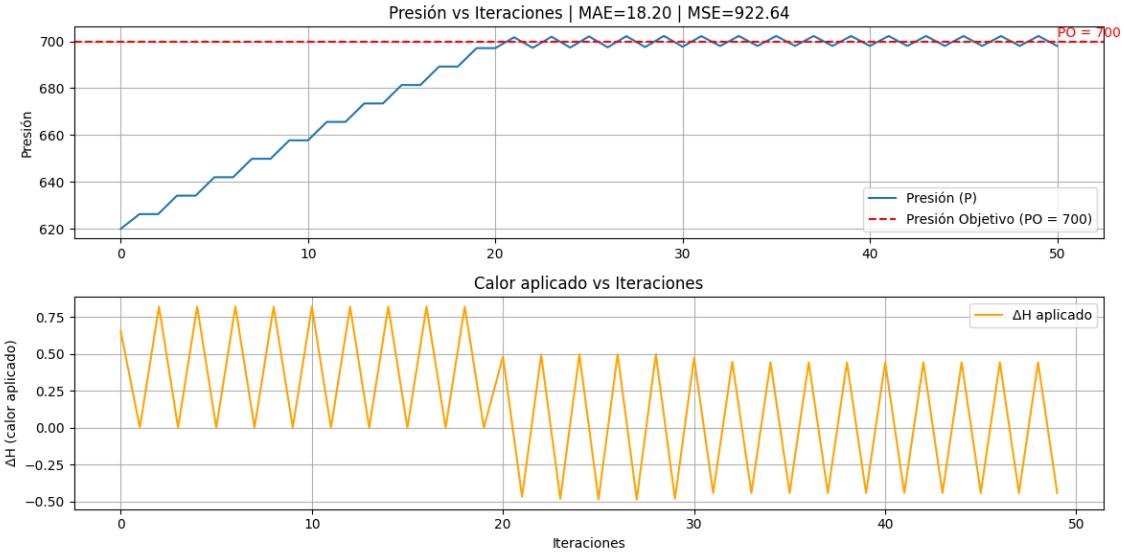


Figura 45: Evolución de la presión y del calor aplicado para el sistema con presión inicial de 620 y presión objetivo de 700, en 50 iteraciones.

El mapa de reglas correspondiente a este caso muestra un patrón general de activaciones similar al observado con el método de promedio de los supremos. Sin embargo, se aprecian zonas de activación intermedia más dispersas, particularmente alrededor del centro del espacio EPTP, lo cual evidencia que la dinámica de control bajo el método de centroide tiende a suavizar la transición entre conjuntos adyacentes, aunque la ausencia de las reglas eliminadas sigue afectando la coherencia global del sistema.

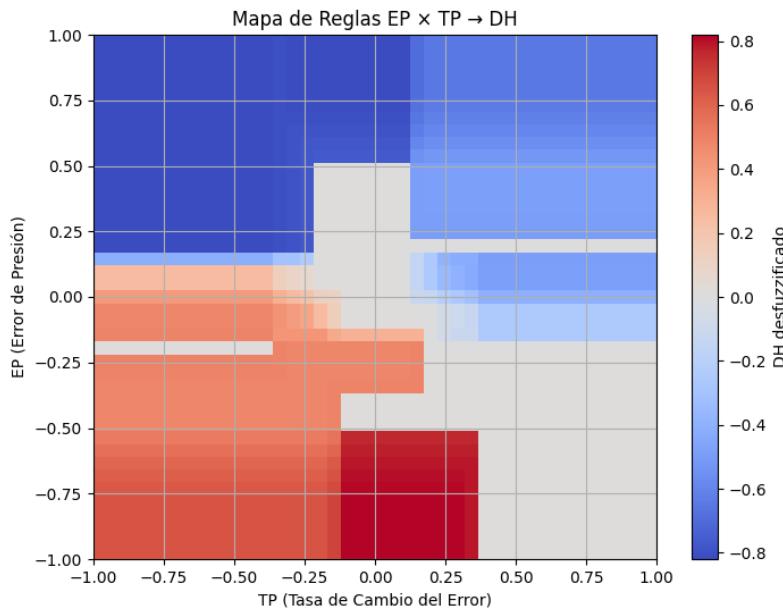


Figura 46: Mapa de des-difusión para el sistema con presión inicial de 620 y presión objetivo de 700, usando promedio de los supremos como método de des-difusión.

La trayectoria mostrada evidencia que, debido a la eliminación de reglas clave, la región celeste Pq se expande levemente, alterando la dinámica esperada. Inicialmente, el sistema intenta estabilizarse cerca del objetivo, pero rápidamente se produce un zigzagueo pronunciado en el espacio EPTP, reflejo de la falta de continuidad en las acciones correctivas. Posteriormente, aunque logra aproximarse hacia la región central, la trayectoria mantiene oscilaciones residuales más amplias que en el caso completo, comprometiendo parcialmente la eficiencia de la convergencia.

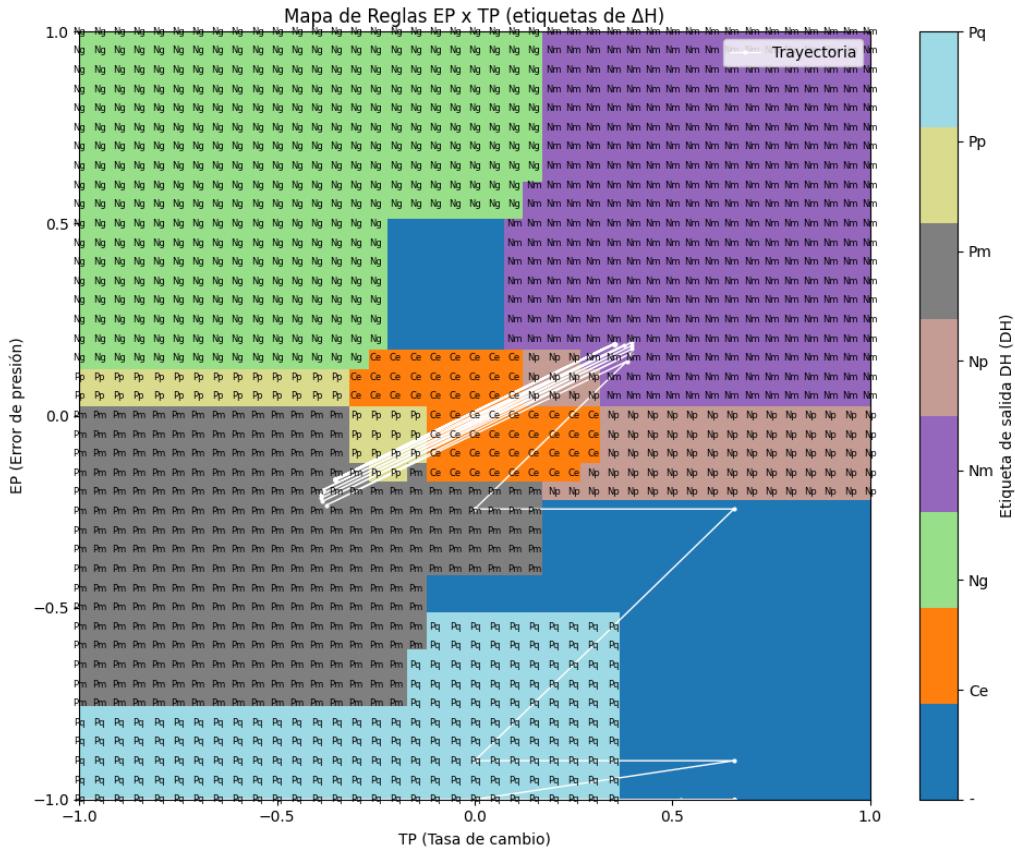


Figura 47: Trayectoria del sistema en el espacio EP vs TP, con etiquetas difusas de salida (DH). Simulación con presión inicial de 620 y presión objetivo de 700.

Respecto a la secuencia real de disparo de reglas, se observa un comportamiento similar al registrado en el caso anterior. Predominan activaciones iniciales de las reglas 1 y 2, debido a la falta de las reglas 9 y 16, seguidas de una transición hacia patrones menos intensos y más dispersos en las iteraciones de estabilización. El sistema intenta compensar la ausencia de las reglas eliminadas mediante una mayor participación de reglas intermedias, manteniendo cierta regularidad en las activaciones finales.

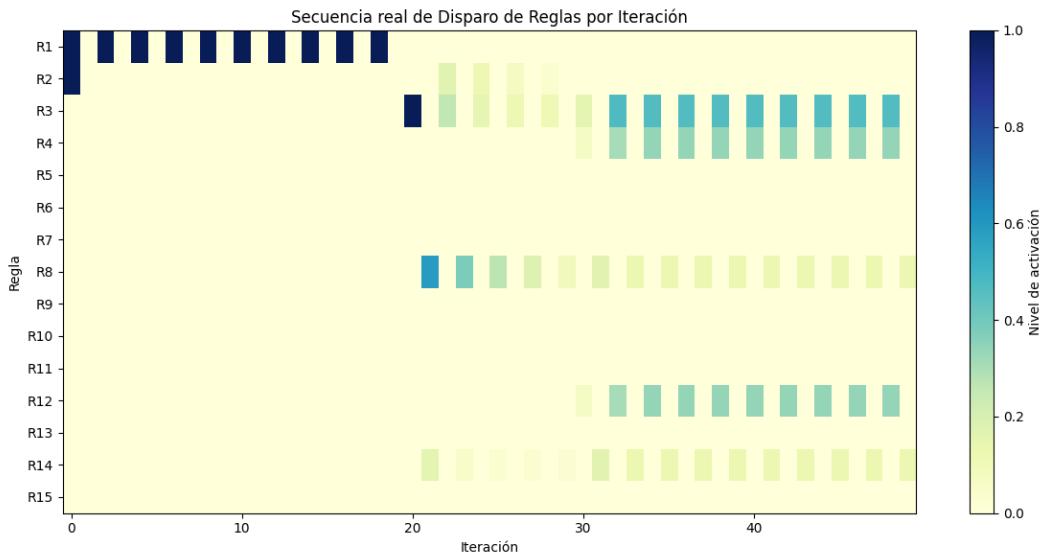


Figura 48: Secuencia de activación de reglas por iteración en el sistema con presión inicial de 620 y presión objetivo de 700.

4.1.3. Resultados por método de des-difusión Alturas

Configuración Inicial caso 3: Eliminación de reglas 9 y 16

- Presión Objetivo (PO): 700
- Presión Inicial (P0): 620
- Iteraciones: 50
- Método de des-difusión: Alturas
- Reglas excluidas:
 - Regla 9: EP: Pp, TP: [Np, Pq], DH: Nm
 - Regla 16: EP: [Ng, Np], TP: [Pm, Pq], DH: Pg

En este caso, utilizando el método de des-difusión por altura y una presión inicial de $P_0 = 620$, se observa que el sistema no logra aproximarse al valor objetivo $P_O = 700$ dentro del número de iteraciones consideradas. Como se muestra en la Figura 49, la presión se mantiene significativamente por debajo de P_O , evidenciando una deficiencia de control.

Esta dinámica confirma que las reglas eliminadas (9 y 16) cumplen un rol prioritario en este escenario, ya que son esenciales para direccionar la corrección del error cuando se emplea el método de alturas, dada su naturaleza de búsqueda de secciones particulares del espacio de control.

Si bien existe una leve tendencia ascendente en la presión, su pendiente es insuficiente para alcanzar la región objetivo en los 50 ciclos considerados. Esto sugiere que, aunque

teóricamente el sistema podría estabilizarse tras un número elevado de iteraciones, su desempeño práctico es inadecuado bajo esta configuración reducida.

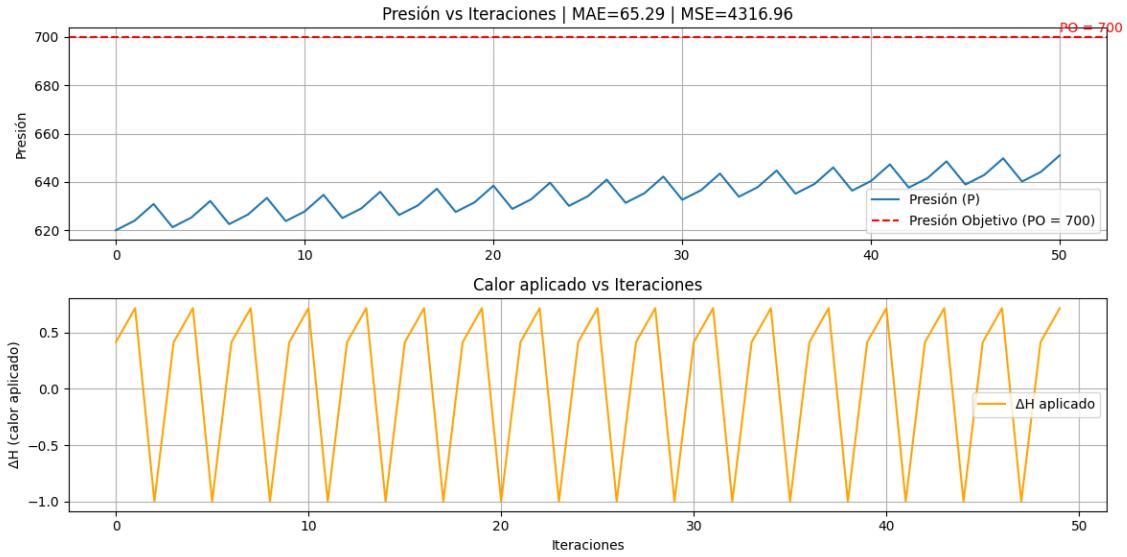


Figura 49: Evolución de la presión y del calor aplicado para el sistema con presión inicial de 620 y presión objetivo de 700, en 50 iteraciones.

Respecto a las activaciones de reglas, la Figura 50 muestra la distribución espacial resultante bajo la configuración de eliminación de reglas y utilizando el método de des-difusión por altura. Se observa que el sistema aún mantiene una estructura general similar a los casos anteriores, pero presenta zonas de transición más abruptas y una notable pérdida de suavidad. Esto es consistente con el comportamiento deficiente evidenciado en la trayectoria de presión, donde la falta de reglas prioritarias impide al sistema corregir adecuadamente su evolución hacia el objetivo.

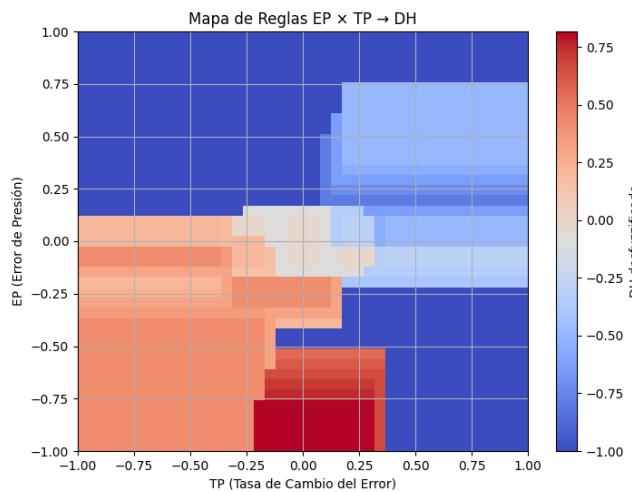


Figura 50: Mapa de des-difusión para el sistema con presión inicial de 620 y presión objetivo de 700, usando promedio de los supremos como método de des-difusión.

Respecto a la trayectoria de evolución del sistema Figura 51, se observa que, tras la eliminación de las reglas 9 y 16, el sistema queda estancado en una región inicial de activación, sin lograr avanzar de forma efectiva hacia la zona media del espacio de decisión.

A diferencia de los casos anteriores donde la trayectoria mostraba un patrón zigzagueante hacia el equilibrio, en esta configuración el modelo permanece atrapado en torno a un valor de $TP \approx 0,5$, indicando una incapacidad de corregir de manera dinámica el error de presión.

Este comportamiento refleja claramente la importancia estructural de las reglas eliminadas para guiar la evolución del sistema en escenarios de presión inicial baja.

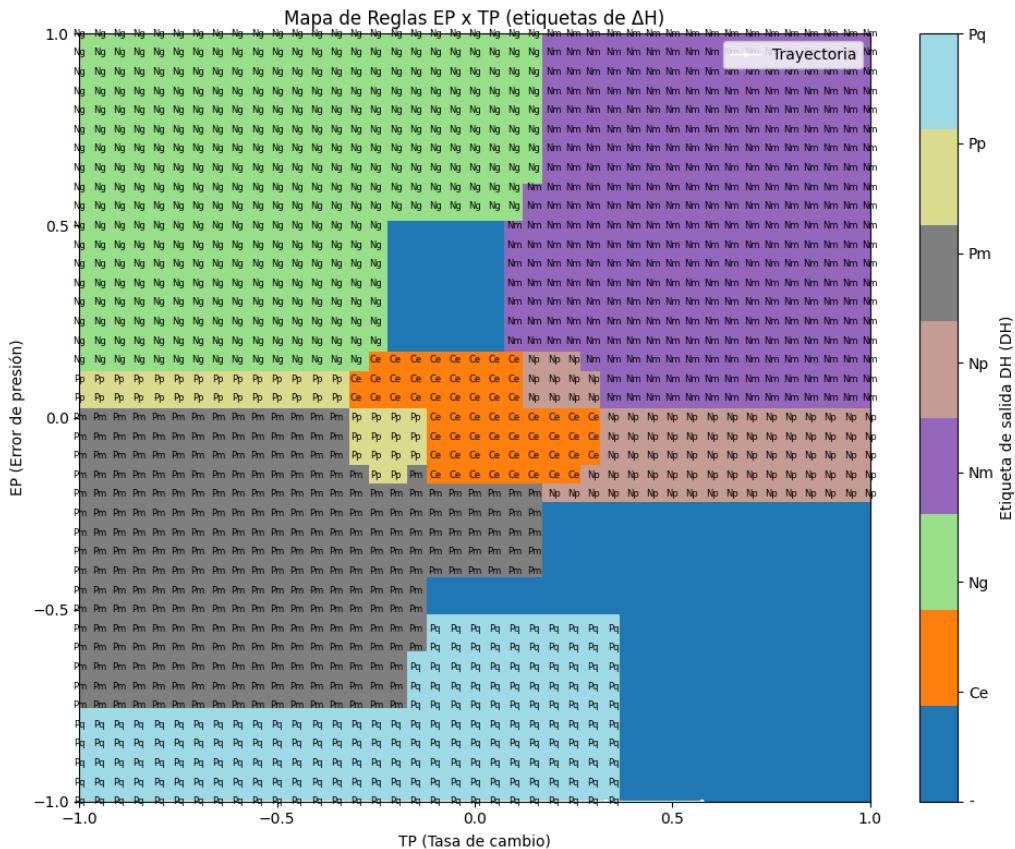


Figura 51: Trayectoria del sistema en el espacio EP vs TP, con etiquetas difusas de salida (DH). Simulación con presión inicial de 620 y presión objetivo de 700.

En la Figura 52 se muestra la secuencia real de activación de reglas tras la eliminación de las reglas 9 y 16, empleando el método de desdifusión por altura. Se evidencia que, debido a la imposibilidad del sistema para aproximarse rápidamente a la presión objetivo, la activación queda dominada casi exclusivamente por las reglas R1 y R2.

Estas reglas se disparan de forma periódica a lo largo de las iteraciones, reflejando intentos repetidos del sistema por corregir el error sin éxito significativo. Sólo ocasionalmente aparecen activaciones de otras reglas, de menor intensidad, asociadas a fluctuaciones menores en la evolución de la presión.

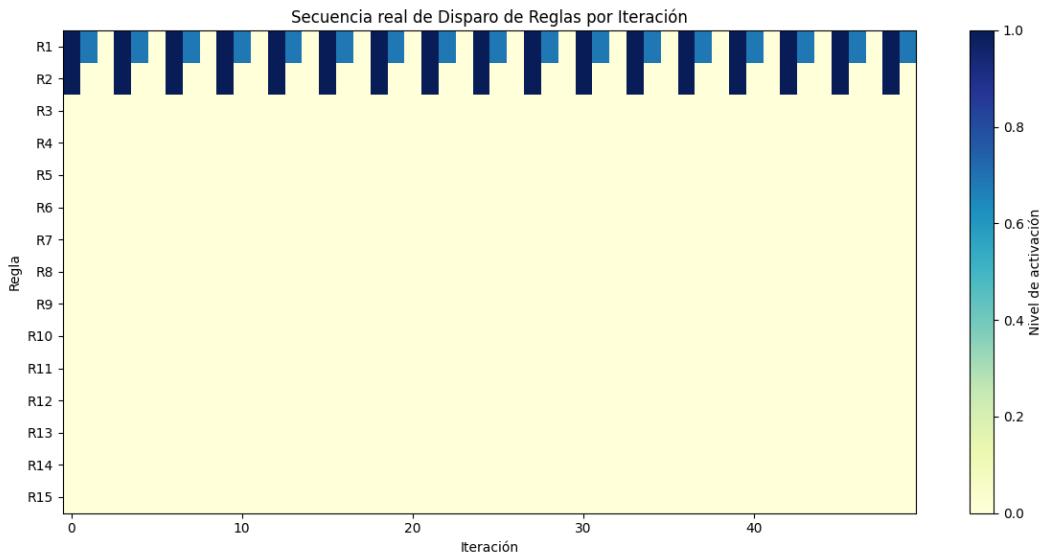


Figura 52: Secuencia de activación de reglas por iteración en el sistema con presión inicial de 620 y presión objetivo de 700.

4.2. Resultados sistema deficiente mínimo de reglas reducidas

4.2.1. Resultados por método de des-difusión Promedio de los Supremos

Configuración Inicial caso 1: Eliminación de reglas 1, 9 y 16

- Presión Objetivo (PO): 700
- Presión Inicial (P0): 620
- Iteraciones: 50
- Método de des-difusión: Promedio de los Supremos
- Reglas excluidas:
 - Regla 1: EP: Ng, TP: [Ng, Pp], DH: Pq
 - Regla 9: EP: Pp, TP: [Np, Pq], DH: Nm
 - Regla 16: EP: [Ng, Np], TP: [Pm, Pq], DH: Pq

En este caso, se eliminan las reglas 1, 9 y 16, evaluando un escenario extremo de reducción. Se utiliza una presión inicial de $P_0 = 620$ y el método de des-difusión por promedio de los supremos.

La Figura 53, muestra que el sistema no logra aproximarse al objetivo $P_O = 700$, permaneciendo estancado cerca del valor inicial. Se observa un único ajuste inicial y posterior estabilización deficiente.

El mapa de activación de reglas Figura 54 evidencia una falta de transiciones relevantes, mientras que la trayectoria Figura 55 confirma la incapacidad del sistema para desplazarse hacia la región objetivo.

Finalmente, la Figura 56 revela que únicamente se activa la Regla 1 (equivalente a la Regla 2 original en el sistema completo), resultando insuficiente para sostener la dinámica de control requerida.

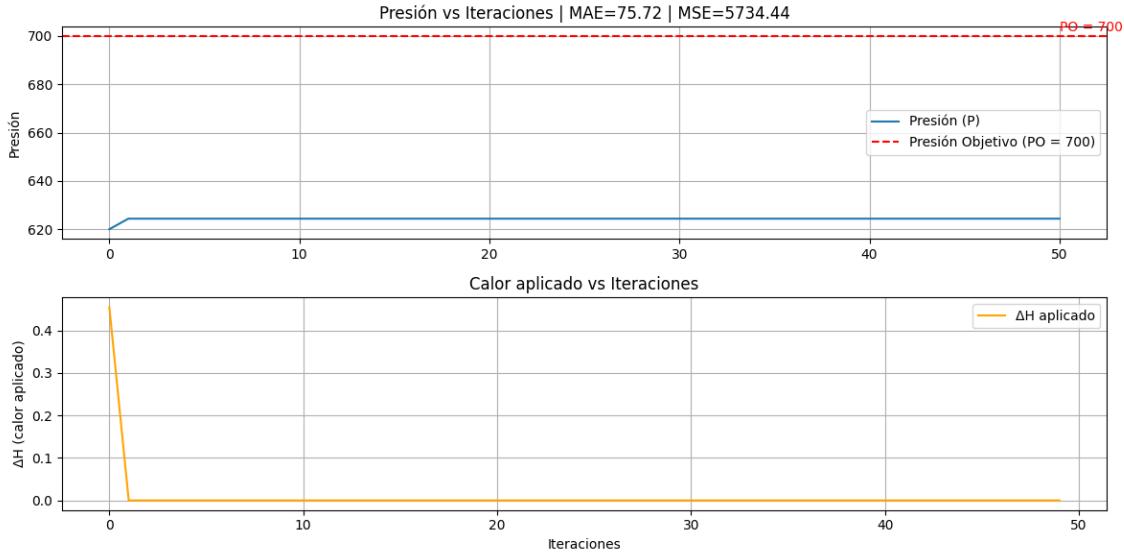


Figura 53: Evolución de la presión y del calor aplicado para el sistema con presión inicial de 620 y presión objetivo de 700, en 50 iteraciones.

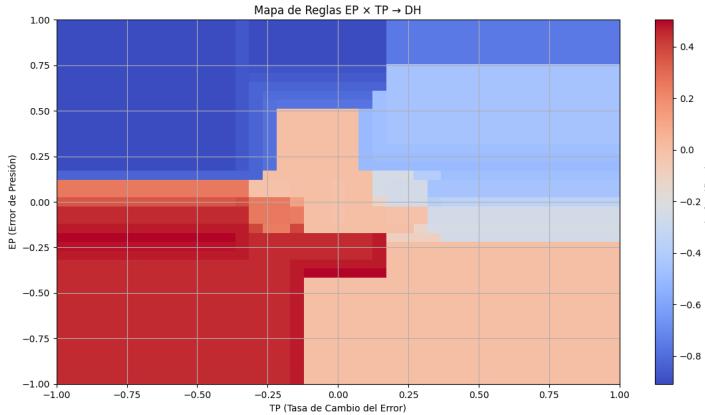


Figura 54: Mapa de des-difusión para el sistema con presión inicial de 620 y presión objetivo de 700, usando promedio de los supremos como método de des-difusión.

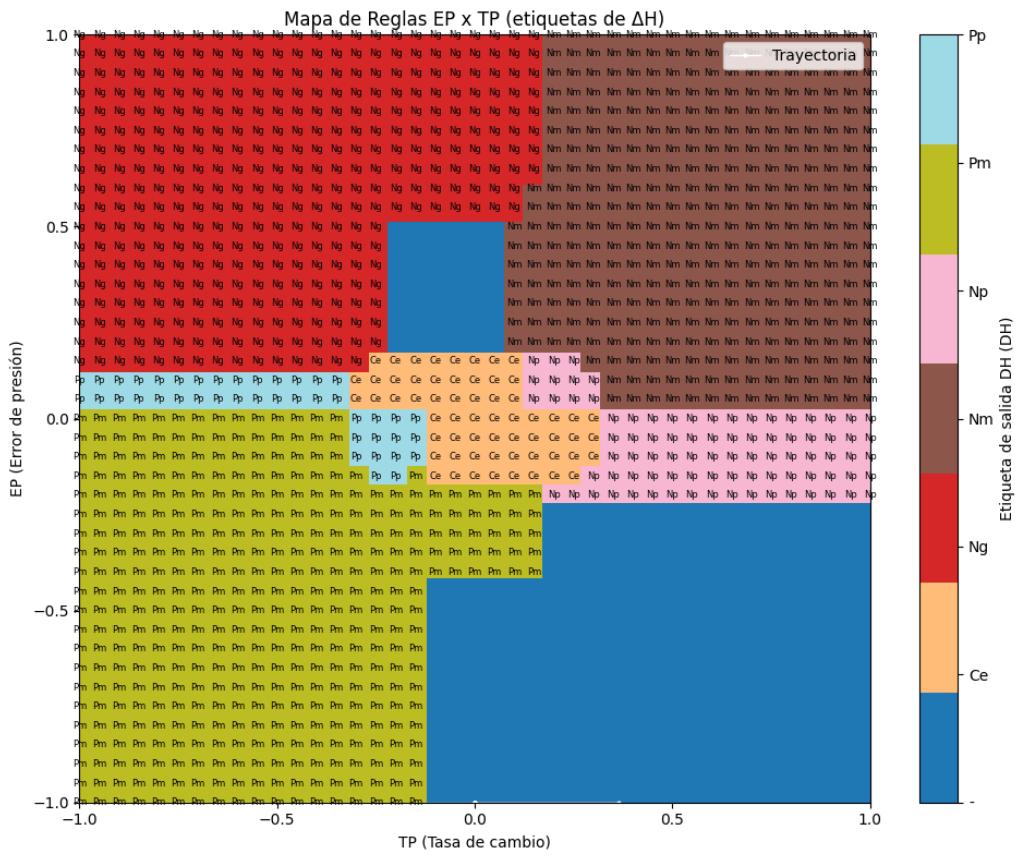


Figura 55: Trayectoria del sistema en el espacio EP vs TP, con etiquetas difusas de salida (DH). Simulación con presión inicial de 620 y presión objetivo de 700.

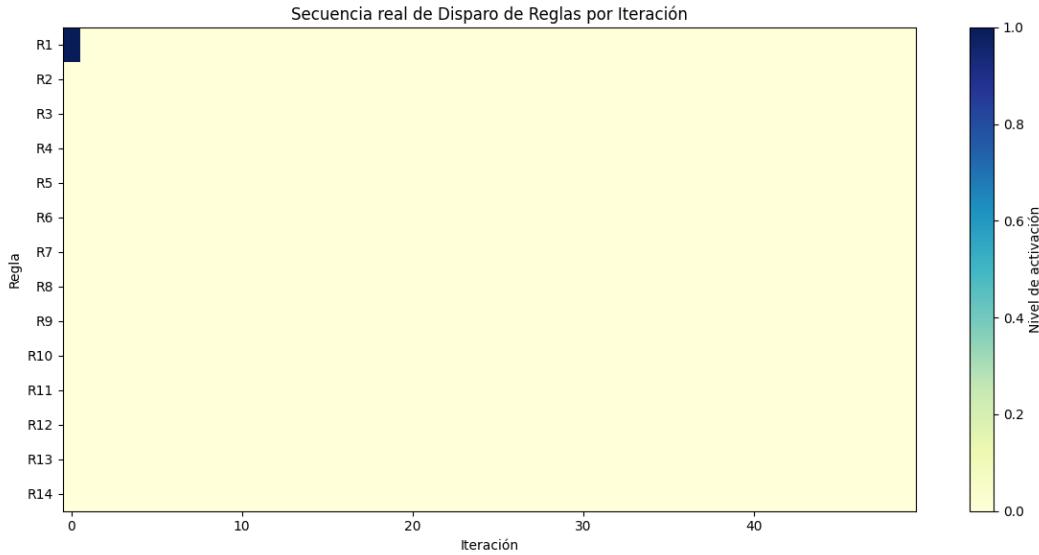


Figura 56: Secuencia de activación de reglas por iteración en el sistema con presión inicial de 620 y presión objetivo de 700.

4.2.2. Resultados por método de des-difusión Centro de Gravedad

Configuración Inicial caso 2: Eliminación de reglas 1, 9 y 16

- Presión Objetivo (PO): 700
- Presión Inicial (P0): 620
- Iteraciones: 50
- Método de des-difusión: Centro de Gravedad
- Reglas excluidas:
 - Regla 1: EP: Ng, TP: [Ng, Pp], DH: Pq
 - Regla 9: EP: Pp, TP: [Np, Pq], DH: Nm
 - Regla 16: EP: [Ng, Np], TP: [Pm, Pq], DH: Pq

Símil al caso 1 con eliminación de reglas 1, 9 y 16, se aprecia que el sistema bajo el método de centro de gravedad no es capaz de aproximarse a la presión objetivo, teniendo un comportamiento idéntico al del caso 1 que se aprecia en las figuras 57, 58, 59 y 60.

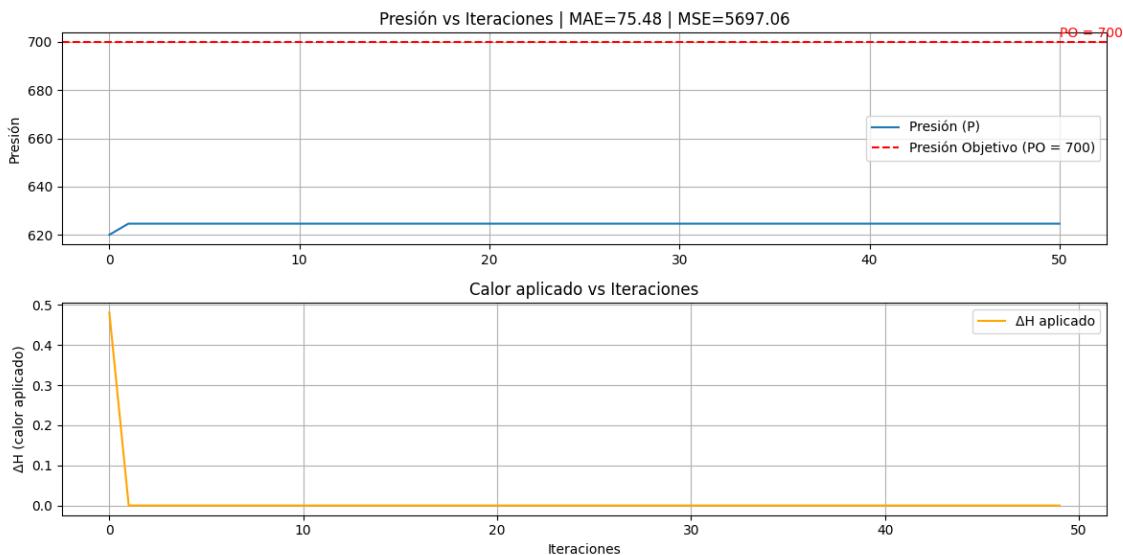


Figura 57: Evolución de la presión y del calor aplicado para el sistema con presión inicial de 620 y presión objetivo de 700, en 50 iteraciones.

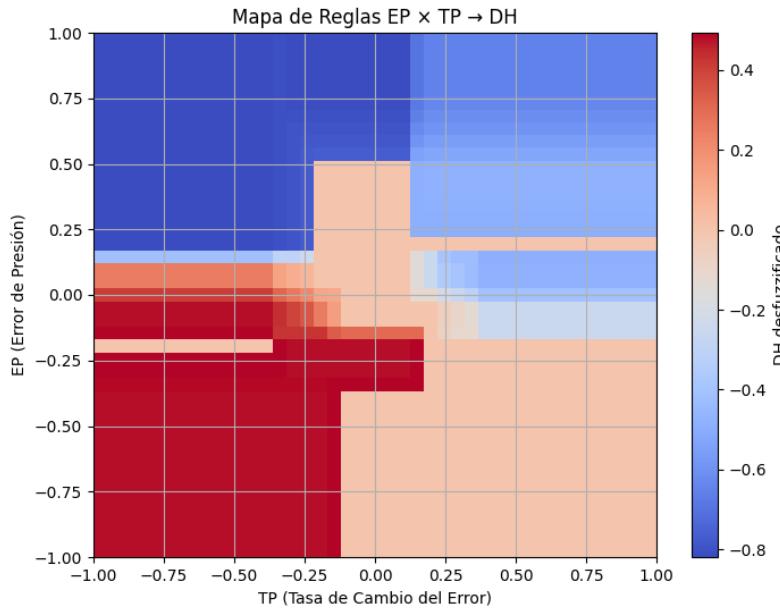


Figura 58: Mapa de des-difusión para el sistema con presión inicial de 620 y presión objetivo de 700, usando promedio de los supremos como método de des-difusión.

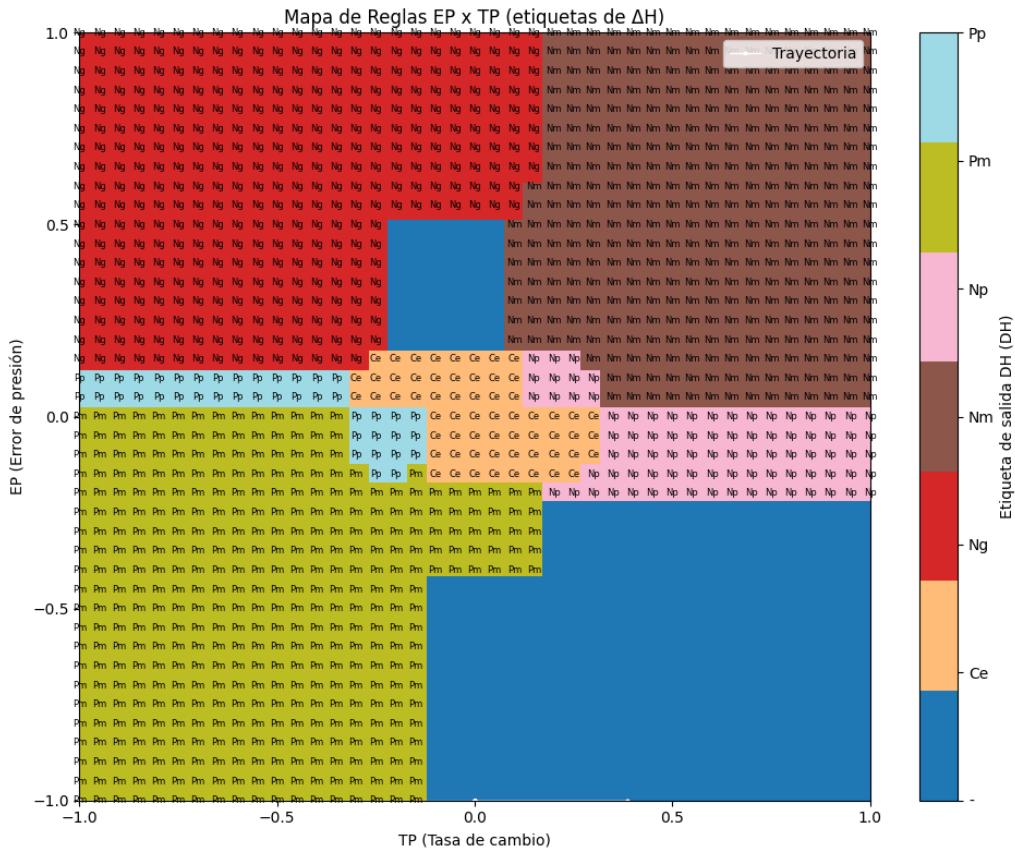


Figura 59: Trayectoria del sistema en el espacio EP vs TP, con etiquetas difusas de salida (ΔH). Simulación con presión inicial de 620 y presión objetivo de 700.

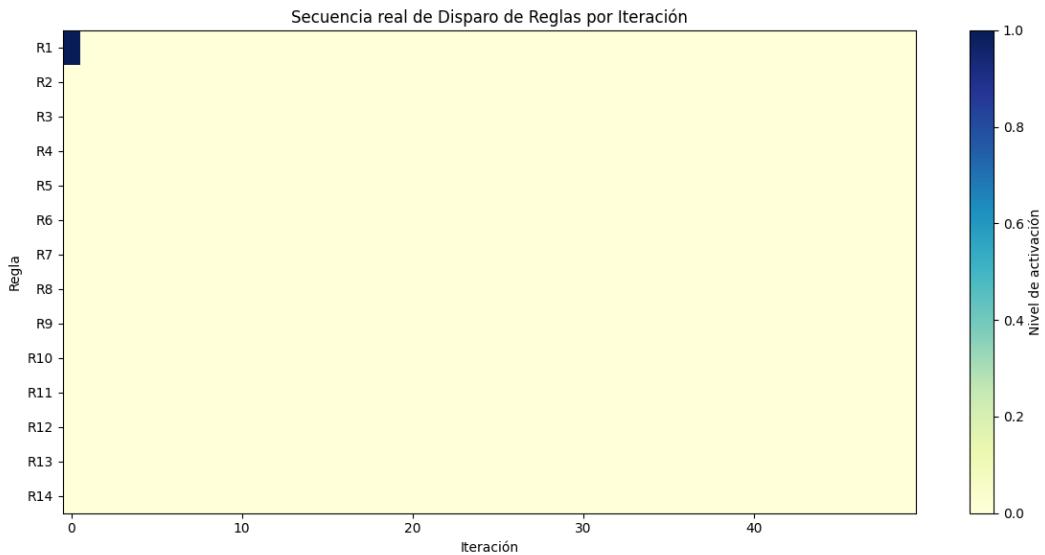


Figura 60: Secuencia de activación de reglas por iteración en el sistema con presión inicial de 620 y presión objetivo de 700.

4.2.3. Resultados por método de des-difusión Alturas

Configuración Inicial caso 3: Eliminación de reglas 1, 9 y 16

- Presión Objetivo (PO): 700
- Presión Inicial (P0): 620
- Iteraciones: 50
- Método de des-difusión: Alturas
- Reglas excluidas:
 - Regla 1: EP: Ng , TP: $[Ng, Pp]$, DH: Pq
 - Regla 9: EP: Pp , TP: $[Np, Pq]$, DH: Nm
 - Regla 16: EP: $[Ng, Np]$, TP: $[Nm, Pq]$, DH: Pq

Este caso es interesante dado que muestra una diferencia notoria respecto al caso 1 y 2 con eliminación de reglas 1, 9 y 16, donde, se aprecia que el sistema bajo el método de alturas no es capaz de aproximarse a la presión objetivo, y, al contrario de lo esperado tiende a disminuir la presión, siendo claramente ineficiente en su totalidad. Se aprecia el comportamiento en Figuras 61, 62, 63 y 64.

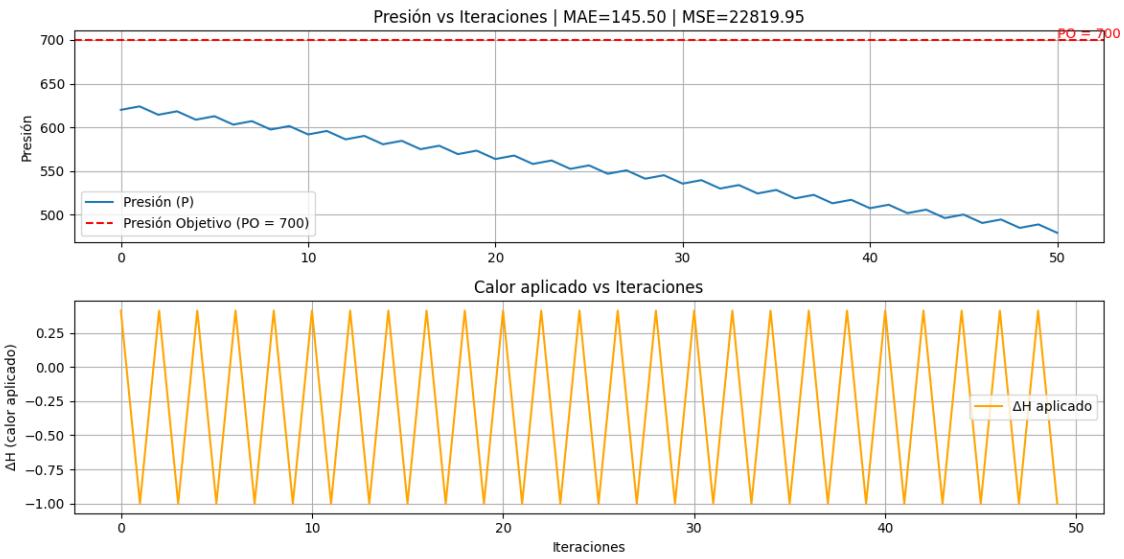


Figura 61: Evolución de la presión y del calor aplicado para el sistema con presión inicial de 620 y presión objetivo de 700, en 50 iteraciones.

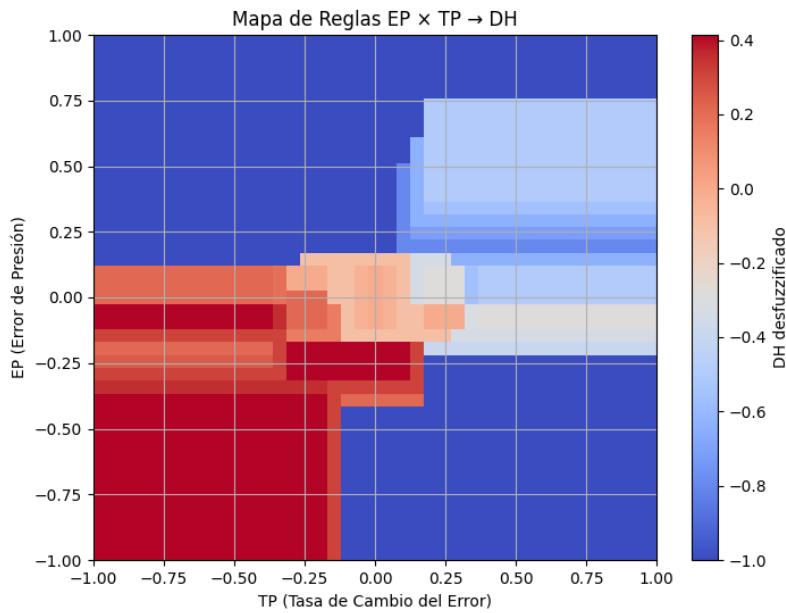


Figura 62: Mapa de des-difusión para el sistema con presión inicial de 620 y presión objetivo de 700, usando promedio de los supremos como método de des-difusión.

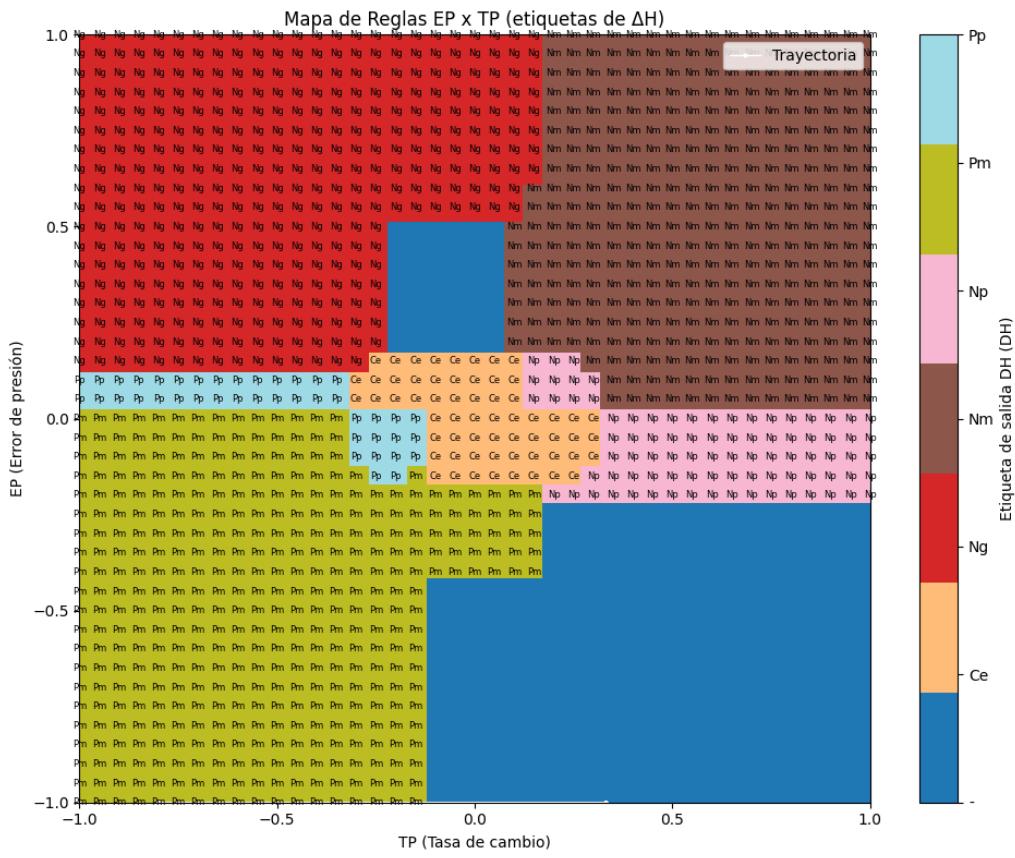


Figura 63: Trayectoria del sistema en el espacio EP vs TP, con etiquetas difusas de salida (ΔH). Simulación con presión inicial de 620 y presión objetivo de 700.

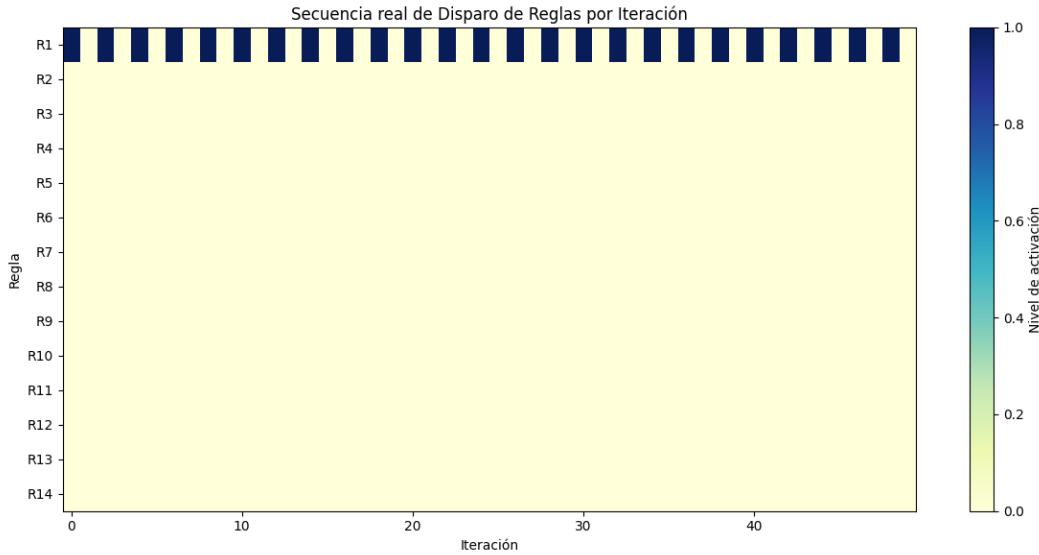


Figura 64: Secuencia de activación de reglas por iteración en el sistema con presión inicial de 620 y presión objetivo de 700.

4.3. Resultados sistema eficiente: reducción de conjuntos y cambio de reglas

Con el objetivo de optimizar el desempeño del sistema difuso, se realizó una modificación en la base de conocimientos, reduciendo la cantidad de conjuntos difusos y adaptando las reglas correspondientes.

En particular, se pasó de una estructura inicial de nueve conjuntos (Ng , Nm , Np , Ni , Ce , Pi , Pp , Pm , Pq) a una estructura reducida de seis conjuntos (Ng , Nm , Np , C , Pm , Pq). El nuevo conjunto C resulta de la fusión de los conjuntos Ni , Ce y Pi , representando un área de bajo error.

Esta simplificación implicó la actualización de las reglas de inferencia para ajustarse al nuevo esquema de etiquetas, buscando mantener la capacidad de control del sistema, pero con una estructura más eficiente y menos compleja.

A continuación, se presenta la configuración inicial empleada para esta etapa de pruebas:

4.3.1. Resultados por método de des-difusión Promedio de los Supremos

En este caso, utilizando la estructura reducida de seis conjuntos difusos y aplicando el método de des-difusión por promedio de los supremos, se observa un desempeño considerablemente más eficiente.

La Figura 65, muestra que el sistema logra aproximarse al objetivo $P_O = 700$ en un número de iteraciones similar al de la máquina simplificada con mayor número de reglas y conjuntos. Sin embargo, destaca una mayor estabilidad en la trayectoria, evidenciando una respuesta más controlada y con menores desviaciones.

La simplificación de la base de conjuntos no solo reduce la complejidad computacional, sino que también mejora el comportamiento dinámico, eliminando la necesidad de recorrer múltiples zonas de inferencia. Esta reducción se aprecia en el mapa de activación de reglas Figura 66, donde las zonas de disparo son menos extensas y mejor definidas.

La trayectoria Figura 67, ilustra una evolución más suave hacia la región objetivo, en contraste con la oscilación observada en el modelo original.

Respecto a la activación de reglas Figura 68, se observa que algunas reglas se activan de manera más prolongada pero con niveles de fuerza reducidos, compensando la eliminación de conjuntos intermedios. Por ejemplo, la Regla 1, que en el sistema completo solo se activaba inicialmente, en este modelo permanece activa con menor intensidad por varias iteraciones.

Configuración Inicial caso 1, reducción de conjuntos

- Presión Objetivo (PO): 700
- Presión Inicial (P0): 620

- Iteraciones: 50
- Método de des-difusión: Promedio de los Supremos

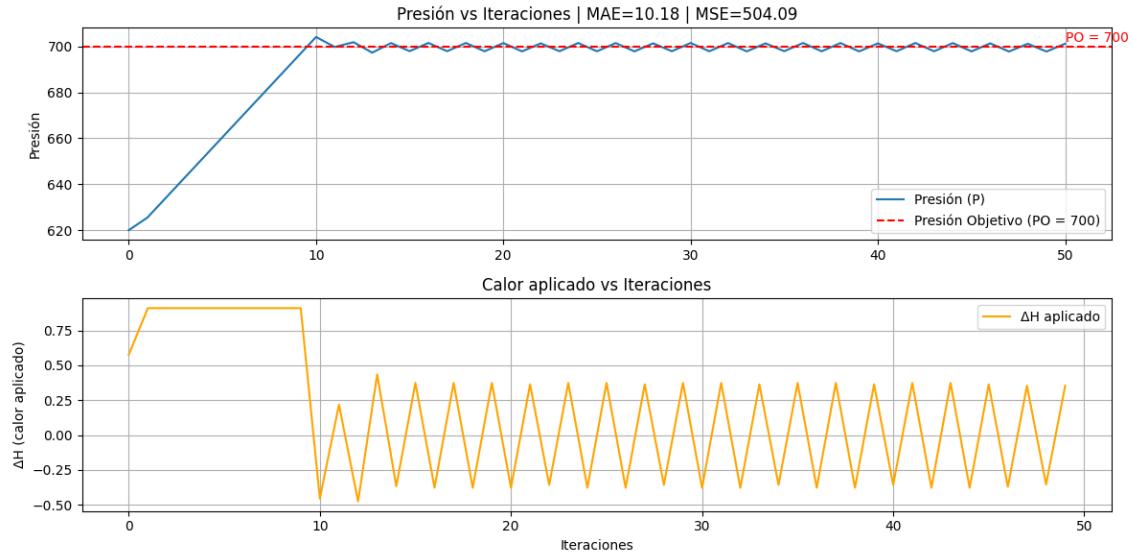


Figura 65: Evolución de la presión y del calor aplicado para el sistema con presión inicial de 620 y presión objetivo de 700, en 50 iteraciones.

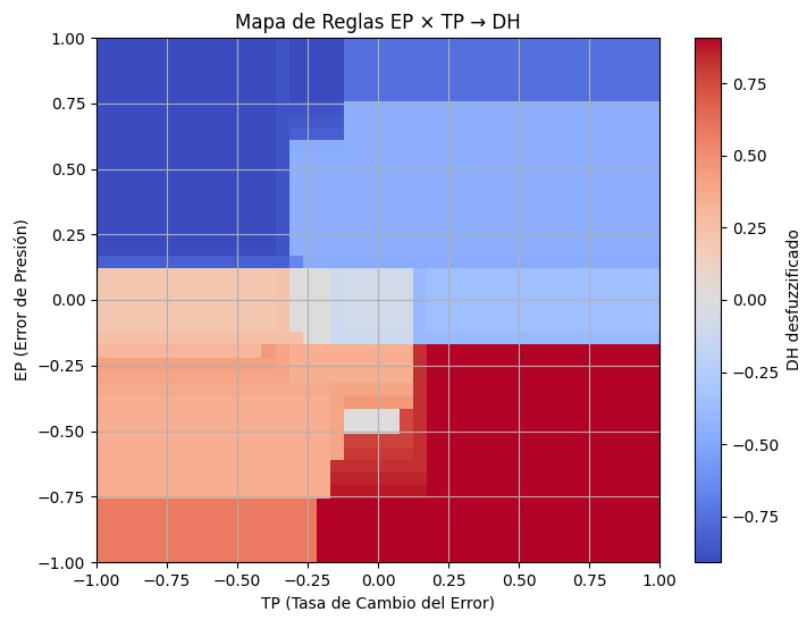


Figura 66: Mapa de des-difusión para el sistema con presión inicial de 620 y presión objetivo de 700, usando promedio de los supremos como método de des-difusión.

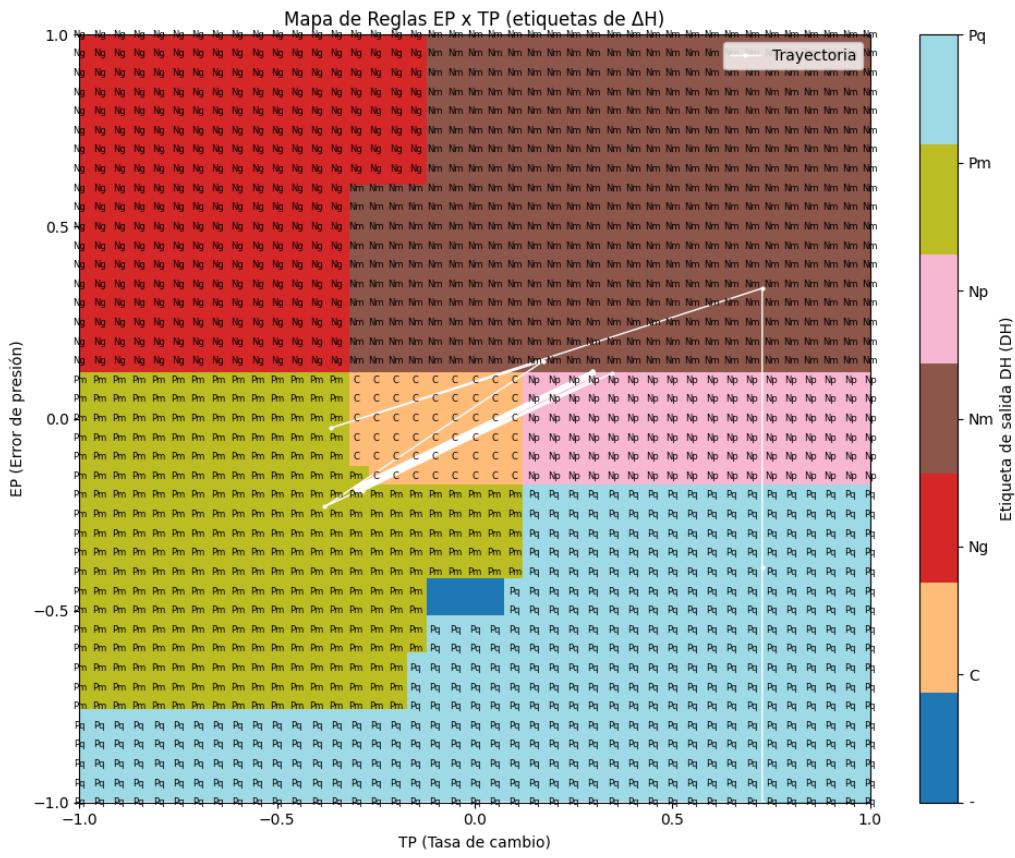


Figura 67: Trayectoria del sistema en el espacio EP vs TP, con etiquetas difusas de salida (DH). Simulación con presión inicial de 620 y presión objetivo de 700.

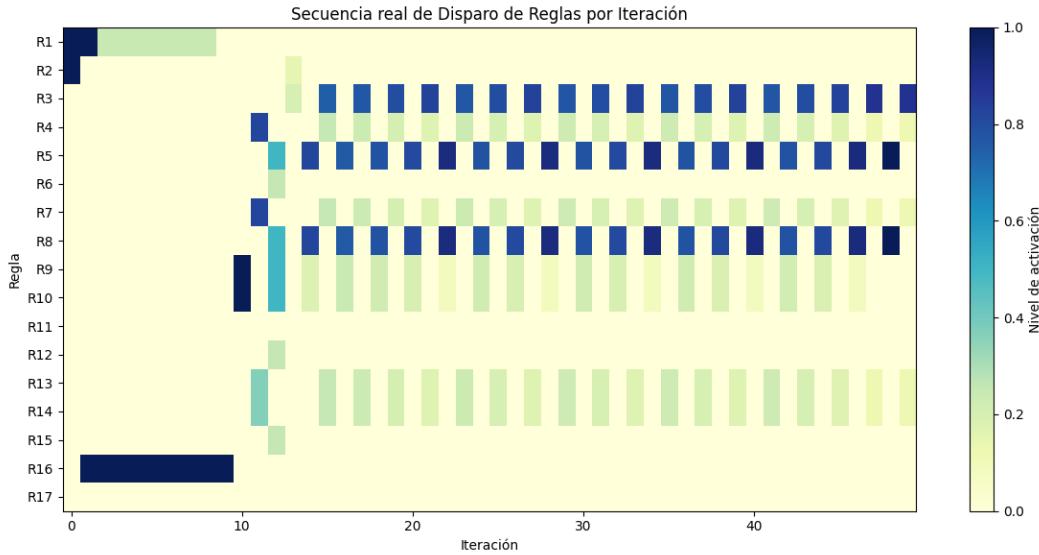


Figura 68: Secuencia de activación de reglas por iteración en el sistema con presión inicial de 620 y presión objetivo de 700.

4.3.2. Resultados por método de des-difusión Centro de Gravedad

Configuración Inicial caso 1, reducción de conjuntos

- Presión Objetivo (PO): 700
- Presión Inicial (P0): 620
- Iteraciones: 50
- Método de des-difusión: Centro de Gravedad

En esta configuración, aplicando el método de des-difusión por centro de gravedad con la reducción de conjuntos, se mantiene un comportamiento estable y eficiente en la aproximación al objetivo $P_O = 700$.

La Figura 69, muestra que el sistema logra alcanzar rápidamente el valor deseado, con un número de iteraciones comparable al obtenido mediante el promedio de los supremos. Sin embargo, la principal diferencia se aprecia en el patrón de activación de reglas.

El diagrama de activación Figura 72 revela que la Regla 1 se activa con mayor intensidad y duración, en comparación al método de supremos. Asimismo, se observa una mayor participación de otras reglas con niveles de activación más altos. Esta diferencia es atribuible a la naturaleza del método centroide, que pondera toda la distribución de pertenencia, favoreciendo una mayor respuesta global del sistema.

La trayectoria Figura 71, y el mapa de reglas Figura 70 reflejan una evolución controlada, con una ligera tendencia a oscilaciones de menor amplitud, pero siempre cercana a la presión objetivo.

Pese a lo anterior, aunque ambos métodos caso 1 y 2 con reducción de conjuntos ofrecen un control efectivo, el centro de gravedad induce una activación de reglas más intensa y una respuesta global más dinámica, lo cual puede ser deseable en sistemas que requieran reacciones más energéticas ante variaciones del estado.

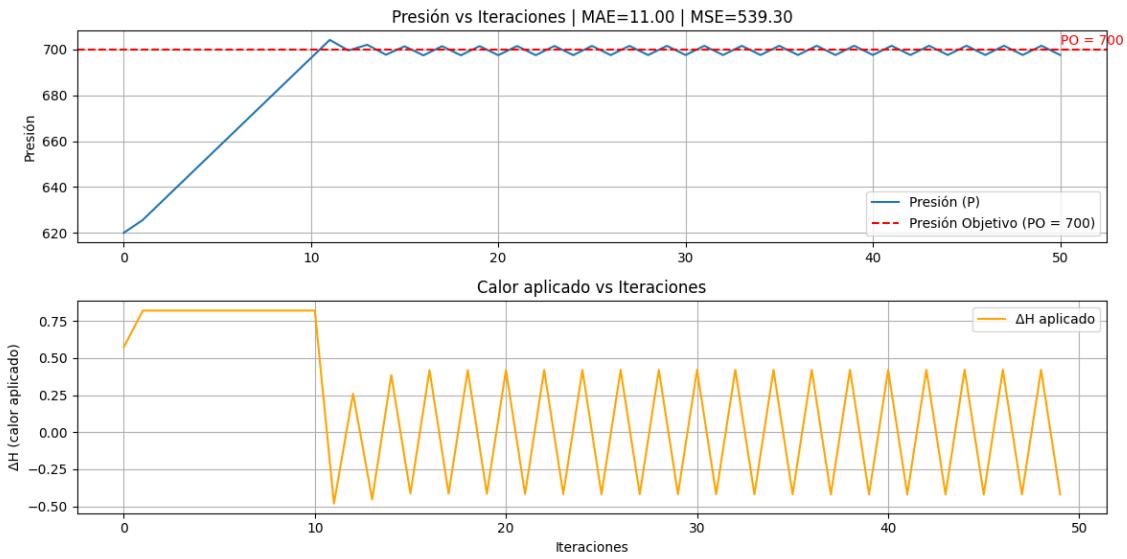


Figura 69: Evolución de la presión y del calor aplicado para el sistema con presión inicial de 620 y presión objetivo de 700, en 50 iteraciones.

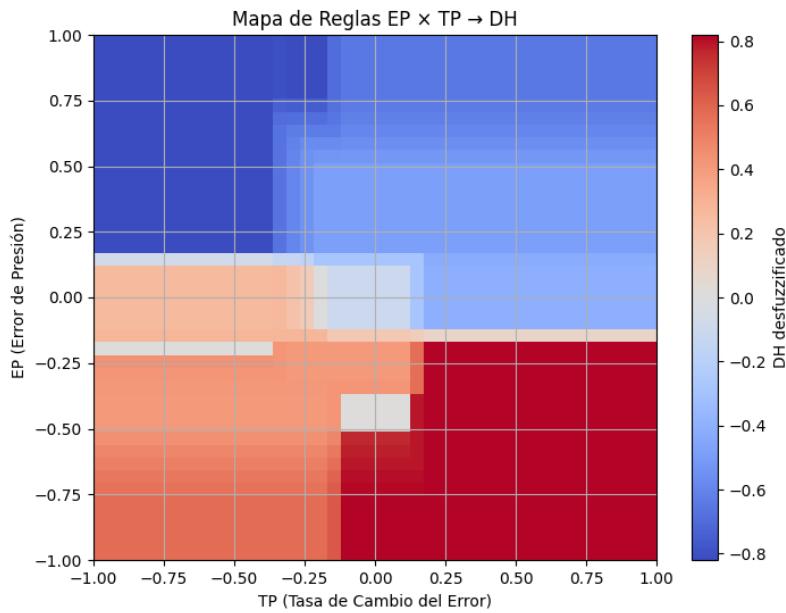


Figura 70: Mapa de des-difusión para el sistema con presión inicial de 620 y presión objetivo de 700, usando promedio de los supremos como método de des-difusión.

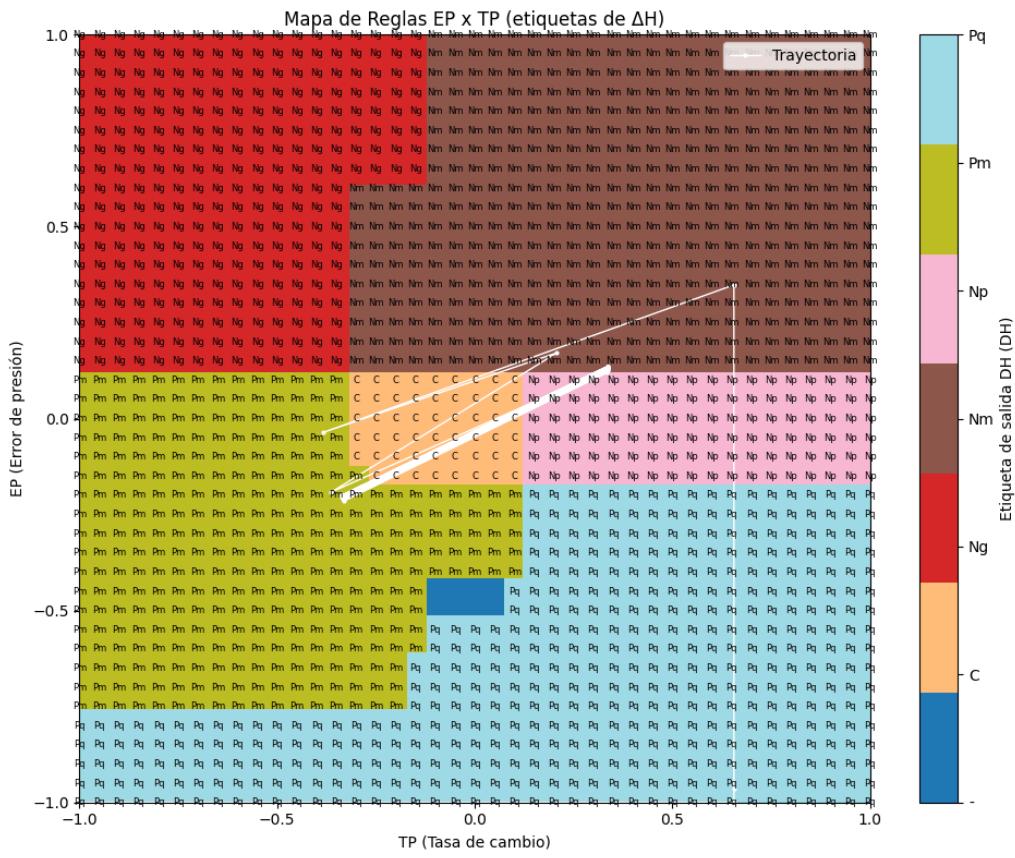


Figura 71: Trayectoria del sistema en el espacio EP vs TP, con etiquetas difusas de salida (DH). Simulación con presión inicial de 620 y presión objetivo de 700.

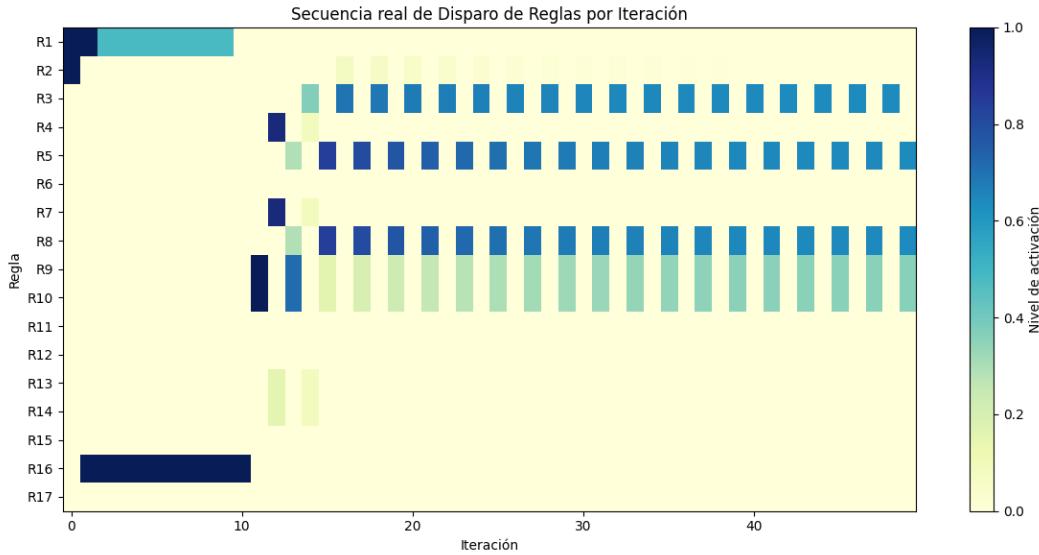


Figura 72: Secuencia de activación de reglas por iteración en el sistema con presión inicial de 620 y presión objetivo de 700.

4.3.3. Resultados por método de des-difusión Alturas

Configuración Inicial caso 1, reducción de conjuntos

- Presión Objetivo (PO): 700
- Presión Inicial (P0): 620
- Iteraciones: 50
- Método de des-difusión: Alturas

En esta configuración, utilizando el método de des-difusión por alturas con reducción de conjuntos, se observa un comportamiento diferenciado respecto a los métodos anteriores.

La Figura 73 muestra que la aproximación a la presión objetivo $P_O = 700$ es más suave, con oscilaciones de menor pendiente y valles y montañas menos filosos. Esto genera una trayectoria más fluida, con ajustes más progresivos en torno al objetivo.

El mapa de reglas y las trayectorias correspondientes Figuras 74 y Figura 75, evidencian cómo la reducción de conjuntos limita el campo de activación, conduciendo a trayectorias más controladas. Sin embargo, se aprecia que la trayectoria presenta una oscilación de tipo herramienta dentada, más pronunciada que en los métodos anteriores (caso 1 y caso 2), lo cual sugiere una eficiencia ligeramente inferior en términos de ajuste fino.

Finalmente, el análisis de la secuencia de activación de reglas Figura 4, revela un mayor número de saltos entre reglas, indicando que el sistema compensa la disminución de conjuntos difusos mediante activaciones más frecuentes y variadas.

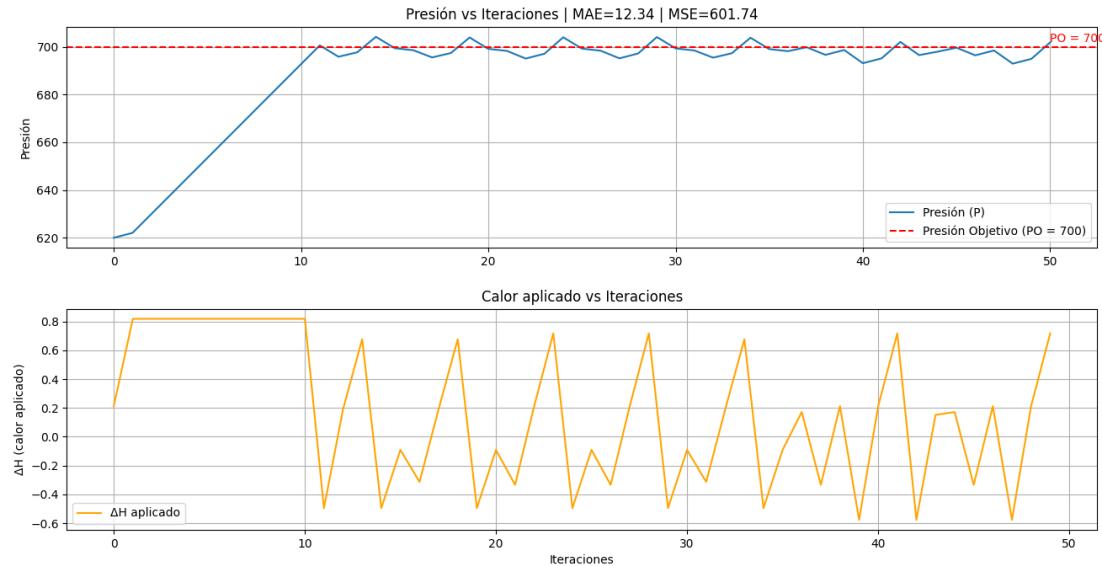


Figura 73: Evolución de la presión y del calor aplicado para el sistema con presión inicial de 620 y presión objetivo de 700, en 50 iteraciones.

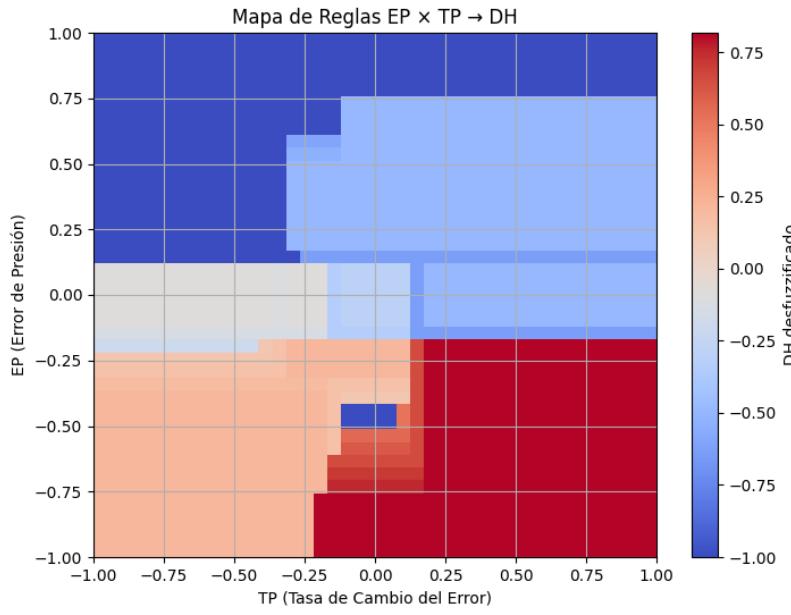


Figura 74: Mapa de des-difusión para el sistema con presión inicial de 620 y presión objetivo de 700, usando promedio de los supremos como método de des-difusión.

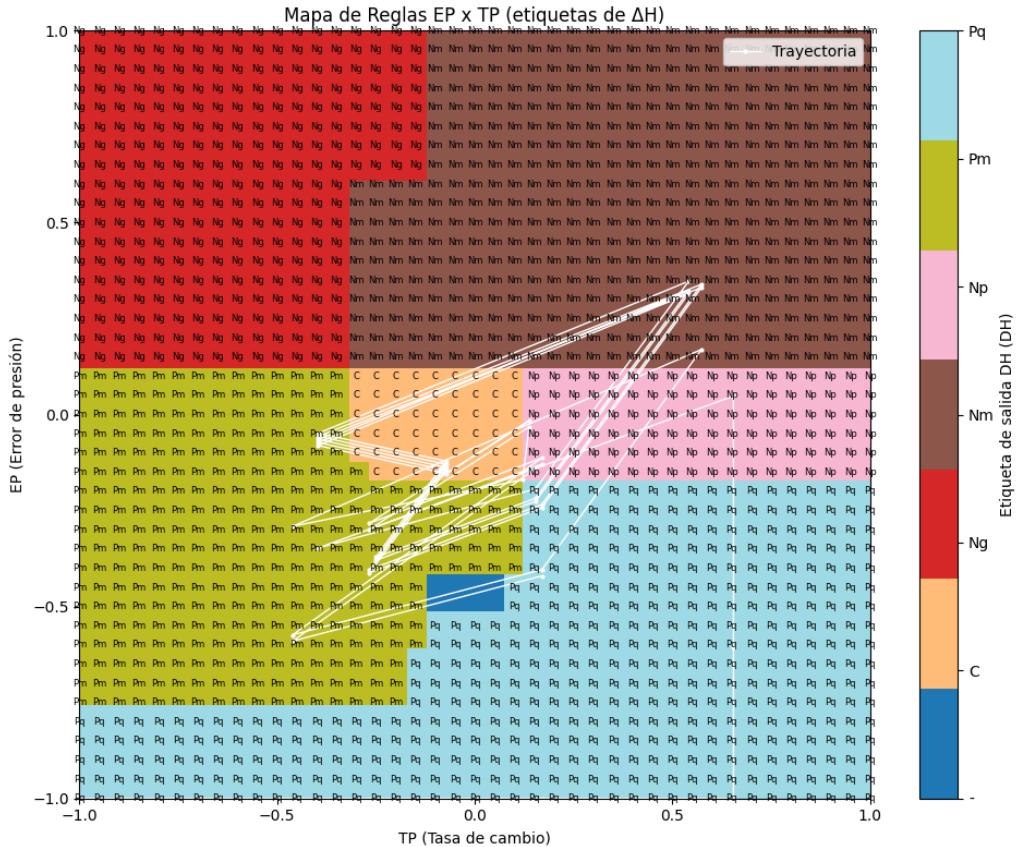


Figura 75: Trayectoria del sistema en el espacio EP vs TP, con etiquetas difusas de salida (DH). Simulación con presión inicial de 620 y presión objetivo de 700.

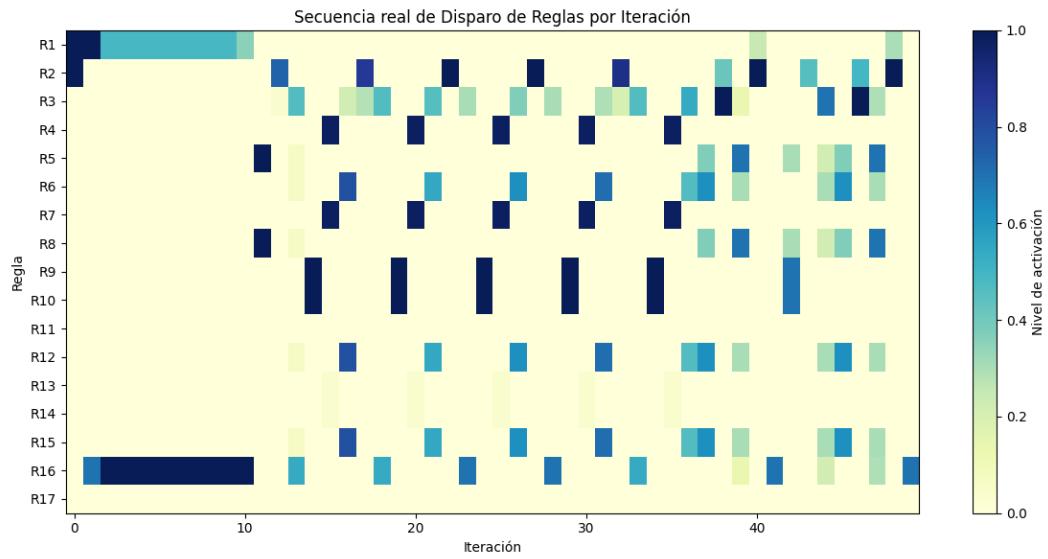


Figura 76: Secuencia de activación de reglas por iteración en el sistema con presión inicial de 620 y presión objetivo de 700.

5. Resultados Máquina Compleja

5.1. Resultados por método de des-difusión centro de gravedad

Configuración Inicial caso 1

- Presión Objetivo (PO): 700
- Presión Inicial (P0): 620
- Iteraciones: 50
- Coeficiente: 0.9
- Método de des-difusión: centro de gravedad

En este apartado se analizan los resultados obtenidos para la máquina compleja, la cual introduce un comportamiento más realista mediante la incorporación de un coeficiente dinámico c en el modelo de evolución del calor aplicado, afectando directamente el cálculo de ΔP a partir de un ΔH dinámico.

El coeficiente se fijó en $c = 0.9$, valor que representa un compromiso entre rapidez de respuesta y estabilidad del sistema, aunque puede variarse en un rango para otros escenarios de prueba.

La Figura 77, muestra que, bajo esta configuración inicial y utilizando el método de des-difusión por centro de gravedad, el sistema presenta un comportamiento oscilatorio sinusoidal que se va atenuando gradualmente con el tiempo, aproximándose lentamente hacia el objetivo de presión $P_O = 700$.

Se observa que, aunque el modelo tiende hacia la estabilidad, el proceso de convergencia es lento, con grandes oscilaciones iniciales que disminuyen a medida que avanza la iteración. Esto se atribuye a la interacción entre el calor aplicado dinámico y el factor de amortiguamiento introducido por c .

En cuanto al patrón de trayectorias Figura 79, se aprecia una dinámica osculatoria hexagonal o en hélice, consistente con el modelo dinámico planteado. La activación de reglas Figura 78 muestra una distribución amplia, manteniendo la estructura de reglas completa como en la máquina simplificada, pero con activaciones de mayor fuerza.

Finalmente, el análisis de la secuencia real de disparo de reglas Figura 79, revela un patrón de rotación en la activación de reglas, en correspondencia con la oscilación de la trayectoria y el ajuste progresivo hacia el estado deseado.

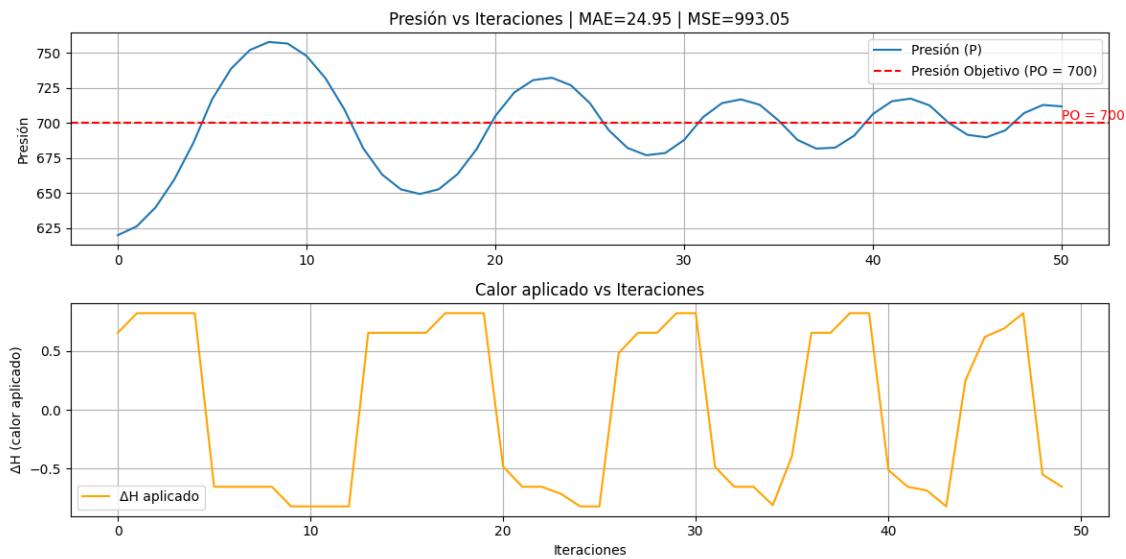


Figura 77: Evolución de la presión y del calor aplicado para el sistema con presión inicial de 620 y presión objetivo de 700, en 50 iteraciones.

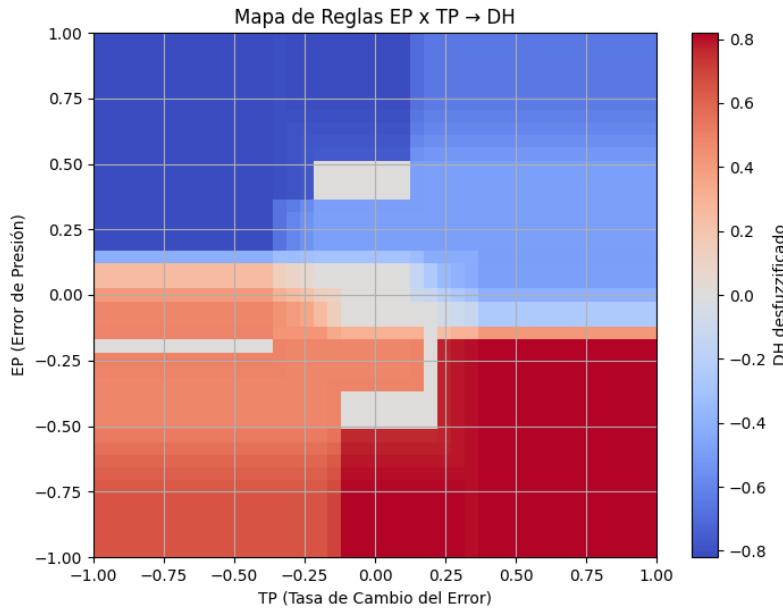


Figura 78: Mapa de desdiferenciación para el sistema con presión inicial de 620 y presión objetivo de 700, usando centroide como método de des-difusión.

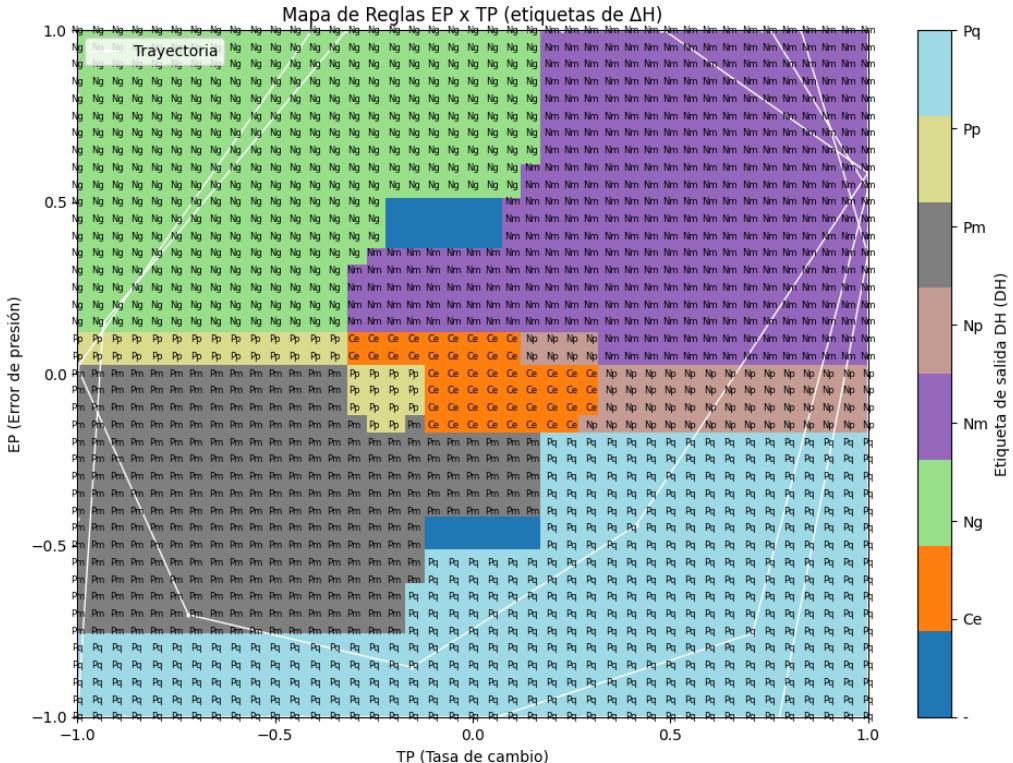


Figura 79: Trayectoria del sistema en el espacio EP vs TP, con etiquetas difusas de salida (ΔH). Simulación con presión inicial de 620 y presión objetivo de 700.

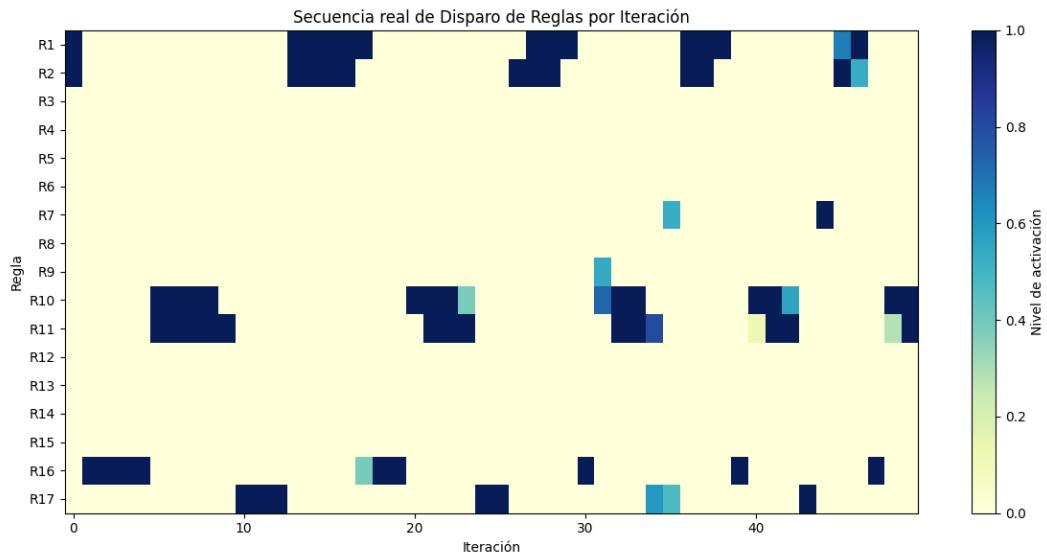


Figura 80: Secuencia de activación de reglas por iteración en el sistema con presión inicial de 620 y presión objetivo de 700.

Configuración Inicial caso 2

- Presión Objetivo (PO): 700
- Presión Inicial (P0): 720
- Iteraciones: 50
- Coeficiente: 0.9
- Método de des-difusión: centro de gravedad

En este caso, con presión inicial de $P_0 = 720$ y utilizando el método de des-difusión por centro de gravedad, se observa que el sistema logra convergencia efectiva hacia el objetivo de presión $P_O = 700$, alcanzando la estabilización aproximadamente en la iteración 22, como se muestra en la Figura 81.

Esta mejor respuesta respecto al caso anterior se atribuye a la proximidad inicial con el objetivo, facilitando la corrección dinámica a través del modelo complejo con coeficiente $c = 0.9$.

El mapa de reglas activadas Figura 82, refleja una activación clara de los conjuntos, mientras que la trayectoria observada Figura 82, exhibe un patrón hexagonal descendente que converge hacia el conjunto central (C_e).

En cuanto a la secuencia de disparo de reglas Figura 84, se aprecia que las activaciones iniciales muestran una oscilación entre reglas, pero posteriormente tienden a estabilizarse principalmente en la regla 6, facilitando la llegada y mantenimiento en el entorno del objetivo.

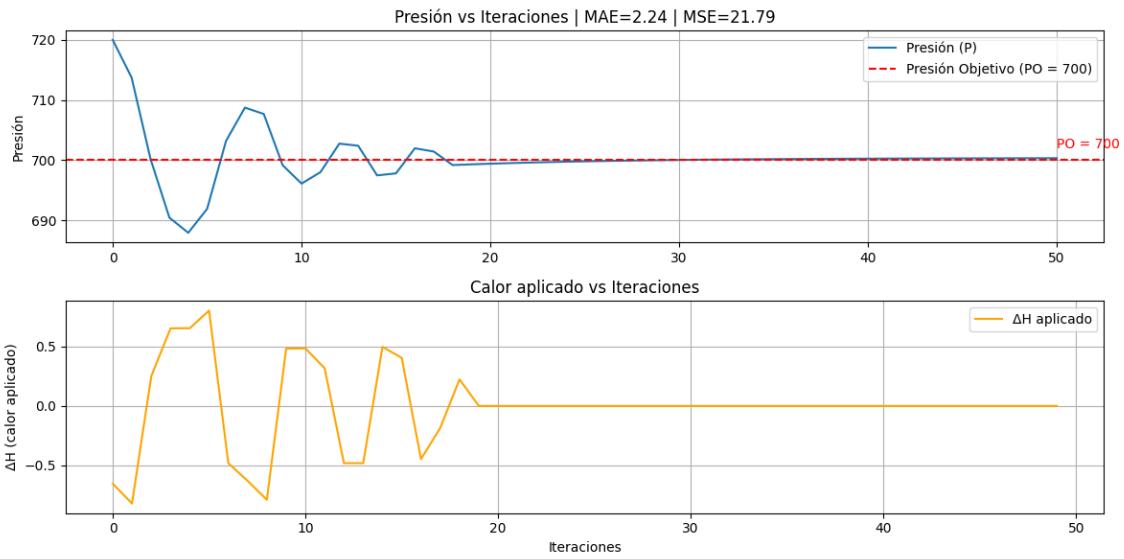


Figura 81: Evolución de la presión y del calor aplicado para el sistema con presión inicial de 720 y presión objetivo de 700, en 50 iteraciones.

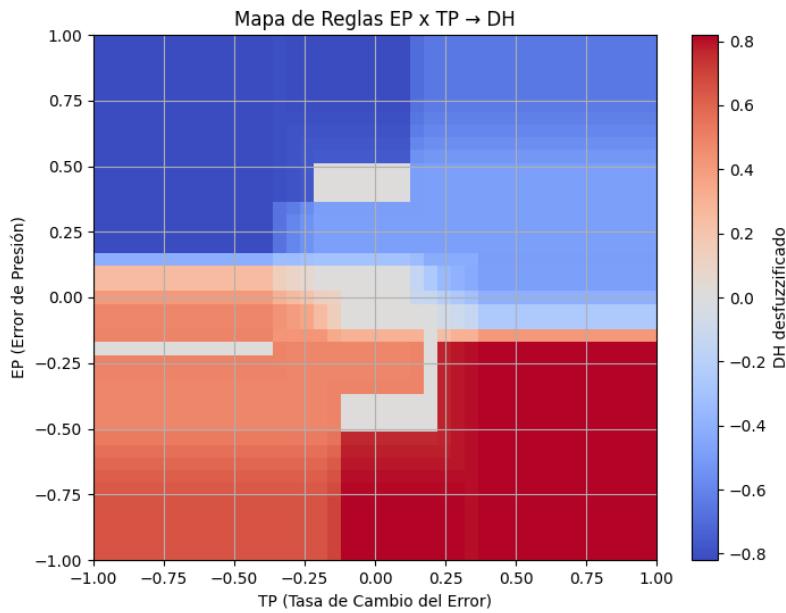


Figura 82: Mapa de des-difusión para el sistema con presión inicial de 720 y presión objetivo de 700, usando centroide como método de des-difusión.

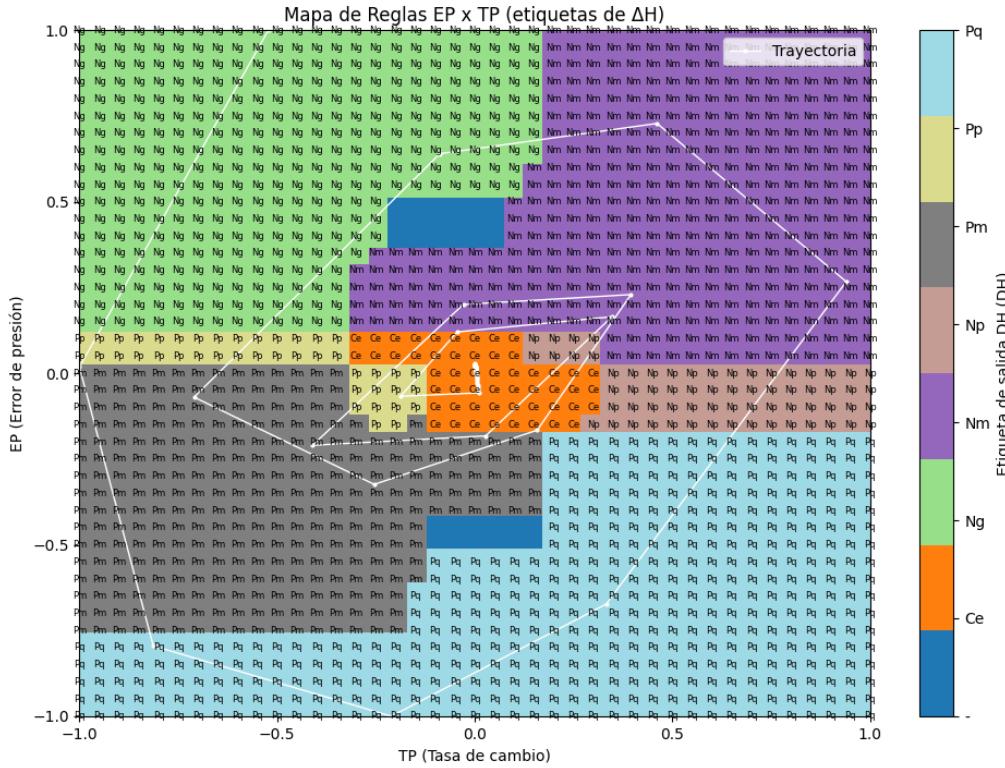


Figura 83: Trayectoria del sistema en el espacio EP vs TP, con etiquetas difusas de salida (DH). Simulación con presión inicial de 720 y presión objetivo de 700.

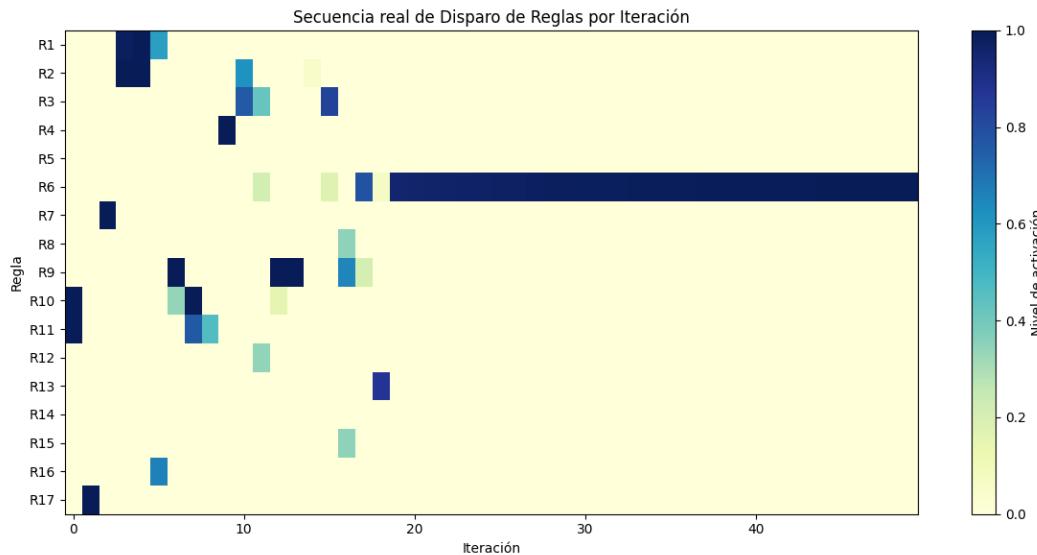


Figura 84: Secuencia de activación de reglas por iteración en el sistema con presión inicial de 720 y presión objetivo de 700.

Configuración Inicial caso 3

- Presión Objetivo (PO): 700
- Presión Inicial (P0): 830

- Iteraciones: 50
- Coeficiente: 0.9
- Método de des-difusión: centro de gravedad

En este caso, considerando una presión inicial elevada de $P_0 = 830$ y aplicando el método de des-difusión por centro de gravedad, se aprecia que el sistema presenta un comportamiento oscilatorio sinuoso similar al observado en el caso con $P_0 = 620$ Figura 85.

Debido al mayor desfasaje respecto al objetivo, el proceso de convergencia es más lento y prolongado, manteniendo oscilaciones de gran amplitud que disminuyen gradualmente en el tiempo.

El mapa de activaciones Figura 86, muestra una distribución comparable al caso anterior, aunque la trayectoria Figura 87, exhibe desplazamientos más amplios y patrones hexagonales más abiertos, reflejando la dificultad adicional para estabilizarse.

La secuencia de disparo de reglas Figura 88, confirma esta dinámica, mostrando una mayor propagación de activaciones en las reglas externas antes de lograr un acercamiento consistente al valor de referencia.

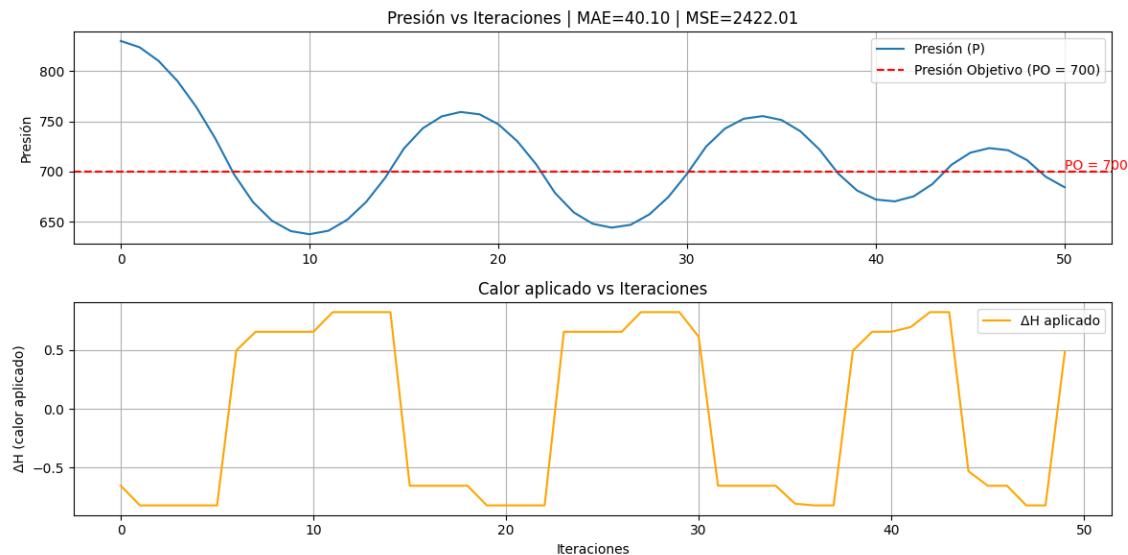


Figura 85: Evolución de la presión y del calor aplicado para el sistema con presión inicial de 830 y presión objetivo de 700, en 50 iteraciones.

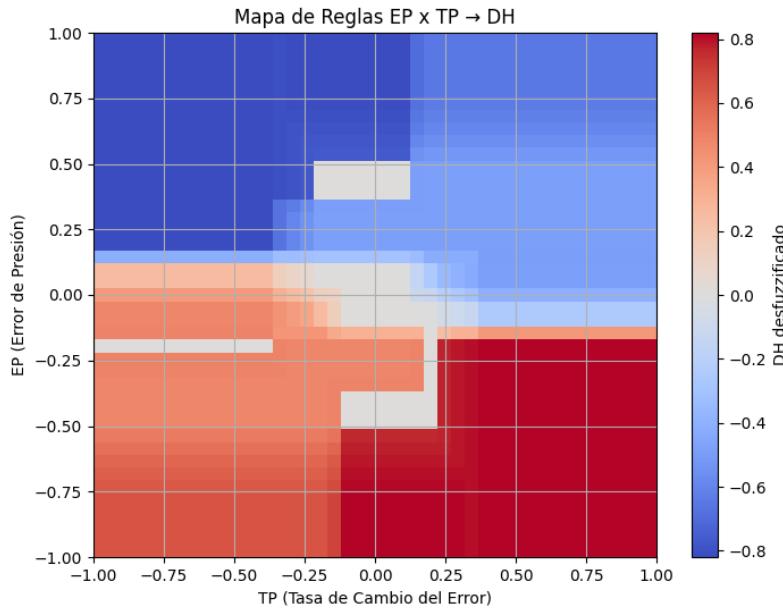


Figura 86: Mapa de des-difusión para el sistema con presión inicial de 830 y presión objetivo de 700, usando centroide como método de des-difusión.

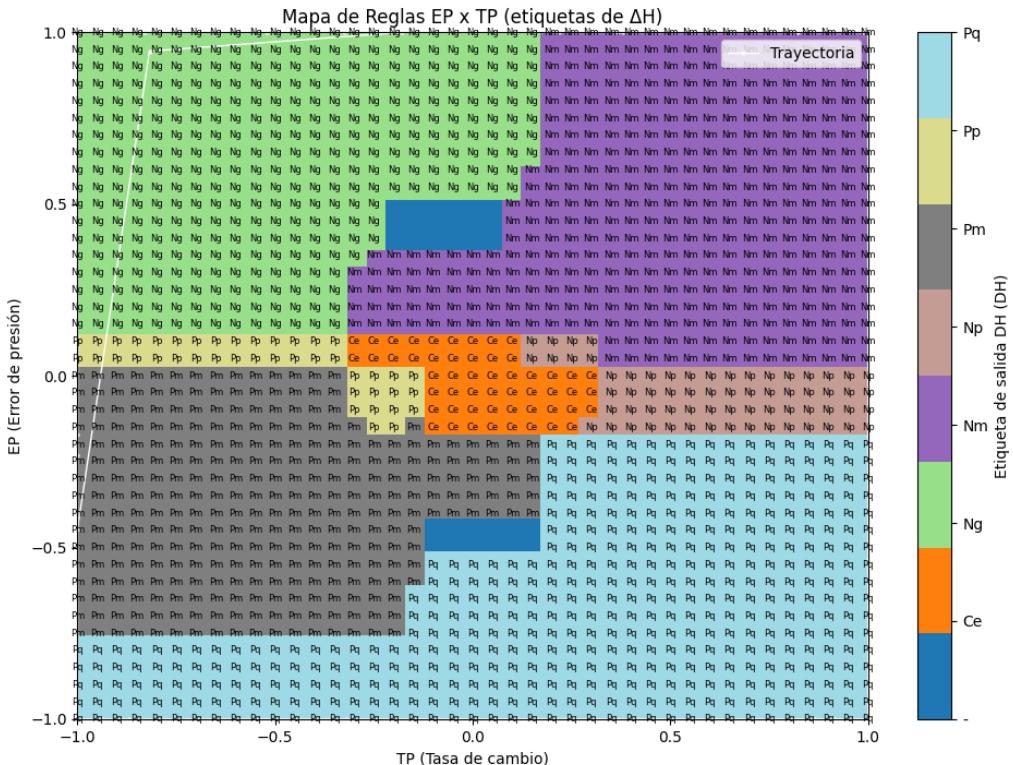


Figura 87: Trayectoria del sistema en el espacio EP vs TP, con etiquetas difusas de salida (ΔH). Simulación con presión inicial de 830 y presión objetivo de 700.

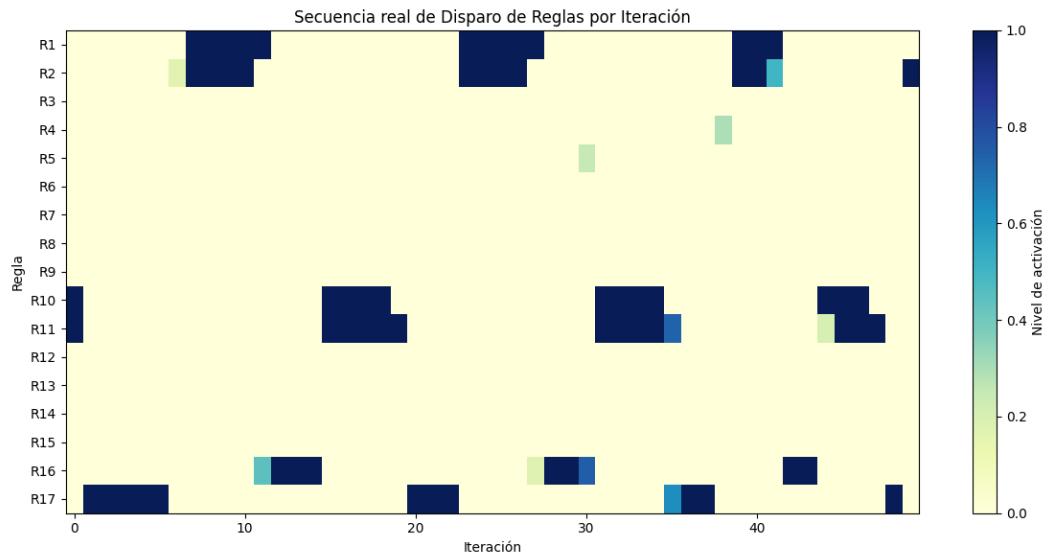


Figura 88: Secuencia de activación de reglas por iteración en el sistema con presión inicial de 830 y presión objetivo de 700.

5.2. Resultados por método de des-difusión Promedio de los Supremos

Configuración Inicial caso 1

- Presión Objetivo (PO): 700
- Presión Inicial (P_0): 620
- Iteraciones: 50
- Coeficiente: 0.9
- Método de des-difusión: Promedio de los Supremos

En este caso, utilizando el método de des-difusión por promedio de los supremos para una presión inicial $P_0 = 620$, la evolución de la presión mostrada en la Figura 89, revela un comportamiento similar al observado bajo el método de centroide.

Sin embargo, se aprecia una leve tendencia al aumento en el último pico de la respuesta, sugiriendo que el sistema no alcanza una convergencia plena, con riesgo de sobreelevar la presión o inducir oscilaciones de mayor amplitud.

La trayectoria representada en la Figura 91, respalda esta dinámica, mostrando un patrón más abierto respecto al centro de referencia.

En cuanto al mapa de reglas activadas Figura 90, si bien se mantiene un esquema global similar al del caso con centroide, se evidencian diferencias en las zonas de activación.

Finalmente, la Figura 92, muestra que la secuencia de activación de reglas presenta un patrón comparable al caso de centroide, aunque con ciertas variaciones en la intensidad y persistencia de algunas reglas específicas.

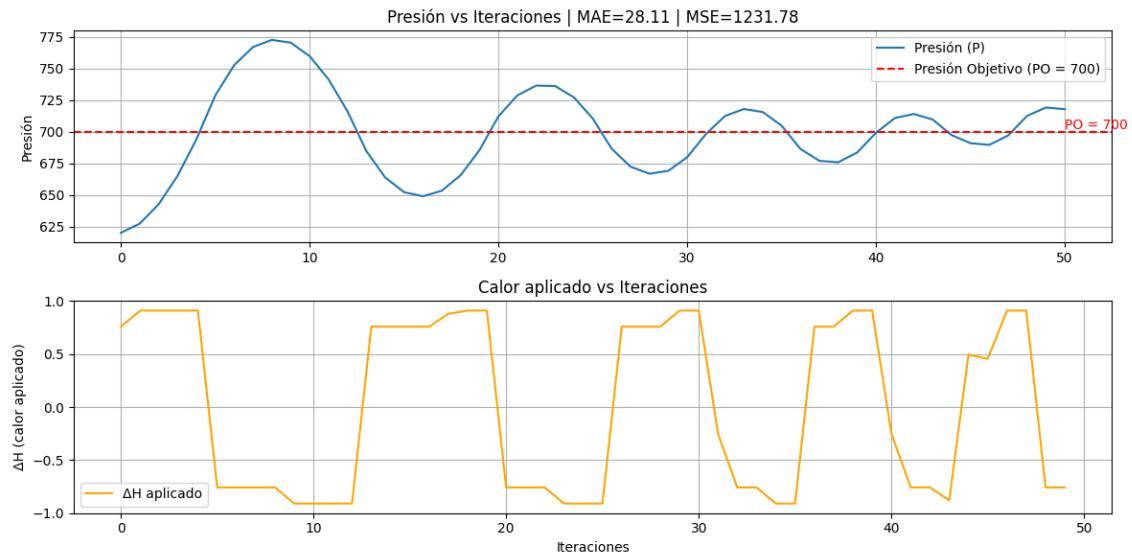


Figura 89: Evolución de la presión y del calor aplicado para el sistema con presión inicial de 620 y presión objetivo de 700, en 50 iteraciones.

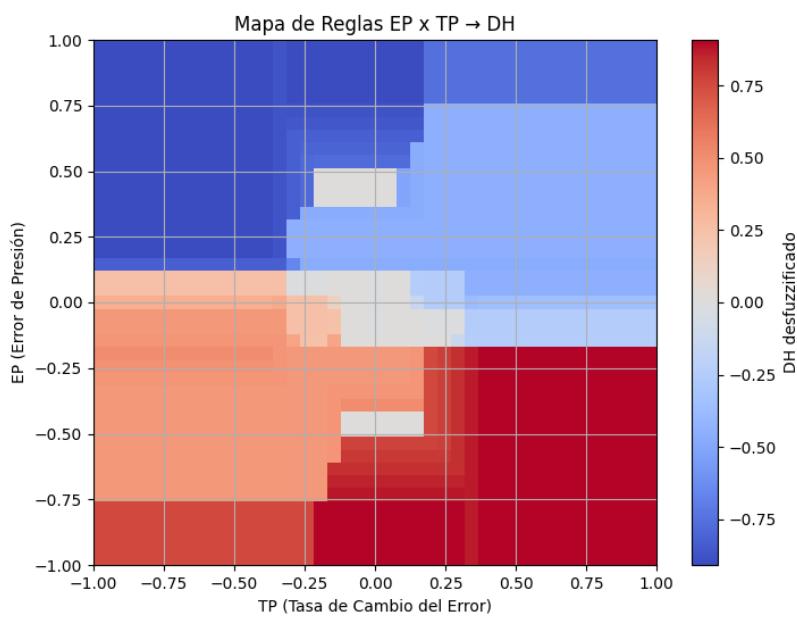


Figura 90: Mapa de des-difusión para el sistema con presión inicial de 620 y presión objetivo de 700, usando promedio de los supremos como método de des-difusión.

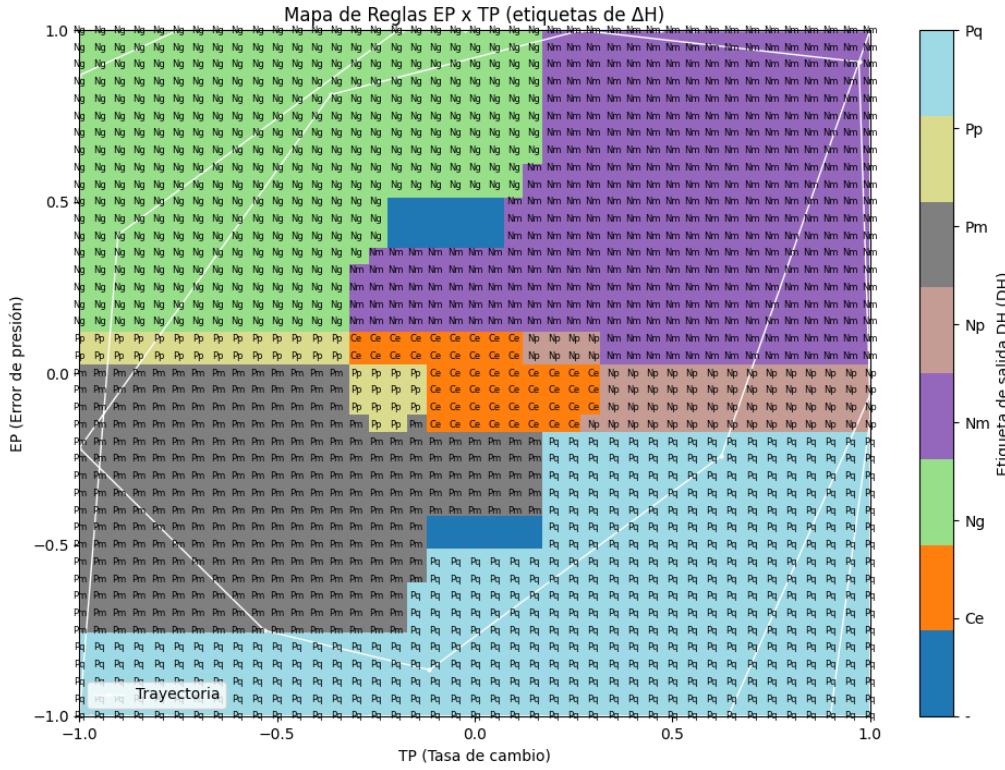


Figura 91: Trayectoria del sistema en el espacio EP vs TP, con etiquetas difusas de salida (DH). Simulación con presión inicial de 620 y presión objetivo de 700.

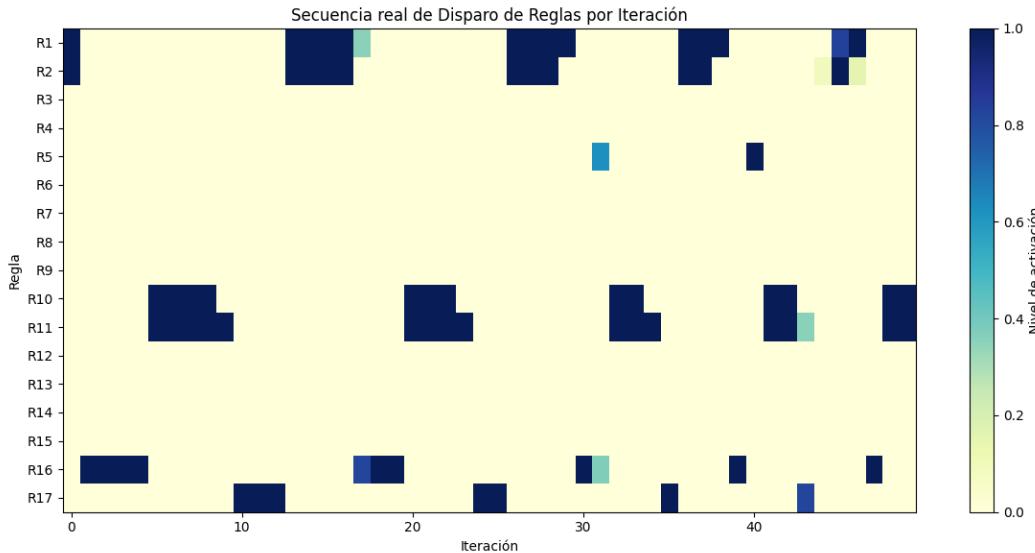


Figura 92: Secuencia de activación de reglas por iteración en el sistema con presión inicial de 620 y presión objetivo de 700.

Configuración Inicial caso 2

- Presión Objetivo (PO): 700
- Presión Inicial (P0): 720

- Iteraciones: 50
- Coeficiente: 0.9
- Método de des-difusión: Promedio de los Supremos

En este caso, se confirma el comportamiento observado en el caso 1, donde la presión inicial $P_0 = 720$ al estar cercana a la presión objetivo $P_O = 700$ facilita una aproximación rápida en las primeras iteraciones.

Sin embargo, como se muestra en la Figura 93, el sistema posteriormente oscila con amplitud creciente, evidenciando que no logra una convergencia estable en un número reducido de ciclos, lo que refleja una ineficiencia del controlador bajo este método.

La Figura 95, exhibe una trayectoria oscilatoria persistente en el mapa de reglas activadas Figura 94, similar al caso anterior, pero sin lograr una estabilización precisa en el conjunto de referencia.

Por último, la secuencia de disparo de reglas mostrada en la Figura 96 evidencia una activación intensa y continua de reglas, consistente con el patrón de oscilación observado en la dinámica del sistema.

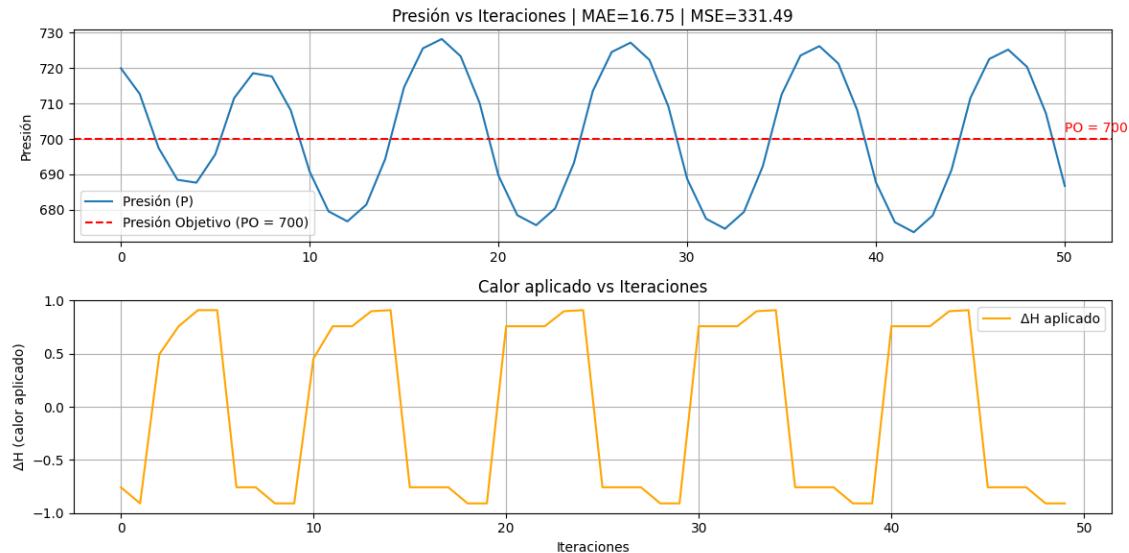


Figura 93: Evolución de la presión y del calor aplicado para el sistema con presión inicial de 720 y presión objetivo de 700, en 50 iteraciones.

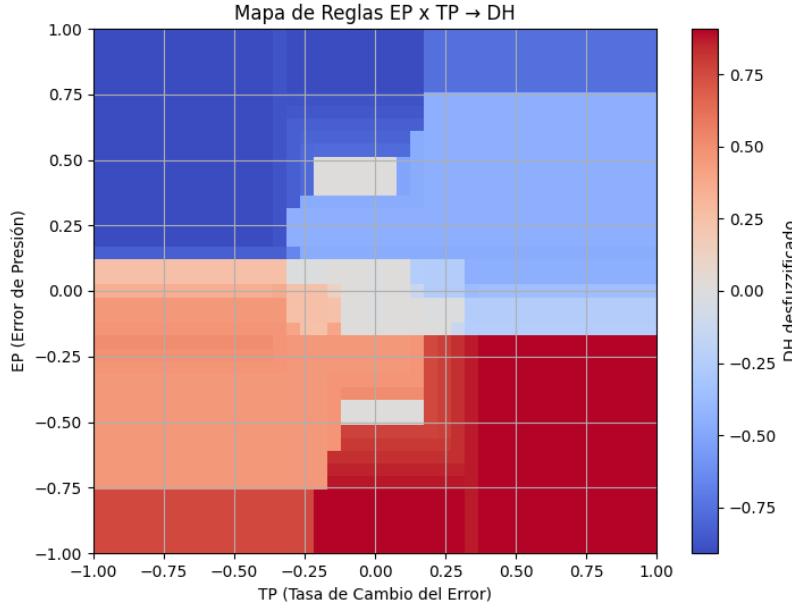


Figura 94: Mapa de desdiferenciación para el sistema con presión inicial de 720 y presión objetivo de 700, usando promedio de los supremos como método de desdiferenciación.

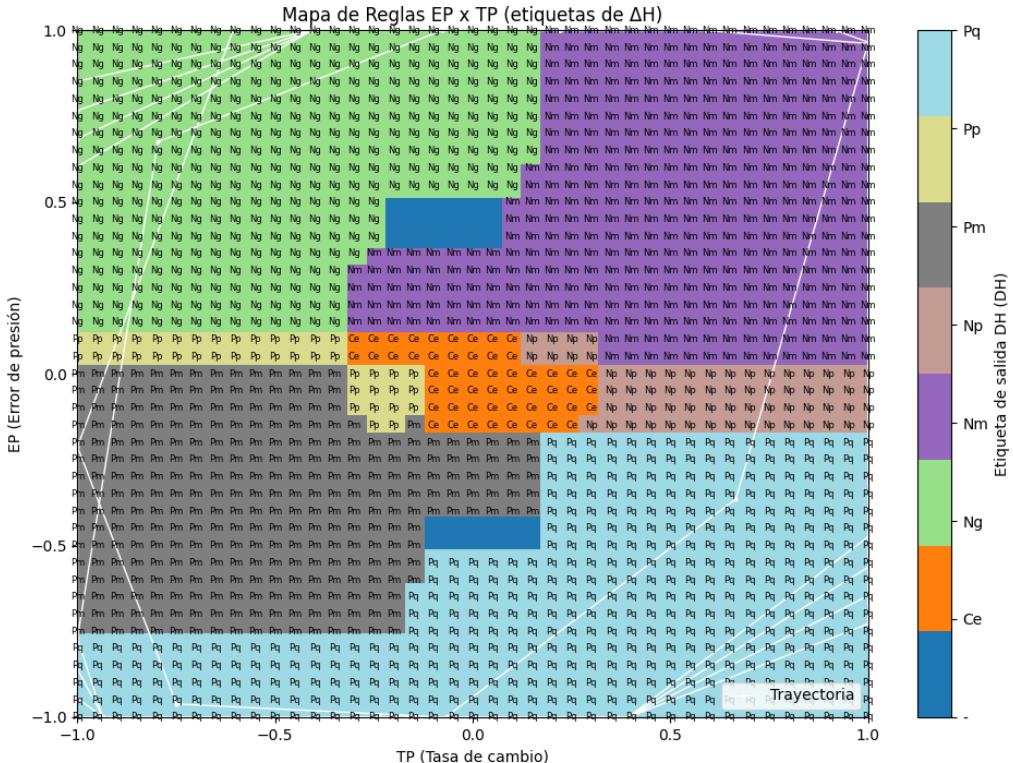


Figura 95: Trayectoria del sistema en el espacio EP vs TP, con etiquetas difusas de salida (ΔH). Simulación con presión inicial de 720 y presión objetivo de 700.

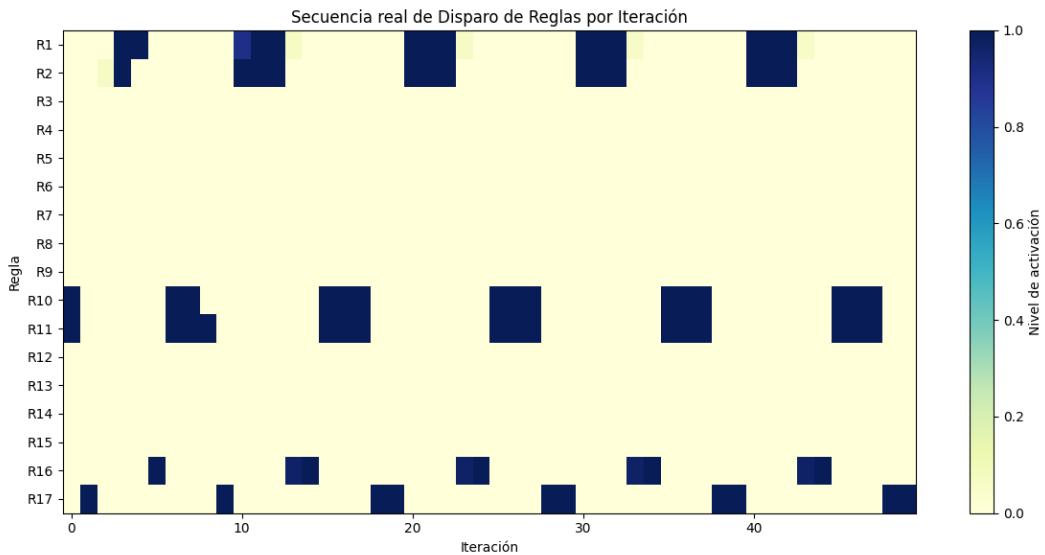


Figura 96: Secuencia de activación de reglas por iteración en el sistema con presión inicial de 720 y presión objetivo de 700.

Configuración Inicial caso 3

- Presión Objetivo (PO): 700
- Presión Inicial (P0): 830
- Iteraciones: 50
- Coeficiente: 0.9
- Método de desdifusificación: Promedio de los Supremos

En este caso, se observa un comportamiento similar al del caso 1. Sin embargo, como se muestra en la Figura 97, la presión presenta una leve tendencia decreciente en el último pico, indicando que el sistema no logra una convergencia completa y mantiene una oscilación con amplitud invertida respecto al objetivo.

La trayectoria visualizada en la Figura 99, respalda este fenómeno, evidenciando un patrón de recorrido más abierto y desplazado negativamente respecto al centro de referencia.

El mapa de reglas activadas en la Figura 98, muestra un esquema global similar al del método centroide, aunque con diferencias en la activación de zonas específicas.

Por último, la secuencia de activación de reglas en la Figura 100, revela un patrón de oscilaciones persistentes, con pequeñas variaciones en la intensidad de disparo en comparación al caso de centro de gravedad.

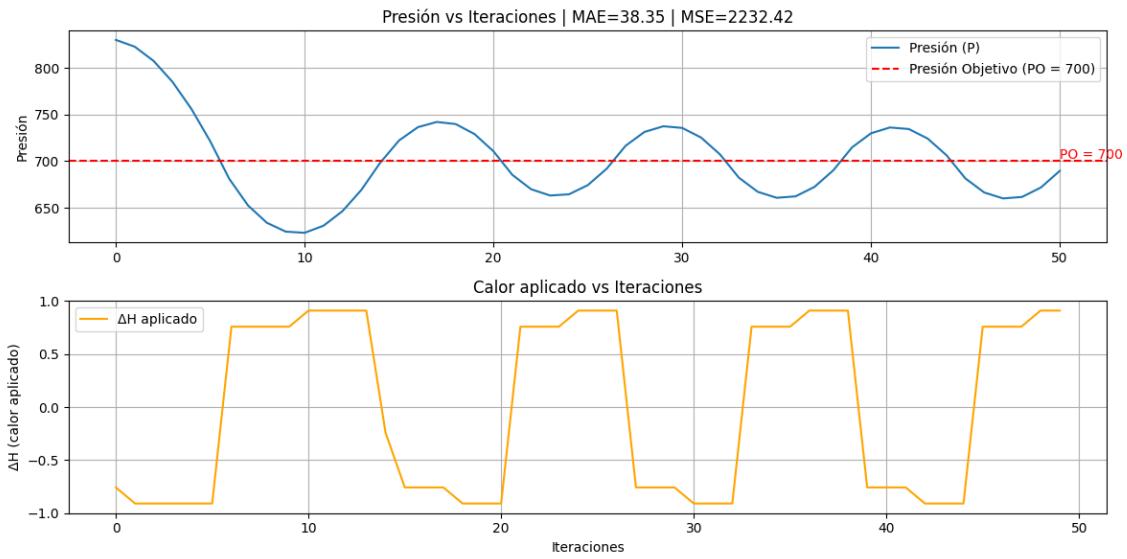


Figura 97: Evolución de la presión y del calor aplicado para el sistema con presión inicial de 830 y presión objetivo de 700, en 50 iteraciones.

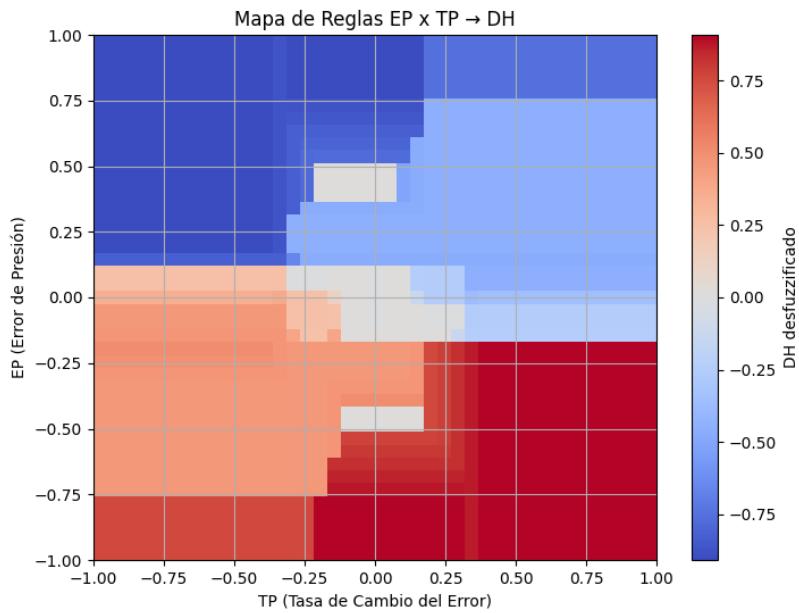


Figura 98: Mapa de desdiferenciación para el sistema con presión inicial de 830 y presión objetivo de 700, usando centroide como método de desdiferenciación.

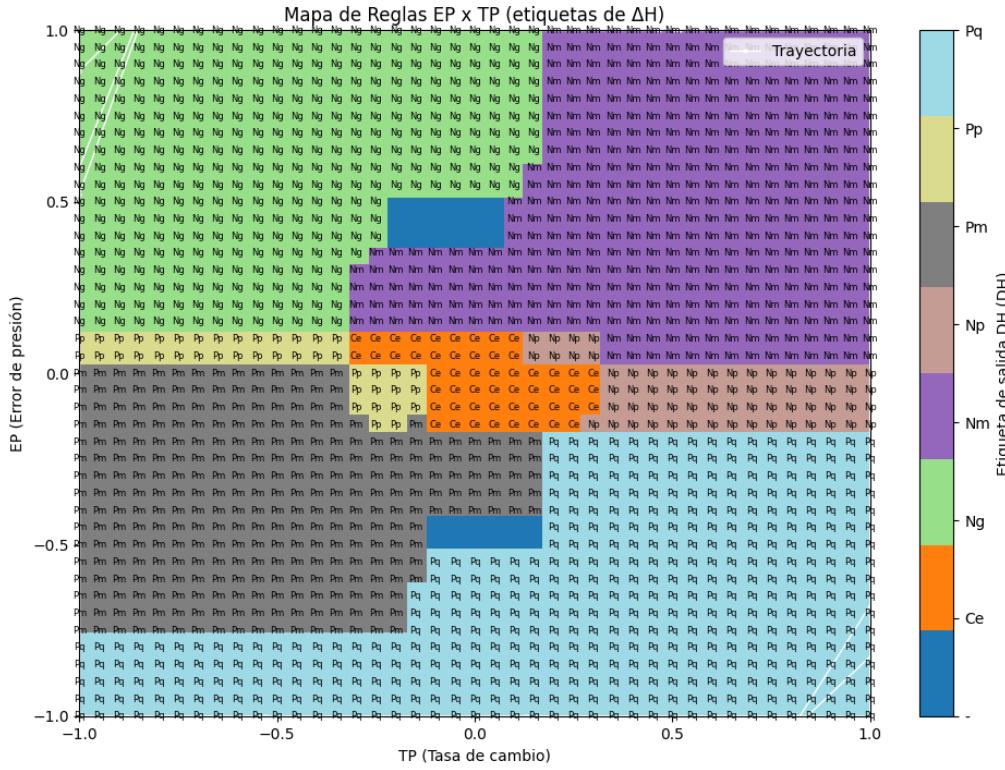


Figura 99: Trayectoria del sistema en el espacio EP vs TP, con etiquetas difusas de salida (DH). Simulación con presión inicial de 830 y presión objetivo de 700.

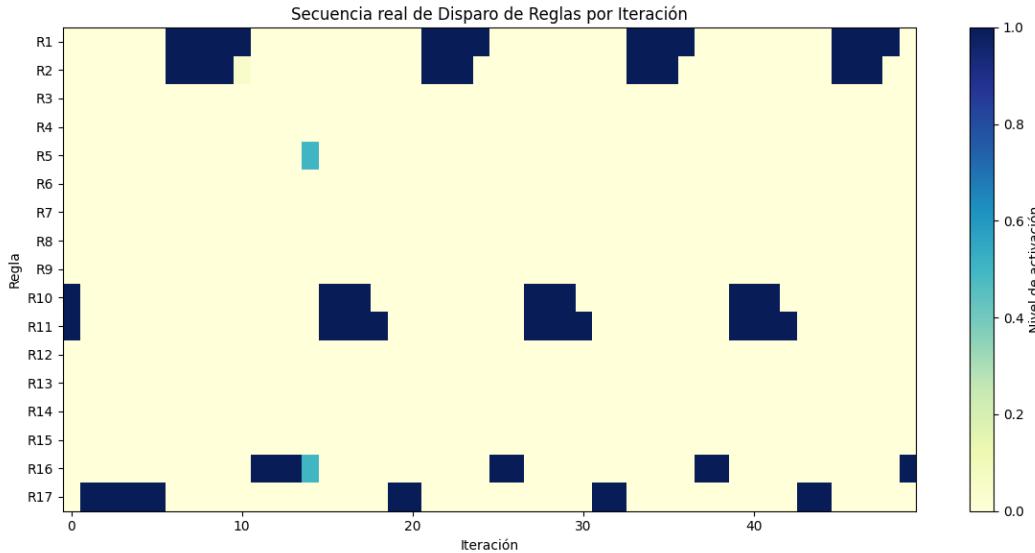


Figura 100: Secuencia de activación de reglas por iteración en el sistema con presión inicial de 830 y presión objetivo de 700.

5.3. Resultados por método de des-difusión Alturas

Configuración Inicial caso 1

- Presión Objetivo (PO): 700
- Presión Inicial (P0): 620
- Iteraciones: 50
- Coeficiente: 0.9
- Método de des-difusión: Alturas

Al aplicar el método de des-difusión por alturas, se evidencia en la Figura 101, un comportamiento similar al observado en el caso 2 utilizando el método de promedio de los supremos. Sin embargo, en este caso, la amplitud de oscilación es mayor y el comportamiento del sistema resulta más amplificado.

En las Figuras 102 y 103, se aprecia tanto el mapa de activación como la trayectoria del sistema. Aunque mantienen similitudes con el caso 2, se activan algunas reglas adicionales y la trayectoria tiende a desplazarse hacia el contorno, amplificando su recorrido.

Respecto a la secuencia de disparo de reglas, mostrada en la Figura 104, se observa una oscilación cíclica persistente en las activaciones, repitiendo patrones de forma sostenida a lo largo de las iteraciones.

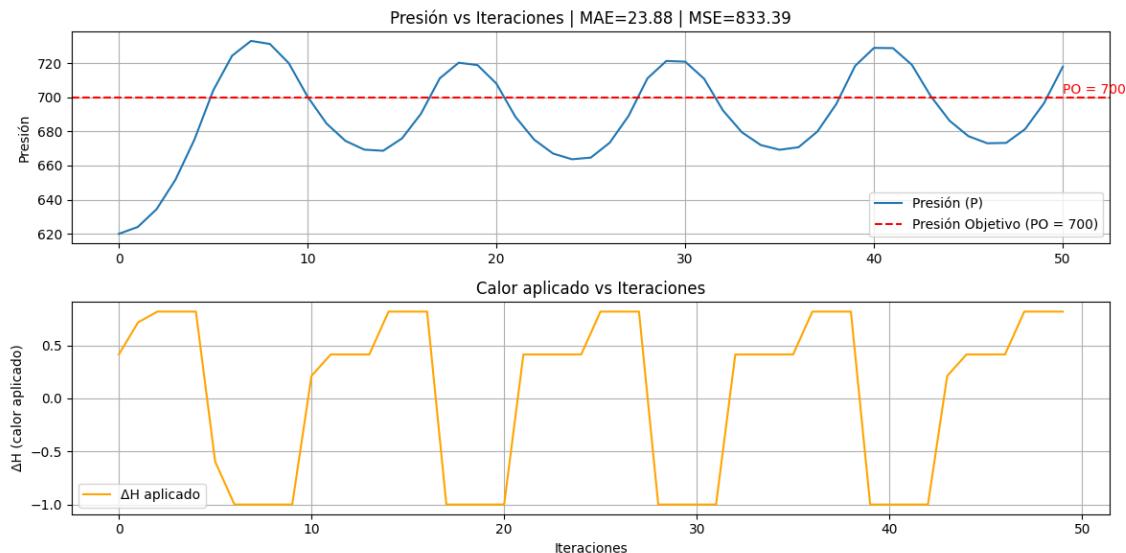


Figura 101: Evolución de la presión y del calor aplicado para el sistema con presión inicial de 620 y presión objetivo de 700, en 50 iteraciones.

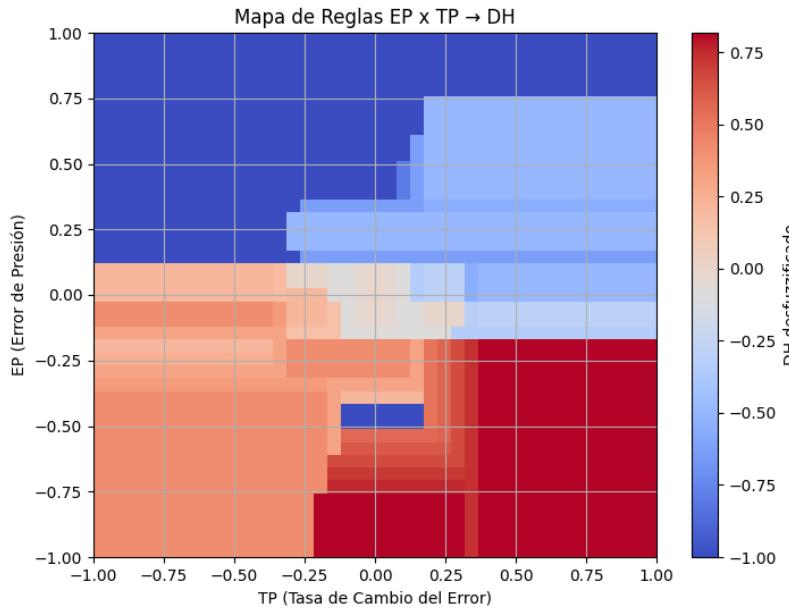


Figura 102: Mapa de des-difusión para el sistema con presión inicial de 620 y presión objetivo de 700, usando alturas como método de des-difusión.

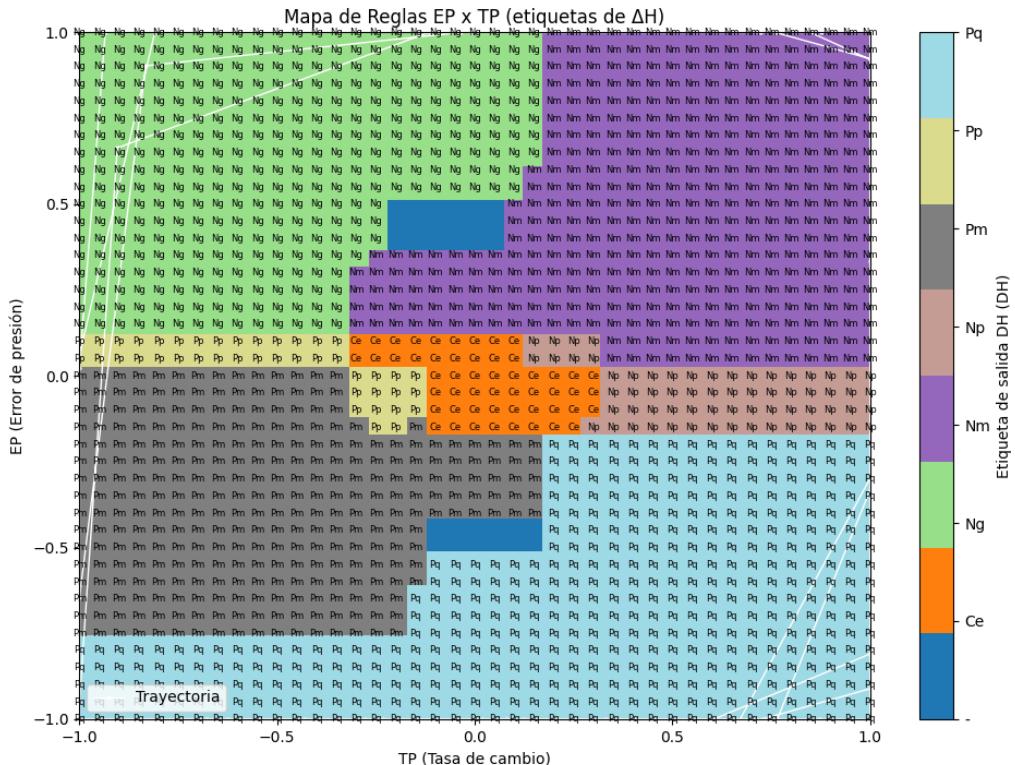


Figura 103: Trayectoria del sistema en el espacio EP vs TP, con etiquetas difusas de salida (ΔH). Simulación con presión inicial de 620 y presión objetivo de 700.

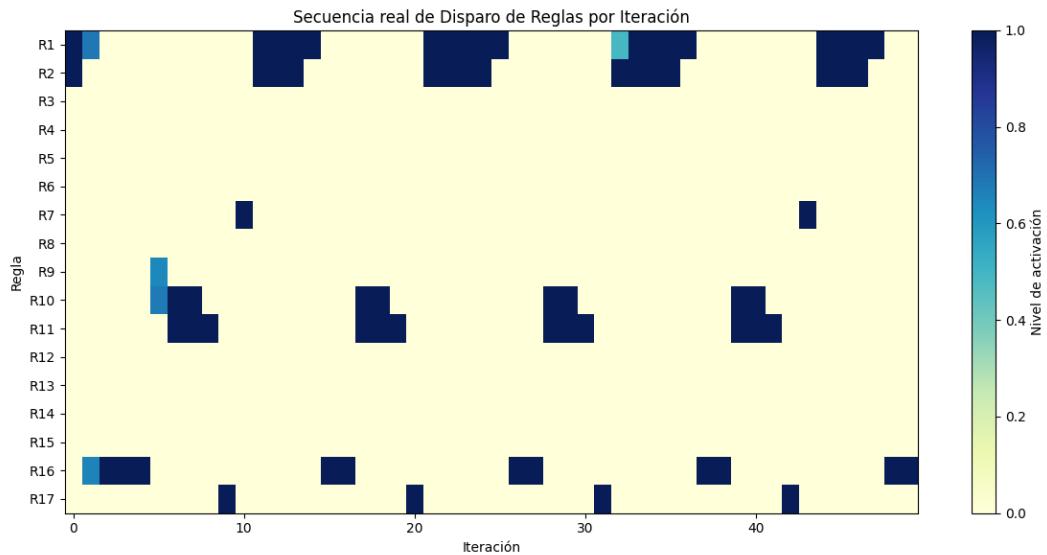


Figura 104: Secuencia de activación de reglas por iteración en el sistema con presión inicial de 620 y presión objetivo de 700.

Configuración Inicial caso 2

- Presión Objetivo (PO): 700
- Presión Inicial (P0): 720
- Iteraciones: 50
- Coeficiente: 0.9
- Método de des-difusión: Alturas

Similar al caso 2 por método de promedio de los supremos, en este escenario se observa una amplificación gradual del comportamiento del modelo, como se aprecia en la Figura 105. Sin embargo, esta amplificación es más pronunciada, demostrando que el sistema bajo el método de alturas resulta ineficiente y no logra una convergencia efectiva hacia la presión objetivo.

El mapa de activaciones Figura 106, y la trayectoria obtenida Figura 107, evidencian este comportamiento de expansión, mientras que la Figura 108, muestra una secuencia de disparo cíclica de las reglas a lo largo de las iteraciones.

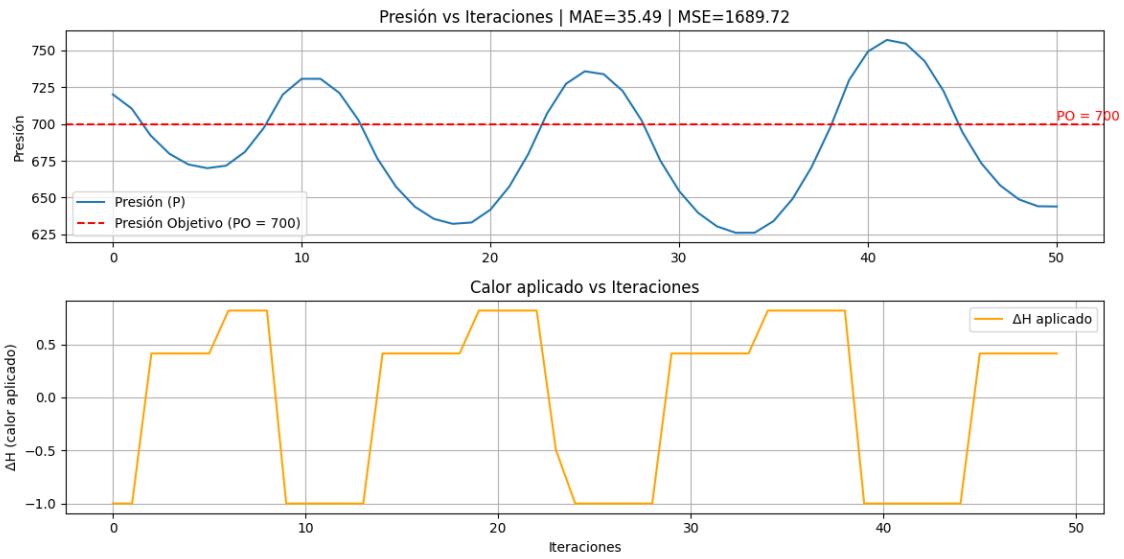


Figura 105: Evolución de la presión y del calor aplicado para el sistema con presión inicial de 720 y presión objetivo de 700, en 50 iteraciones.

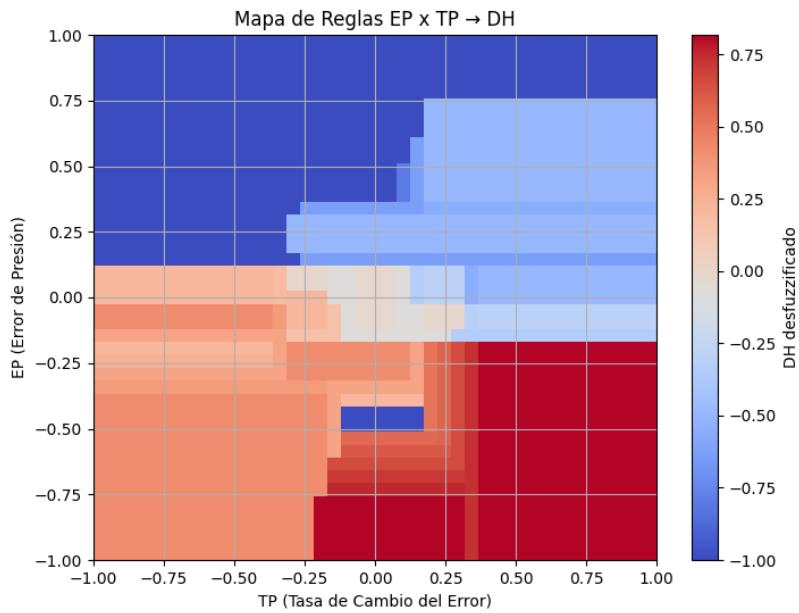


Figura 106: Mapa de des-difusión para el sistema con presión inicial de 720 y presión objetivo de 700, usando alturas como método de des-difusión.

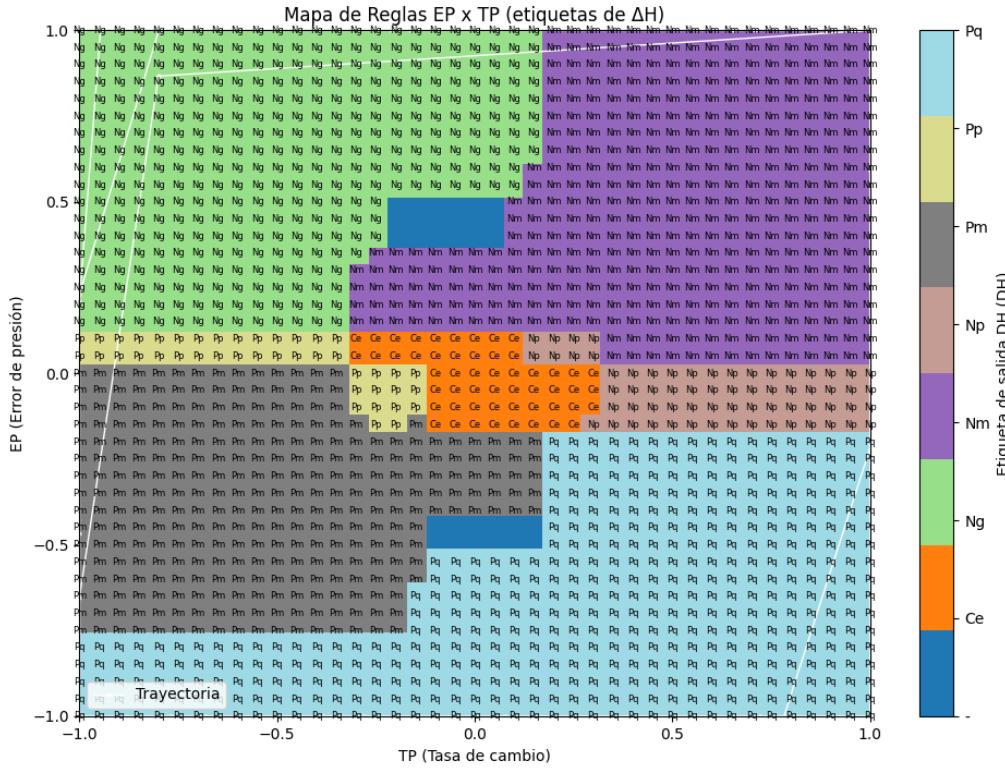


Figura 107: Trayectoria del sistema en el espacio EP vs TP, con etiquetas difusas de salida (DH). Simulación con presión inicial de 720 y presión objetivo de 700.

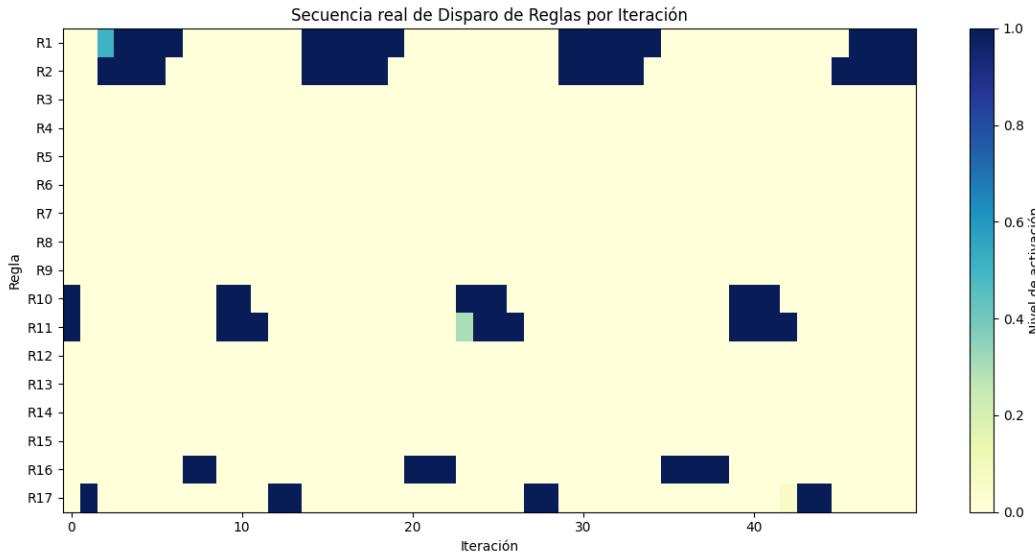


Figura 108: Secuencia de activación de reglas por iteración en el sistema con presión inicial de 720 y presión objetivo de 700.

Configuración Inicial caso 3

- Presión Objetivo (PO): 700
- Presión Inicial (P0): 830

- Iteraciones: 50
- Coeficiente: 0.9
- Método de des-difusión: Alturas

Similar al caso 3 bajo el método de promedio de los supremos, en este escenario el sistema presenta un comportamiento oscilatorio amplificado, con una mayor amplitud de variación, como se observa en la Figura 109.

Este fenómeno confirma que el modelo basado en el método de alturas resulta ineficiente para lograr una convergencia adecuada cuando la presión inicial es elevada.

El mapa de activaciones Figura 110, la trayectoria Figura 111 y la secuencia de disparo de reglas Figura 112 respaldan este análisis, evidenciando la dificultad del sistema para estabilizarse en torno a la presión objetivo.

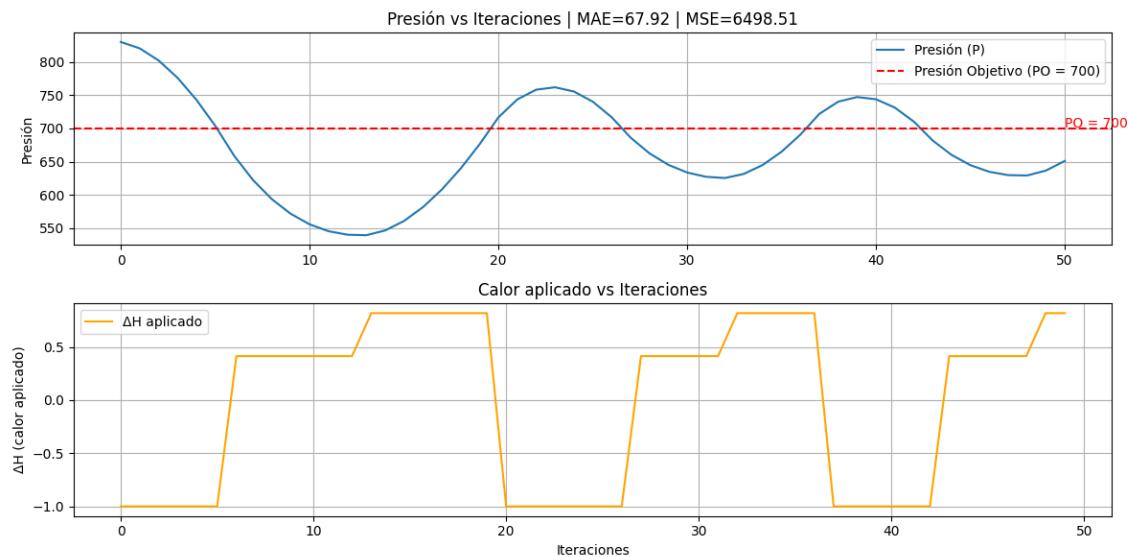


Figura 109: Evolución de la presión y del calor aplicado para el sistema con presión inicial de 830 y presión objetivo de 700, en 50 iteraciones.

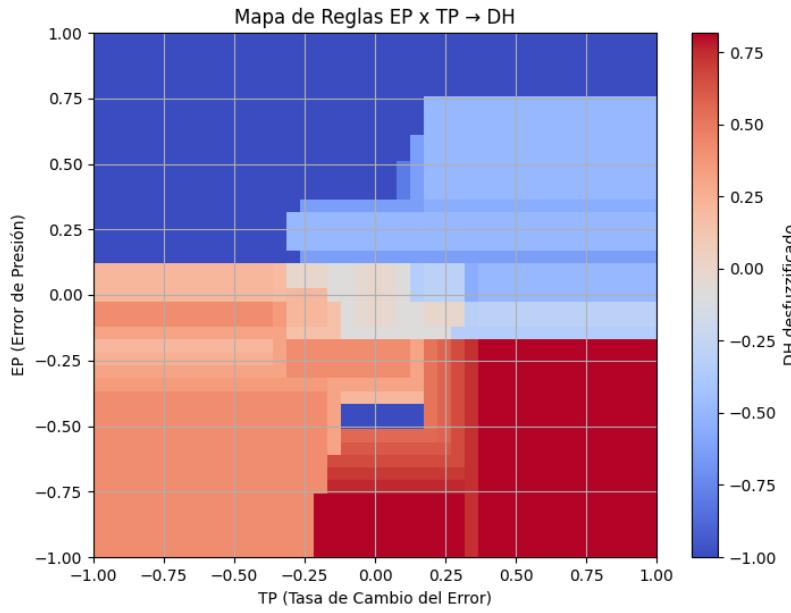


Figura 110: Mapa de des-difusión para el sistema con presión inicial de 830 y presión objetivo de 700, usando alturas como método de des-difusión.

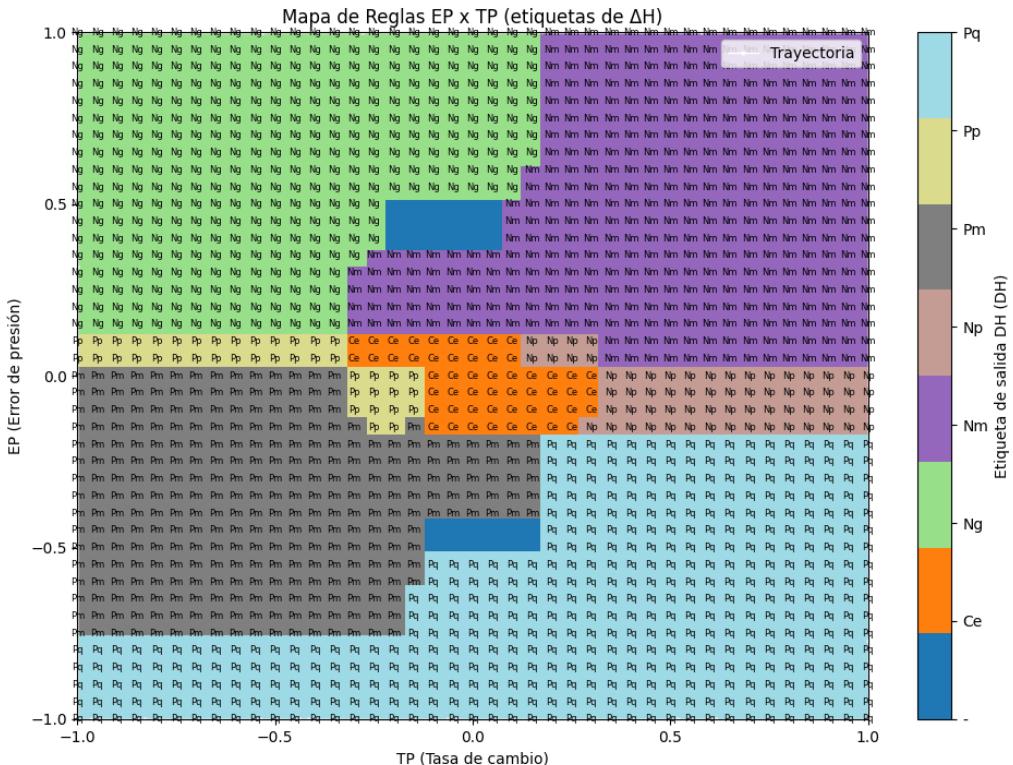


Figura 111: Trayectoria del sistema en el espacio EP vs TP, con etiquetas difusas de salida (ΔH). Simulación con presión inicial de 830 y presión objetivo de 700.

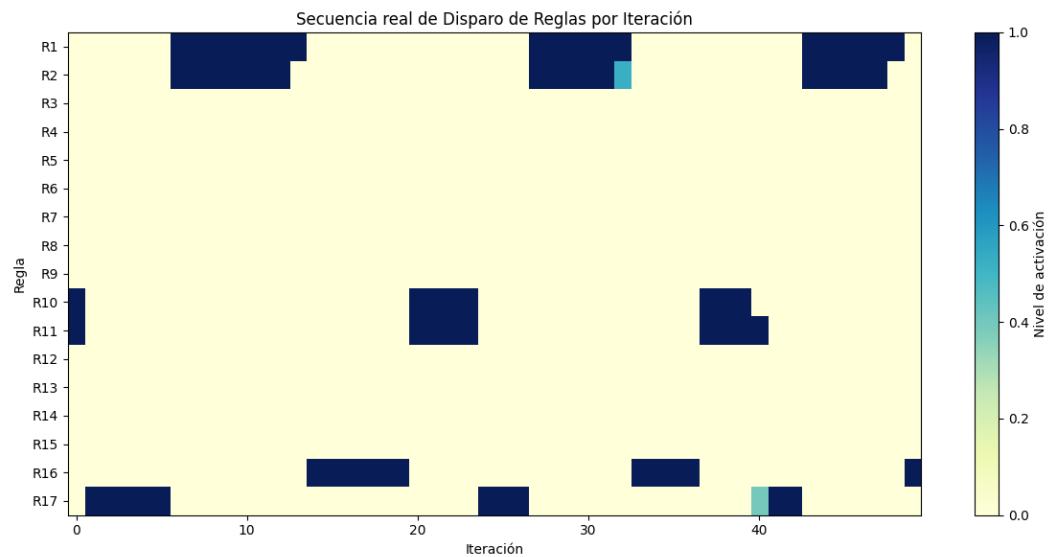


Figura 112: Secuencia de activación de reglas por iteración en el sistema con presión inicial de 830 y presión objetivo de 700.

6. Discusión y Conclusiones

El análisis realizado permite evaluar el desempeño del sistema difuso bajo distintas configuraciones de entrada, métodos de des-difusión y modificaciones en la base de conocimientos. A partir de los resultados obtenidos en la máquina simplificada (Sección 3), se constata que todos los métodos de des-difusión considerados (centro de gravedad, promedio de los supremos y altura) logran un control aceptable, aunque con diferencias notorias en el patrón de respuesta.

En particular, el método de centro de gravedad muestra un comportamiento más robusto y consistente para las tres condiciones de presión inicial ($P_0 = 620, 720$ y 830), logrando aproximarse de manera más rápida y estable al valor de referencia ($P_O = 700$) (ver Figuras 5, 9 y 13). No obstante, para presiones de entrada elevadas como ($P_0 = 830$), el método de altura demuestra un mejor ajuste final, reduciendo la amplitud de las oscilaciones en torno al objetivo (Figura 25).

Respecto al comportamiento de activaciones de reglas, se observa que la existencia de un número elevado de conjuntos difusos y reglas permite generar trayectorias de control más rígidas y estructuradas (Figuras 6, 7, 10, 11, 14, 15). Sin embargo, se evidencia que el sistema no converge estrictamente al valor objetivo, sino que tiende a oscilar de manera permanente en un rango controlado. Esta dinámica refleja el funcionamiento práctico de un sistema de control difuso, donde el objetivo no es la convergencia exacta, sino la permanencia en una región aceptable del universo de discurso.

En el análisis de reducción de reglas (Sección 4), se constató que la eliminación de reglas clave (por ejemplo, reglas 9 y 16) induce un comportamiento escalonado en la respuesta, aumentando la dificultad para alcanzar el valor objetivo (Figuras 41, 45 y 49). Particularmente, la eliminación de la regla 1 junto a las anteriores provoca que el sistema se torne deficiente o inestable en todos los métodos de des-difusión evaluados (Figuras 53, 57 y 61). Estos resultados reflejan que las reglas iniciales de corrección del error cumplen un rol fundamental en la estabilidad y desempeño del controlador.

Una observación relevante es que el método de altura exhibe mayor sensibilidad frente a las modificaciones de la base de conocimiento. La reducción de reglas impacta de manera más severa en la respuesta del sistema al usar este método, generando trayectorias de control erráticas y resultados imprecisos (Figuras 43, 47, 51, 55, 59 y 63). Este fenómeno puede atribuirse a la naturaleza del método, que privilegia el valor más representativo de la pertenencia máxima y, por tanto, es más vulnerable a la eliminación de alternativas de inferencia.

En la sección de reducción de conjuntos (Sección 4.3), se observó que simplificar la base de conocimientos genera un mejor tiempo de respuesta hacia el valor objetivo, a costa de un mayor número de activaciones de reglas por iteración (Figuras 68, 72 y 76). Esta estrategia, si bien mejora la rapidez del control, debe ser aplicada cuidadosamente, ya que la fusión de conjuntos puede inducir activaciones menos selectivas y afectar la fineza del ajuste.

Finalmente, en la máquina compleja (Sección 5), donde el calor se convierte en una variable dinámica influenciada por un coeficiente de ($c = 0,9$), se evidencia que los métodos de

centro de gravedad logran mantener trayectorias de control razonables (Figuras 77–88), mientras que los métodos de promedio de supremos y altura tienden a divergir, generando patrones de oscilación amplificada y menor estabilidad (Figuras 89–100, 101–112). Esto confirma que el diseño de la lógica difusa, junto con la selección adecuada del método de des-difusión, son aspectos críticos para garantizar un comportamiento deseable del sistema bajo condiciones dinámicas.

Como conclusión, se destaca que, elegir correctamente el método de des-difusión según la naturaleza de la planta garantiza su funcionamiento, además, preservar reglas críticas de activación temprana para evitar inestabilidades, a su vez, garantiza el funcionamiento y este debe ser mantenido y monitoreado constantemente. por ultimo, aplicar con criterio las reducciones de conjuntos y reglas para optimizar la respuesta sin sacrificar robustez es una tarea de sumo cuidado y debe ser llevada a cabo con criterio y comprendiendo el funcionamiento del sistema en su totalidad.

Anexo A: Código fuente del sistema simplificado

A continuación se presenta el código completo utilizado para la simulación del sistema difuso simplificado:

```
1 import numpy as np
2 import matplotlib.pyplot as plt
3 import matplotlib.colors as mcolors
4 # =====
5 # === PARÁMETROS GLOBALES
6 # =====
7
8 EP = (-12, 12)
9 TP = (-12, 12)
10 DH = (-1, 1) #rango normalizado, uso un factor de escala 12 para
volver al rango real [-12,12] linea 255
11
12 P0 = 700          # Presión objetivo
13 P_0 = 830          # Presión inicial AQUÍ VARIAR EL PARAMETRO DE
ENTRADA
14 K = 0.8           # Ganancia de la planta
15 ITE = 50          # Ciclos de simulación
16 P_DH = 100          # Resolución del universo de discurso
17 n_reglas = 17        # numero de reglas
18 x_dh = np.linspace(DH[0], DH[1], P_DH)
19
20 # =====
21 # === METODOS
22 # =====
23
24 # mean      = algoritmo promedio de los supremos
25 # centroide = algoritmo centro de gravedad
26 # altura     = algoritmo de altura
27
28 seleccionar_metodo = "mean" # <-- CAMBIAR AQUÍ PARA SELECCIONAR
MÉTODO por centroide, altura Ø supremos
29 print(f"==> SIMULADOR CLD - MÉTODO: {seleccionar_metodo.upper()}"
==>)
30
31 # =====
32 # === CONJUNTOS DIFUSOS
33 # =====
34
35 c_difusos = {
36     "Ng": (-1.0, -1.0, -0.8, -0.5),
37     "Nm": (-0.8, -0.5, -0.4, -0.2),
38     "Np": (-0.4, -0.3, -0.2, -0.1),
39     "Ni": (-0.2, -0.1, 0.0, 0.0),
40     "Ce": (-0.2, 0.0, 0.0, 0.2),
41     "Pi": (0.0, 0.0, 0.1, 0.2),
42     "Pp": (0.1, 0.2, 0.3, 0.4),
```

```

43     "Pm": ( 0.2, 0.4, 0.5, 0.8),
44     "Pq": ( 0.5, 0.8, 1.0, 1.0),
45 }
46
47 # =====
48 # === FUNCION TRAPEZOIDAL
49 # =====
50
51 def trapmf(x, a, b, c, d):
52     x = np.asarray(x)
53     u = np.zeros_like(x)

54
55     # Caso 1: a == b (pendiente izquierda vertical)
56     if np.isclose(a, b):
57         idx_izq = (x >= a) & (x <= c)
58         u[idx_izq] = 1.0 # Máxima pertenencia desde a hasta c
59     else:
60         # Pendiente izquierda normal
61         idx_asc = (x >= a) & (x < b)
62         u[idx_asc] = (x[idx_asc] - a) / (b - a + 1e-6)

63
64     # Caso 2: c == d (pendiente derecha vertical)
65     if np.isclose(c, d):
66         idx_der = (x >= b) & (x <= d)
67         u[idx_der] = 1.0 # Máxima pertenencia desde b hasta d
68     else:
69         # Pendiente derecha normal
70         idx_desc = (x > c) & (x <= d)
71         u[idx_desc] = (d - x[idx_desc]) / (d - c + 1e-6)

72
73     # Parte plana (si existe)
74     idx_plano = (x >= b) & (x <= c)
75     u[idx_plano] = 1.0

76
77     return np.clip(u, 0.0, 1.0)
78 # =====
79 # === OPERADOR
80 # =====
81
82 def de_a(A, B):
83     a1, b1, c1, d1 = c_difusos[A]
84     a2, b2, c2, d2 = c_difusos[B]
85     return (min(a1, a2), min(b1, b2), max(c1, c2), max(d1, d2))

86
87 # =====
88 # === ALGORITMO UTILIZADO DEFINIDO EN METODO
89 # =====
90 def desdifusificar(x, ux, metodo= seleccionar_metodo):
91     if metodo == "mean":
92         max_ux = np.max(ux)
93         if max_ux == 0:

```

```

94         return 0
95     x_maximos = x[ux == max_ux]
96     return np.mean(x_maximos)
97 elif metodo == "centroide":
98     return np.sum(x * ux) / (np.sum(ux) + 1e-6)
99 elif metodo == "altura":
100    return x[np.argmax(ux)]
101 else:
102     raise ValueError("Método no reconocido")
103
104 # =====
105 # === REGLAS DIFUSAS
106 # =====
107
108 reglas_difusas = [
109     {"EP": "Ng", "TP": ["Ng", "Pp"], "DH": "Pq"}, #R1
110     {"EP": ["Ng", "Nm"], "TP": ["Ng", "Np"], "DH": "Pm"}, #R2
111     {"EP": "Np", "TP": ["Np", "Pi"], "DH": "Pm"}, #R3
112     {"EP": "Ni", "TP": ["Ng", "Nm"], "DH": "Pm"}, #R4
113     {"EP": "Ni", "TP": ["Pm", "Pq"], "DH": "Np"}, #R5
114     {"EP": ["Ni", "Pi"], "TP": "Ce", "DH": "Ce"}, #R6
115     {"EP": "Pi", "TP": ["Ng", "Nm"], "DH": "Pp"}, #R7
116     {"EP": "Pi", "TP": ["Pm", "Pq"], "DH": "Nm"}, #R8
117     {"EP": "Pp", "TP": ["Np", "Pq"], "DH": "Nm"}, #R9
118     {"EP": ["Pm", "Pq"], "TP": ["Pp", "Pq"], "DH": "Nm"}, #R10
119     {"EP": "Pq", "TP": ["Np", "Pq"], "DH": "Ng"}, #R11
120     {"EP": "Ni", "TP": "Pp", "DH": "Ce"}, #R12
121     {"EP": "Ni", "TP": "Np", "DH": "Pp"}, #R13
122     {"EP": "Pi", "TP": "Np", "DH": "Ce"}, #R14
123     {"EP": "Pi", "TP": "Pp", "DH": "Np"}, #R15
124     {"EP": ["Ng", "Np"], "TP": ["Pm", "Pq"], "DH": "Pq"}, #R16
125     {"EP": ["Pp", "Pq"], "TP": ["Ng", "Nm"], "DH": "Ng"}, #R17
126 ]
127
128
129 # =====
130 # === MONITOREO DE PERTINENCIA
131 # =====
132
133 mu_ep_test = trapmf(1.0, *c_difusos["Pq"])
134 print("mu(1.0 in Pq):", mu_ep_test)
135
136 mu_tp_test = trapmf(1.0, *de_a("Np", "Pq"))
137 print("mu(1.0 in Np/Pq):", mu_tp_test)
138
139
140 # =====
141 # === MOTOR DE INFERENCIA
142 # =====
143
144 def evaluar_regla(ep_val, tp_val, regla, x_dh):

```

```

145     ep_set = de_a(*regla["EP"]) if isinstance(regla["EP"], list)
146         else c_difusos[regla["EP"]] # Obtener el conjunto difuso
147             de EP (Error de Presión)
148     tp_set = de_a(*regla["TP"]) if isinstance(regla["TP"], list)
149         else c_difusos[regla["TP"]] # Obtener el conjunto difuso
150             de TP (Tasa de Cambio de la Presión)
151     u_ep = trapmf(ep_val, *ep_set) # Evaluar el grado de
152         pertenencia del valor actual de EP al conjunto difuso
153             correspondiente
154     u_tp = trapmf(tp_val, *tp_set) # Evaluar el grado de
155         pertenencia del valor actual de TP al conjunto difuso
156             correspondiente
157     activacion = min(u_ep, u_tp) # Determinar la activación de la
158         regla como el mínimo entre u_ep y u_tp (operador AND
159             difuso)
160     u_dh = trapmf(x_dh, *c_difusos[regla["DH"]]) # Obtener la
161         función de pertenencia del consecuente (salida H)
162     return np.fmin(activacion, u_dh) # Recortar la función de
163         salida aplicando el nivel de activación (implicación tipo
164             Mamdani)
165
166 def inferencia_cld(ep_val, tp_val, reglas, x_dh, metodo=
167 seleccionar_metodo):
168     u_salida_total = np.zeros_like(x_dh)
169     for regla in reglas:
170         u_recortada = evaluar_regla(ep_val, tp_val, regla, x_dh)
171         u_salida_total = np.fmax(u_salida_total, u_recortada)
172     return desdifusificar(x_dh, u_salida_total, metodo),
173         u_salida_total
174
175 # =====
176 # === CREAR MAPA
177 # =====
178
179 # Definiciones
180 etiquetas_EP = ["Ng", "Nm", "Np", "Ni", "Ce", "Pi", "Pp", "Pm", "Pq"]
181 etiquetas_TP = ["Ng", "Nm", "Np", "Ni", "Ce", "Pi", "Pp", "Pm", "Pq"]
182
183 mapa = np.full((len(etiquetas_EP), len(etiquetas_TP)), "", dtype=
184 object)
185
186 for i, ep in enumerate(etiquetas_EP):
187     for j, tp in enumerate(etiquetas_TP):
188         salidas = []
189         for regla in reglas_difusas:
190             ep_match = ep in regla["EP"] if isinstance(regla["EP"],
191                 list) else ep == regla["EP"]
192             tp_match = tp in regla["TP"] if isinstance(regla["TP"],
193                 list) else tp == regla["TP"]

```

```

176         if ep_match and tp_match:
177             salidas.append(regla["DH"])
178             mapa[i, j] = "/" . join(salidas) if salidas else "-"
179
180 # Visualización del mapa de reglas simbólico bonito
181 fig, ax = plt.subplots(figsize=(10, 8))
182 ax.set_xticks(np.arange(len(etiquetas_TP)))
183 ax.set_yticks(np.arange(len(etiquetas_EP)))
184 ax.set_xticklabels(etiquetas_TP, fontsize=9, rotation=45, ha="right")
185 ax.set_yticklabels(etiquetas_EP, fontsize=9)
186
187 # Fondo de colores por cantidad de reglas activadas
188 cantidad_reglas = np.vectorize(lambda x: x.count("/") + 1 if x != "-" else 0)(mapa).astype(int)
189 cmap = plt.cm.viridis
190 im = ax.imshow(cantidad_reglas, cmap=cmap)
191
192 # Asignación y Mostrar etiquetas
193 for i in range(len(etiquetas_EP)):
194     for j in range(len(etiquetas_TP)):
195         text = mapa[i, j]
196         color = "white" if cantidad_reglas[i, j] >= 2 else "black"
197         ax.text(j, i, text, ha="center", va="center", fontsize=8,
198                 color=color)
199
200 # Títulos y leyenda
201 ax.set_xlabel("TP (Tasa de Cambio)", fontsize=11)
202 ax.set_ylabel("EP (Error de Presión)", fontsize=11)
203 ax.set_title("Mapa de Reglas Difusas EP x TP DH", fontsize=13)
204 cbar = fig.colorbar(im, ax=ax)
205 cbar.set_label("Cantidad de Reglas Activadas", fontsize=10)
206
207 plt.tight_layout()
208 plt.show()
209
210 # =====
211 # === SIMULACIÓN
212 # =====
213 P_hist, EP_hist, TP_hist, DH_hist = [P_0], [], [], []
214
215 print(f"{'Iter':<5} {'P(t)':>8} {'EP':>8} {'TP':>8} {'EP_norm':>10} {'TP_norm':>10} {'dH':>8} {'P(t+1)':>10}")
216 print("=" * 70)
217 resultados = {}
218
219 for t in range(ITE):
220     P_actual = P_hist[-1]
221     EP_t = P_actual - P0 # EP(t) = P(t) - P0

```

```

222 print(f"error de presión = {EP_t:.2f}")
223 # Cálculo correcto de TP(t)
224 if t == 0:
225     EP_prev = 0 # asumimos EP(t-1) = 0
226     TP_t = EP_t - EP_prev
227 else:
228     TP_t = EP_t - EP_hist[-1]
229     print(f"tasa de cambio = {TP_t:.2f}")
230     # P_anterior = P_hist[-2]
231     # EP_prev = P_anterior - PO
232     # TP_t = EP_t - EP_prev
233
234 # Normalización
235 ep_norm = np.clip(EP_t / 12, -1, 1)
236 tp_norm = np.clip(TP_t / 12, -1, 1)
237
238 # Inicializar matriz de activación real
239 if t == 0:
240     activaciones_reales = []
241
242 activaciones_t = []
243
244 for regla in reglas_difusas:
245     ep_set = de_a(*regla["EP"]) if isinstance(regla["EP"], list) else c_difusos[regla["EP"]]
246     tp_set = de_a(*regla["TP"]) if isinstance(regla["TP"], list) else c_difusos[regla["TP"]]
247     u_ep = trapmf(ep_norm, *ep_set)
248     u_tp = trapmf(tp_norm, *tp_set)
249     activaciones_t.append(min(u_ep, u_tp))
250
251 activaciones_reales.append(activaciones_t)
252
253 # Inferencia y evolución de la planta
254 DH_t, _ = inferencia_cld(ep_norm, tp_norm, reglas_difusas,
255                           x_dh, metodo=seleccionar_metodo)
256 DH_t1 = DH_t * 12 # donde DH_t normalizado y DH_t1 real
257 DP_t = K * DH_t1
258 P_next = P_actual + DP_t
259
260 # Registro
261 EP_hist.append(EP_t)
262 TP_hist.append(TP_t)
263 DH_hist.append(DH_t)
264 P_hist.append(P_next)
265
266 # Output de seguimiento
267 print(f"[{t:<5} {P_actual:>8.2f} {EP_t:>8.2f} {TP_t:>8.2f} {DH_t1:>8.2f} {P_next:>10.2f}]")
268

```

```

268 # Guardar resultados
269 resultados[seleccionar_metodo] = P_hist
270
271
272 # =====
273 # === MÉTRICAS DE ERROR
274 # =====
275
276 MAE = np.mean(np.abs(np.array(P_hist[:-1]) - P0))
277 MSE = np.mean((np.array(P_hist[:-1]) - P0)**2)
278 print("\n== Métricas de desempeño ==")
279 print(f"MAE (Error Absoluto Medio): {MAE:.2f}")
280 print(f"MSE (Error Cuadrático Medio): {MSE:.2f}")
281
282 # =====
283 # === VISUALIZACIÓN
284 # =====
285
286 plt.figure(figsize=(12, 6))
287
288 # Presión
289 plt.subplot(2, 1, 1)
290 plt.plot(P_hist, label="Presión (P)")
291 plt.axhline(P0, color='r', linestyle='--', label=f"Presión
292 Objetivo (P0 = {P0})")
293 plt.text(len(P_hist)-1, P0+2, f'P0 = {P0}', color='r')
294 plt.ylabel("Presión")
295 plt.title(f"Presión vs Iteraciones | MAE={MAE:.2f} | MSE={MSE:.2f
296 }")
297 plt.legend()
298 plt.grid()
299
300 # Calor aplicado
301 plt.subplot(2, 1, 2)
302 plt.plot(DH_hist, label="H aplicado", color='orange')
303 plt.xlabel("Iteraciones")
304 plt.ylabel("H (calor aplicado)")
305 plt.title("Calor aplicado vs Iteraciones")
306 plt.legend()
307 plt.grid()
308
309 plt.tight_layout()
310 plt.show()
311
312 # =====
313 # === MAPA DE REGLAS EP x TP SIN ETIQUETAS
314 # =====
315
316 ep_vals = np.linspace(-1, 1, 41)
317 tp_vals = np.linspace(-1, 1, 41)
318 mapa = np.zeros((len(ep_vals), len(tp_vals)))

```

```

317
318 for i, ep in enumerate(ep_vals):
319     for j, tp in enumerate(tp_vals):
320         DH_val, _ = inferencia_cld(ep, tp, reglas_difusas, x_dh,
321                                     metodo=seleccionar_metodo)
322         mapa[i, j] = DH_val
323
324 plt.figure(figsize=(8, 6))
325 plt.imshow(mapa, extent=[-1, 1, -1, 1], origin='lower', aspect='auto',
326             cmap='coolwarm')
327 plt.colorbar(label='DH desfuzzificado')
328 plt.xlabel('TP (Tasa de Cambio del Error)')
329 plt.ylabel('EP (Error de Presión)')
330 plt.title('Mapa de Reglas EP x TP DH')
331 plt.grid(True)
332 plt.show()
333
334 # =====
335 # === MAPA DE REGLAS EP x TP CON ETIQUETAS
336 # =====
337
338 ep_vals = np.linspace(-1, 1, 41)
339 tp_vals = np.linspace(-1, 1, 41)
340 mapa_etiquetas = np.empty((len(ep_vals), len(tp_vals)), dtype=
341                           object)
342
343 # Evaluar qué etiqueta (DH) se activa más en cada combinación de
344 # EP, TP
345 for i, ep in enumerate(ep_vals):
346     for j, tp in enumerate(tp_vals):
347         activaciones = []
348         etiquetas = []
349
350         for regla in reglas_difusas:
351             ep_set = de_a(*regla["EP"]) if isinstance(regla["EP"],
352                                         list) else c_difusos[regla["EP"]]
353             tp_set = de_a(*regla["TP"]) if isinstance(regla["TP"],
354                                         list) else c_difusos[regla["TP"]]
355
356             u_ep = trapmf(ep, *ep_set)
357             u_tp = trapmf(tp, *tp_set)
358             a = min(u_ep, u_tp)
359
360             activaciones.append(a)
361             etiquetas.append(regla["DH"])
362
363         if max(activaciones) == 0:
364             mapa_etiquetas[i, j] = "--" # sin activación
365         else:
366             idx_max = np.argmax(activaciones)
367             mapa_etiquetas[i, j] = etiquetas[idx_max]

```

```

362
363 # =====
364 # === MAPA COLORIDO DE ETIQUETAS (MEJORADO)
365 # =====
366
367
368 etiquetas_unicas = sorted(set(label for row in mapa_etiquetas for
369     label in row))
370 etiqueta_a_idx = {label: idx for idx, label in enumerate(
371     etiquetas_unicas)}
372 mapa_numerico = np.vectorize(etiqueta_a_idx.get)(mapa_etiquetas)
373 colormap_base = plt.colormaps.get_cmap("tab20") # sin el segundo
374     argumento
375 colors = colormap_base(np.linspace(0, 1, len(etiquetas_unicas)))
376     # extraemos N colores
377 cmap = mcolors.ListedColormap(colors)
378 fig, ax = plt.subplots(figsize=(10, 8))
379
380 # Mostrar el mapa (Y no se invierte ahora)
381 im = ax.imshow(
382     mapa_numerico,
383     cmap=cmap,
384     extent=[-1, 1, -1, 1],
385     origin="lower", # Ahora EP = -1 está abajo y EP = 1 arriba
386     aspect='auto',
387     interpolation='nearest'
388 )
389
390 # Ticks y etiquetas
391 ax.set_xticks(np.linspace(-1, 1, 5))
392 ax.set_yticks(np.linspace(-1, 1, 5))
393 ax.set_xlabel("TP (Tasa de cambio)")
394 ax.set_ylabel("EP (Error de presión)")
395 ax.set_title("Mapa de Reglas EP x TP (etiquetas de H)")
396
397 # Superponer etiquetas DH en cada celda
398 for i, ep in enumerate(ep_vals):
399     for j, tp in enumerate(tp_vals):
400         dh = mapa_etiquetas[i, j]
401         if dh != "-":
402             ax.text(tp, ep, dh, ha='center', va='center',
403                     fontsize=6, color='black')
404
405 # Barra de color con etiquetas DH
406 cbar = plt.colorbar(im, ticks=range(len(etiquetas_unicas)))
407 cbar.ax.set_yticklabels(etiquetas_unicas)
408 cbar.set_label("Etiqueta de salida DH (DH)")
409
410 # Superponer trayectoria real
411 ep_tray = [np.clip(ep / 12, -1, 1) for ep in EP_hist]
412 tp_tray = [np.clip(tp / 12, -1, 1) for tp in TP_hist]

```

```

408
409 ax.plot(tp_tray, ep_tray, 'w.-', label='Trayectoria', linewidth=1, markersize=4)
410 ax.legend()
411
412 plt.grid(False)
413 plt.tight_layout()
414 plt.show()
415
416 # =====
417 # === MOSTRAR LAS REGLAS ACTIVAS EN LA ITERACIÓN
418 # =====
419
420 activaciones_reales = np.array(activaciones_reales)
421 plt.figure(figsize=(12, 6))
422 plt.imshow(activaciones_reales.T, aspect='auto', cmap='YlGnBu',
423            interpolation='nearest')
424 plt.colorbar(label="Nivel de activación")
425 plt.xlabel("Iteración")
426 plt.ylabel("Regla")
427 plt.title("Secuencia real de Disparo de Reglas por Iteración")
428 plt.yticks(ticks=np.arange(n_reglas), labels=[f"R{i+1}" for i in
429             range(n_reglas)])
430 plt.grid(False)
431 plt.tight_layout()
432 plt.show()

```

Anexo B: Código fuente del sistema dinámico

A continuación se presenta el código completo utilizado para la simulación del sistema difuso dinámico:

```

1 import numpy as np
2 import matplotlib.pyplot as plt
3 import matplotlib.colors as mcolors
4 #
5 # === PARÁMETROS GLOBALES
6 #
7
8 EP = (-12, 12)
9 TP = (-12, 12)
10 DH = (-1, 1) #rango normalizado, uso un factor de escala 12 para
11     volver al rango real [-12,12] linea 255
12
13 P0 = 700          # Presión objetivo
14 P_0 = 720          # Presión inicial AQUÍ VARIAR EL PARAMETRO DE
15     ENTRADA
16 K = 0.8           # Ganancia de la planta
17 ITE = 50          # Ciclos de simulación

```

```

16 P_DH = 100      # Resolución del universo de discurso
17 n_reglas = 17    # numero de reglas
18 # Constante de planta (modificable, debe estar entre 0 y 1)
19 c = 0.9 # se puede cambiar por otro valor como 0.5 o 0.9
20 x_dh = np.linspace(DH[0], DH[1], P_DH)
21
22 # =====
23 # === METODO
24 # =====
25
26 # mean      = algoritmo promedio de los supremos
27 # centroide = algoritmo centro de gravedad
28 # altura     = algoritmo de altura
29
30 seleccionar_metodo = "centroide" # <-- CAMBIAR AQUÍ PARA
31          SELECCIONAR MÉTODO por centroide, altura O supremos
32 print(f"==> SIMULADOR CLD - MÉTODO: {seleccionar_metodo.upper()}"
33          ==")
34
35 # =====
36 # === CONJUNTOS DIFUSOS
37 # =====
38
39 c_difusos = {
40     "Ng": (-1.0, -1.0, -0.8, -0.5),
41     "Nm": (-0.8, -0.5, -0.4, -0.2),
42     "Np": (-0.4, -0.3, -0.2, -0.1),
43     "Ni": (-0.2, -0.1, 0.0, 0.0),
44     "Ce": (-0.2, 0.0, 0.0, 0.2),
45     "Pi": (0.0, 0.0, 0.1, 0.2),
46     "Pp": (0.1, 0.2, 0.3, 0.4),
47     "Pm": (0.2, 0.4, 0.5, 0.8),
48     "Pq": (0.5, 0.8, 1.0, 1.0),
49 }
50
51 # =====
52 # === FUNCION TRAPEZOIDAL
53 # =====
54
55 def trapmf(x, a, b, c, d):
56     x = np.asarray(x)
57     u = np.zeros_like(x)
58
59     # Caso 1: a == b (pendiente izquierda vertical)
60     if np.isclose(a, b):
61         idx_izq = (x >= a) & (x <= c)
62         u[idx_izq] = 1.0 # Máxima pertenencia desde a hasta c
63     else:
64         # Pendiente izquierda normal
65         idx_asc = (x >= a) & (x < b)
66         u[idx_asc] = (x[idx_asc] - a) / (b - a + 1e-6)

```

```

65
66     # Caso 2: c == d (pendiente derecha vertical)
67     if np.isclose(c, d):
68         idx_der = (x >= b) & (x <= d)
69         u[idx_der] = 1.0 # Máxima pertenencia desde b hasta d
70     else:
71         # Pendiente derecha normal
72         idx_desc = (x > c) & (x <= d)
73         u[idx_desc] = (d - x[idx_desc]) / (d - c + 1e-6)
74
75     # Parte plana (si existe)
76     idx_plano = (x >= b) & (x <= c)
77     u[idx_plano] = 1.0
78
79     return np.clip(u, 0.0, 1.0)
80 # =====
81 # === OPERADOR
82 # =====
83
84 def de_a(A, B):
85     a1, b1, c1, d1 = c_difusos[A]
86     a2, b2, c2, d2 = c_difusos[B]
87     return (min(a1, a2), min(b1, b2), max(c1, c2), max(d1, d2))
88
89 # =====
90 # === ALGORITMO UTILIZADO DEFINIDO EN METODO
91 # =====
92 def desdifusificar(x, ux, metodo= seleccionar_metodo):
93     if metodo == "mean":
94         max_ux = np.max(ux)
95         if max_ux == 0:
96             return 0
97         x_maximos = x[ux == max_ux]
98         return np.mean(x_maximos)
99     elif metodo == "centroide":
100        return np.sum(x * ux) / (np.sum(ux) + 1e-6)
101    elif metodo == "altura":
102        return x[np.argmax(ux)]
103    else:
104        raise ValueError("Método no reconocido")
105
106 # =====
107 # === REGLAS DIFUSAS
108 # =====
109
110 reglas_difusas = [
111     {"EP": "Ng", "TP": ["Ng", "Pp"], "DH": "Pq"}, #R1
112     {"EP": ["Ng", "Nm"], "TP": ["Ng", "Np"], "DH": "Pm"}, #R2
113     {"EP": "Np", "TP": ["Np", "Pi"], "DH": "Pm"}, #R3
114     {"EP": "Ni", "TP": ["Ng", "Nm"], "DH": "Pm"}, #R4
115     {"EP": "Ni", "TP": ["Pm", "Pq"], "DH": "Np"} #R5

```

```

116 {"EP": ["Ni", "Pi"], "TP": "Ce", "DH": "Ce"}, #R6
117 {"EP": "Pi", "TP": ["Ng", "Nm"], "DH": "Pp"}, #R7
118 {"EP": "Pi", "TP": ["Pm", "Pq"], "DH": "Nm"}, #R8
119 {"EP": "Pp", "TP": ["Np", "Pq"], "DH": "Nm"}, #R9
120 {"EP": ["Pm", "Pq"], "TP": ["Pp", "Pq"], "DH": "Nm"}, #R10
121 {"EP": "Pq", "TP": ["Np", "Pq"], "DH": "Ng"}, #R11
122 {"EP": "Ni", "TP": "Pp", "DH": "Ce"}, #R12
123 {"EP": "Ni", "TP": "Np", "DH": "Pp"}, #R13
124 {"EP": "Pi", "TP": "Np", "DH": "Ce"}, #R14
125 {"EP": "Pi", "TP": "Pp", "DH": "Np"}, #R15
126 {"EP": ["Ng", "Np"], "TP": ["Pm", "Pq"], "DH": "Pq"}, #R16
127 {"EP": ["Pp", "Pq"], "TP": ["Ng", "Nm"], "DH": "Ng"}, #R17
128 ]
129
130
131 # =====
132 # === MONITOREO DE PERTINENCIA
133 # =====
134
135 mu_ep_test = trapmf(1.0, *c_difusos["Pq"])
136 print("mu(1.0 in Pq):", mu_ep_test)
137
138 mu_tp_test = trapmf(1.0, *de_a("Np", "Pq"))
139 print("mu(1.0 in Np/Pq):", mu_tp_test)
140
141
142 # =====
143 # === MOTOR DE INFERENCIA
144 # =====
145
146 def evaluar_regla(ep_val, tp_val, regla, x_dh):
147     ep_set = de_a(*regla["EP"]) if isinstance(regla["EP"], list)
148         else c_difusos[regla["EP"]] # Obtener el conjunto difuso
149             de EP (Error de Presión)
150     tp_set = de_a(*regla["TP"]) if isinstance(regla["TP"], list)
151         else c_difusos[regla["TP"]] # Obtener el conjunto difuso
152             de TP (Tasa de Cambio de la Presión)
153     u_ep = trapmf(ep_val, *ep_set) # Evaluar el grado de
154         pertenencia del valor actual de EP al conjunto difuso
155             correspondiente
156     u_tp = trapmf(tp_val, *tp_set) # Evaluar el grado de
157         pertenencia del valor actual de TP al conjunto difuso
158             correspondiente
159     activacion = min(u_ep, u_tp) # Determinar la activación de la
160         regla como el mínimo entre u_ep y u_tp (operador AND
161             difuso)
162     u_dh = trapmf(x_dh, *c_difusos[regla["DH"]]) # Obtener la
163         función de pertenencia del consecuente (salida H)
164     return np.fmin(activacion, u_dh) # Recortar la función de
165         salida aplicando el nivel de activación (implicación tipo
166             Mamdani)

```

```

154
155 def inferencia_cld(ep_val, tp_val, reglas, x_dh, metodo=
156     seleccionar_metodo):
157     u_salida_total = np.zeros_like(x_dh)
158     for regla in reglas:
159         u_recortada = evaluar_regla(ep_val, tp_val, regla, x_dh)
160         u_salida_total = np.fmax(u_salida_total, u_recortada)
161     return desdifusificar(x_dh, u_salida_total, metodo),
162             u_salida_total
163
164 # =====
165 # === CREAR MAPA
166 # =====
167
168 # Definiciones
169 etiquetas_EP = ["Ng", "Nm", "Np", "Ni", "Ce", "Pi", "Pp", "Pm", "Pq"]
170 etiquetas_TP = ["Ng", "Nm", "Np", "Ni", "Ce", "Pi", "Pp", "Pm", "Pq"]
171
172 mapa = np.full((len(etiquetas_EP), len(etiquetas_TP)), "", dtype=
173                 object)
174
175 for i, ep in enumerate(etiquetas_EP):
176     for j, tp in enumerate(etiquetas_TP):
177         salidas = []
178         for regla in reglas_difusas:
179             ep_match = ep in regla["EP"] if isinstance(regla["EP"],
180                 list) else ep == regla["EP"]
181             tp_match = tp in regla["TP"] if isinstance(regla["TP"],
182                 list) else tp == regla["TP"]
183             if ep_match and tp_match:
184                 salidas.append(regla["DH"])
185         mapa[i, j] = "/".join(salidas) if salidas else "-"
186
187 # Visualización del mapa de reglas simbólico bonito
188 fig, ax = plt.subplots(figsize=(10, 8))
189 ax.set_xticks(np.arange(len(etiquetas_TP)))
190 ax.set_yticks(np.arange(len(etiquetas_EP)))
191 ax.set_xticklabels(etiquetas_TP, fontsize=9, rotation=45, ha="right")
192 ax.set_yticklabels(etiquetas_EP, fontsize=9)
193
194 # Fondo de colores por cantidad de reglas activadas
195 cantidad_reglas = np.vectorize(lambda x: x.count("/") + 1 if x !=
196     "-" else 0)(mapa).astype(int)
197 cmap = plt.cm.viridis
198 im = ax.imshow(cantidad_reglas, cmap=cmap)
199
200 # Asignación y Mostrar etiquetas
201 for i in range(len(etiquetas_EP)):

```

```

196     for j in range(len(etiquetas_TP)):
197         text = mapa[i, j]
198         color = "white" if cantidad_reglas[i, j] >= 2 else "black"
199         ax.text(j, i, text, ha="center", va="center", fontsize=8,
200                 color=color)
201
202 # Títulos y leyenda
203 ax.set_xlabel("TP (Tasa de Cambio)", fontsize=11)
204 ax.set_ylabel("EP (Error de Presión)", fontsize=11)
205 ax.set_title("Mapa de Reglas Difusas EP x TP DH", fontsize=13)
206 cbar = fig.colorbar(im, ax=ax)
207 cbar.set_label("Cantidad de Reglas Activadas", fontsize=10)
208
209 plt.tight_layout()
210 plt.show()
211
212 # =====
213 # === SIMULACIÓN CORREGIDA
214 # =====
215 P_hist, EP_hist, TP_hist, DH_hist = [P_0], [], [], []
216
217 print(f"{'Iter':<5} {'P(t)':>8} {'EP':>8} {'TP':>8} {'EP_norm':>10} {'TP_norm':>10} {'dH':>8} {'P(t+1)':>10}")
218 print("=" * 70)
219 resultados = {}
220
221 for t in range(ITE):
222     P_actual = P_hist[-1]
223     EP_t = P_actual - PO # EP(t) = P(t) - PO
224     print(f"error de presion = {EP_t:.2f}")
225     # Cálculo correcto de TP(t)
226     if t == 0:
227         EP_prev = 0 # asumimos EP(t-1) = 0
228         TP_t = EP_t - EP_prev
229     else:
230         TP_t = EP_t - EP_hist[-1]
231         print(f"tasa de cambio = {TP_t:.2f}")
232
233     # Normalización
234     ep_norm = np.clip(EP_t / 12, -1, 1)
235     tp_norm = np.clip(TP_t / 12, -1, 1)
236
237     # Inicializar matriz de activación real
238     if t == 0:
239         activaciones_reales = []
240         activaciones_t = []
241
242         activaciones_t = []
243

```

```

244     for regla in reglas_difusas:
245         ep_set = de_a(*regla["EP"]) if isinstance(regla["EP"], 
246             list) else c_difusos[regla["EP"]]
247         tp_set = de_a(*regla["TP"]) if isinstance(regla["TP"], 
248             list) else c_difusos[regla["TP"]]
249         u_ep = trapmf(ep_norm, *ep_set)
250         u_tp = trapmf(tp_norm, *tp_set)
251         activaciones_t.append(min(u_ep, u_tp))
252
253     # Condición inicial para DP(t-1)
254     if t == 0:
255         DP_prev = 0
256     else:
257         DP_prev = P_hist[-1] - P_hist[-2]
258
259     # Inferencia y evolución de la planta
260     DH_t, _ = inferencia_cld(ep_norm, tp_norm, reglas_difusas,
261         x_dh, metodo=seleccionar_metodo)
262     DH_t1 = DH_t * 12 # donde DH_t normalizado y DH_t1 real
263     DP_t = K * DH_t1 + c * DP_prev
264     P_next = P_actual + DP_t
265
266     # Registro
267     EP_hist.append(EP_t)
268     TP_hist.append(TP_t)
269     DH_hist.append(DH_t)
270     P_hist.append(P_next)
271
272     # Output de seguimiento
273     print(f"\n{t}<5} {P_actual:>8.2f} {EP_t:>8.2f} {TP_t:>8.2f} {
274         ep_norm:>10.2f} {tp_norm:>10.2f} {DH_t:>8.2f} {P_next:>10.2
275         f}")
```

276

277 # =====

278 # === MÉTRICAS DE ERROR

279 # =====

280

281 MAE = np.mean(np.abs(np.array(P_hist[:-1]) - P0))

282 MSE = np.mean((np.array(P_hist[:-1]) - P0)**2)

283 print("\n== Métricas de desempeño ==")

284 print(f"MAE (Error Absoluto Medio): {MAE:.2f}")

285 print(f"MSE (Error Cuadrático Medio): {MSE:.2f}")

286 # =====

287 # === VISUALIZACIÓN

288 # =====

```

290
291 plt.figure(figsize=(12, 6))
292
293 # Presión
294 plt.subplot(2, 1, 1)
295 plt.plot(P_hist, label="Presión (P)")
296 plt.axhline(P0, color='r', linestyle='--', label=f"Presión
297     Objetivo (P0 = {P0})")
298 plt.text(len(P_hist)-1, P0+2, f'P0 = {P0}', color='r')
299 plt.ylabel("Presión")
300 plt.title(f"Presión vs Iteraciones | MAE={MAE:.2f} | MSE={MSE:.2f
301     }")
302 plt.legend()
303 plt.grid()
304
305 # Calor aplicado
306 plt.subplot(2, 1, 2)
307 plt.plot(DH_hist, label="H aplicado", color='orange')
308 plt.xlabel("Iteraciones")
309 plt.ylabel("H (calor aplicado)")
310 plt.title("Calor aplicado vs Iteraciones")
311 plt.legend()
312 plt.grid()
313
314 plt.tight_layout()
315 plt.show()
316
317 # === Mapa de reglas EP x TP ===
318 ep_vals = np.linspace(-1, 1, 41)
319 tp_vals = np.linspace(-1, 1, 41)
320 mapa = np.zeros((len(ep_vals), len(tp_vals)))
321
322 for i, ep in enumerate(ep_vals):
323     for j, tp in enumerate(tp_vals):
324         DH_val, _ = inferencia_cld(ep, tp, reglas_difusas, x_dh,
325             metodo=seleccionar_metodo)
326         mapa[i, j] = DH_val
327
328 plt.figure(figsize=(8, 6))
329 plt.imshow(mapa, extent=[-1, 1, -1, 1], origin='lower', aspect='
330     auto', cmap='coolwarm')
331 plt.colorbar(label='DH desfuzzificado')
332 plt.xlabel('TP (Tasa de Cambio del Error)')
333 plt.ylabel('EP (Error de Presión)')
334 plt.title('Mapa de Reglas EP x TP DH')
335 plt.grid(True)
336 plt.show()
337
338 # =====
339 # === MAPA DE REGLAS EP x TP
340 # =====

```

```

337
338 ep_vals = np.linspace(-1, 1, 41)
339 tp_vals = np.linspace(-1, 1, 41)
340 mapa_etiquetas = np.empty((len(ep_vals), len(tp_vals)), dtype=
341     object)
342 # Evaluar qué etiqueta (DH) se activa más en cada combinación de
343 # EP, TP
344 for i, ep in enumerate(ep_vals):
345     for j, tp in enumerate(tp_vals):
346         activaciones = []
347         etiquetas = []
348
349         for regla in reglas_difusas:
350             ep_set = de_a(*regla["EP"]) if isinstance(regla["EP"]
351                         ], list) else c_difusos[regla["EP"]]
352             tp_set = de_a(*regla["TP"]) if isinstance(regla["TP"]
353                         ], list) else c_difusos[regla["TP"]]
354
355             u_ep = trapmf(ep, *ep_set)
356             u_tp = trapmf(tp, *tp_set)
357             a = min(u_ep, u_tp)
358
359             activaciones.append(a)
360             etiquetas.append(regla["DH"])
361
362             if max(activaciones) == 0:
363                 mapa_etiquetas[i, j] = "--" # sin activación
364             else:
365                 idx_max = np.argmax(activaciones)
366                 mapa_etiquetas[i, j] = etiquetas[idx_max]
367
368 # =====
369 # === MAPA COLORIDO DE ETIQUETAS (MEJORADO)
370 # =====
371
372 etiquetas_unicas = sorted(set(label for row in mapa_etiquetas for
373     label in row))
374 etiqueta_a_idx = {label: idx for idx, label in enumerate(
375     etiquetas_unicas)}
376 mapa_numerico = np.vectorize(etiqueta_a_idx.get)(mapa_etiquetas)
377 colormap_base = plt.colormaps.get_cmap("tab20") # sin el segundo
378     argumento
379 colors = colormap_base(np.linspace(0, 1, len(etiquetas_unicas)))
380     # extraemos N colores
381 cmap = mcolors.ListedColormap(colors)
382 fig, ax = plt.subplots(figsize=(10, 8))
383
384 # Mostrar el mapa (Y no se invierte ahora)
385 im = ax.imshow(

```

```

380     mapa_numerico,
381     cmap=cmap,
382     extent=[-1, 1, -1, 1],
383     origin="lower", # Ahora EP = -1 está abajo y EP = 1 arriba
384     aspect='auto',
385     interpolation='nearest'
386 )
387
388 # Ticks y etiquetas
389 ax.set_xticks(np.linspace(-1, 1, 5))
390 ax.set_yticks(np.linspace(-1, 1, 5))
391 ax.set_xlabel("TP (Tasa de cambio)")
392 ax.set_ylabel("EP (Error de presión)")
393 ax.set_title("Mapa de Reglas EP x TP (etiquetas de H)")
394
395 # Superponer etiquetas DH en cada celda
396 for i, ep in enumerate(ep_vals):
397     for j, tp in enumerate(tp_vals):
398         dh = mapa_etiquetas[i, j]
399         if dh != "-":
400             ax.text(tp, ep, dh, ha='center', va='center',
401                     fontsize=6, color='black')
402
403 # Barra de color con etiquetas DH
404 cbar = plt.colorbar(im, ticks=range(len(etiquetas_unicas)))
405 cbar.ax.set_yticklabels(etiquetas_unicas)
406 cbar.set_label("Etiqueta de salida DH (DH)")
407
408 # Superponer trayectoria real
409 ep_tray = [np.clip(ep / 12, -1, 1) for ep in EP_hist]
410 tp_tray = [np.clip(tp / 12, -1, 1) for tp in TP_hist]
411
412 ax.plot(tp_tray, ep_tray, 'w.-', label='Trayectoria', linewidth=1, markersize=4)
413 ax.legend()
414
415 plt.grid(False)
416 plt.tight_layout()
417 plt.show()
418
419 # ===== MINI TEST PARA ENTENDER LA ACTIVACIÓN DE REGLAS
420 # =====
421 ep_test = 1.0
422 tp_test = 1.0
423
424 for idx, regla in enumerate(reglas_difusas):
425     ep_set = de_a(*regla["EP"]) if isinstance(regla["EP"], list)
426         else c_difusos[regla["EP"]]
427     tp_set = de_a(*regla["TP"]) if isinstance(regla["TP"], list)
428         else c_difusos[regla["TP"]]

```

```

427     u_ep = trapmf(ep_test, *ep_set)
428     u_tp = trapmf(tp_test, *tp_set)
429     a = min(u_ep, u_tp)
430     print(f"[{idx}] EP: {regla['EP']}, TP: {regla['TP']} } -> mu_ep
431         ={u_ep:.3f}, mu_tp={u_tp:.3f}, activacion={a:.3f}")
432
433 # =====
434 # === MOSTRAR LAS REGLAS ACTIVAS EN LA ITERACIÓN
435 # =====
436
437 activaciones_reales = np.array(activaciones_reales)
438 plt.figure(figsize=(12, 6))
439 plt.imshow(activaciones_reales.T, aspect='auto', cmap='YlGnBu',
440             interpolation='nearest')
441 plt.colorbar(label="Nivel de activación")
442 plt.xlabel("Iteración")
443 plt.ylabel("Regla")
444 plt.title("Secuencia real de Disparo de Reglas por Iteración")
445 plt.yticks(ticks=np.arange(n_reglas), labels=[f"R{i+1}" for i in
446             range(n_reglas)])
447 plt.grid(False)
448 plt.tight_layout()
449 plt.show()

```