control lingüístico difuso de un loop de convección natural caótico

germán theler[1,2]
theler@ib.cnea.gov.ar

eugenio urdapilleta[1,3,4]
urdapile@ib.cnea.gov.ar

fabián j. bonetto[1,2,4]
bonetto@cab.cnea.gov.ar

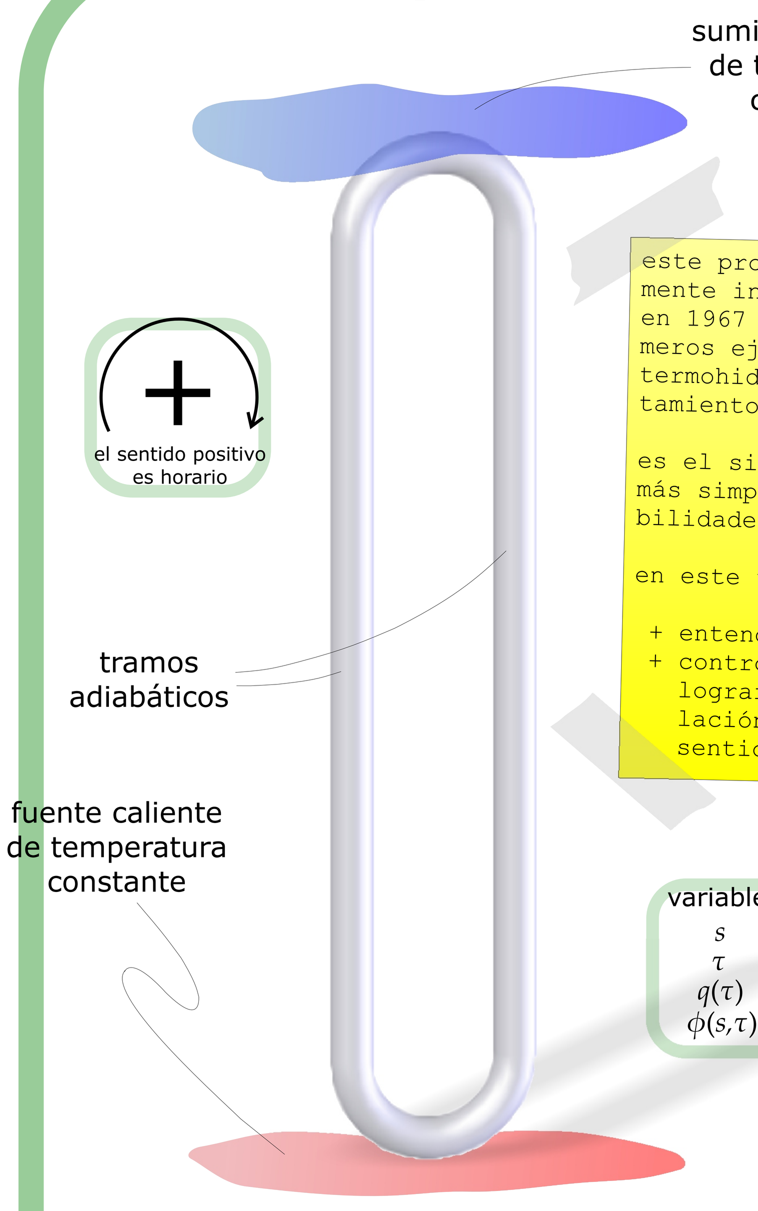
[1]instituto balseiro, uncu-cnea
[2]laboratorio de cavitación y biotecnología, cab-cnea
[3]departamento de física estadística e interdisciplinaria, cab-cnea
[4]conicet

octubre 2007

resumen

Los lazos termofluidodinámicos de convección natural están cobrando especial importancia en el diseño de reactores nucleares avanzados, debido a la tendencia actual a utilizar sólo sistemas de control y seguridad completamente pasivos. Una gran parte de los reactores de cuarta generación se basa en sistemas de transporte por convección natural. Es por eso que existe interés en caracterizar por un lado y controlar por otro, los fenómenos de la mecánica de fluidos acoplados con la transferencia de calor en este tipo de circuitos termohidráulicos. En general, para que se establezca un flujo debido a la convección natural es necesario que uno o más parámetros —por ejemplo, el número de Rayleigh— exceda un cierto umbral, punto en el cual ocurre una bifurcación de tipo pitchfork y la solución trivial estacionaria pierde su estabilidad. Existen bifurcaciones adicionales en las que la solución estacionaria de caudal constante también deja de ser estable y el sistema adquiere un complejo comportamiento aperiódico. En este trabajo implementamos un controlador basado en lógica difusa y reglas lingüísticas sobre un sencillo sistema termofluidodinámico de una sola fase conocido como el problema de Welander, que es el sistema más simple que conserva el fenómeno de inestabilidad buscado. Logramos alcanzar un caudal determinado y estable que, en ausencia de control externo, presentaría características caóticas.

el problema



este problema fue originalmente introducido por Welander en 1967 como uno de los primeros ejemplos de sistemas termohidráulicos con comportamiento no periódico.

es el sistema de una sola fase más simple que presenta inestabilidades caóticas.

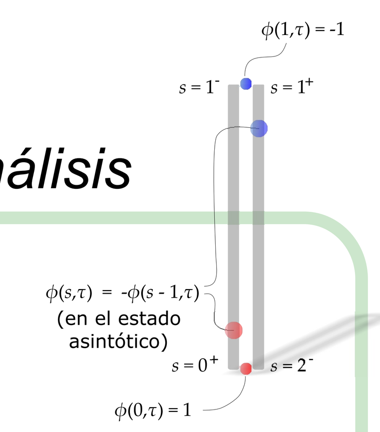
en este trabajo buscamos

+ entender su dinámica
+ controlar las oscilaciones: lograr un caudal de circulación estable y con un sentido dado

variables del problema adimensional

s	coordenada axial
τ	tiempo
$q(\tau)$	caudal de circulación
$\phi(s,\tau)$	temperatura

consideraciones para el análisis



- flujo unidimensional
- vale la aproximación de boussinesq
- la coordenada axial adimensionalizada es
  - $0 < s < 1$ en la pierna izquierda
  - $1 < s < 2$ en la pierna derecha
- el intercambio de calor se hace en una longitud diferencial pero con un coeficiente de transferencia $h \to \infty$ tal que la potencia intercambiada sea finita
- se puede demostrar que la distribución asintótica de temperaturas entre las dos piernas es antisimétrica con respecto al promedio de temperaturas de las fuentes

ecuaciones adimensionales

flujo de momento

por la propiedad de antisimetría tanto de la distribución de temperaturas como de la proyección de la gravedad en la dirección axial integramos sólo en una pierna

debido a la aproximación de boussinesq, la velocidad no depende de la coordenada axial sino sólo del tiempo

$$\frac{dq}{d\tau} = \alpha \int_0^1 \phi \, ds - \varepsilon q |q|^{\xi - 1}$$

derivada temporal del caudal de circulación — fuerza boyante neta — ley de fricción

conservación de energía

$$\frac{\partial \phi}{\partial \tau} + q \frac{\partial \phi}{\partial s} = 0$$

término temporal — término convectivo

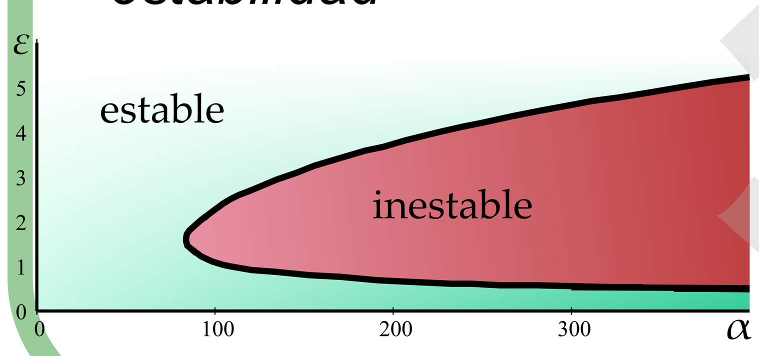
las piernas son adiabáticas, pero la transferencia de calor con las fuentes se escriben como condiciones de contorno teniendo en cuenta la antisimetría

$$\phi(0^+,\tau) + \phi(1^-,\tau) = \begin{cases} \left[1 + \phi(1^-,\tau)\right] \cdot \left[1 - \exp(-1/|q|)\right] & \text{para } q \geq 0 \\ \left[-1 + \phi(0^+,\tau)\right] \cdot \left[1 - \exp(-1/|q|)\right] & \text{para } q < 0 \end{cases}$$

parámetros adimensionales

- α proporcional a la diferencia de temperaturas entre las fuentes y al coeficiente de expansión isobárico
- ε representa las condiciones de fricción de la geometría
- ξ exponente del número de Re en la ley de fricción + 1

estabilidad

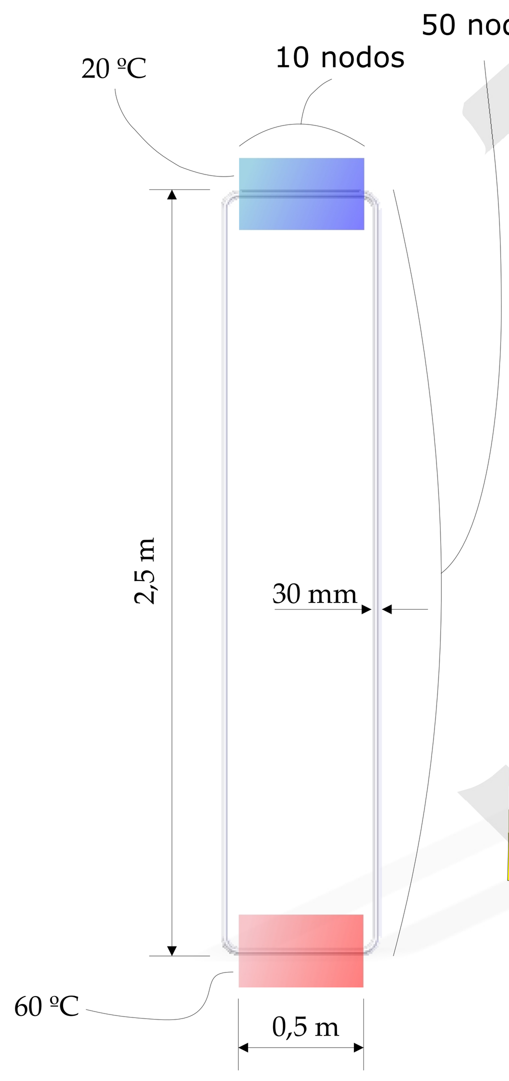


la estabilidad de la solución estacionaria, para ξ fijo, depende de los parámetros α y ε. Para α grande, el problema es **inestable**.

para $\xi = 1.75$ (ley de blasius) obtenemos este mapa de estabilidad

el caos

estudio numérico



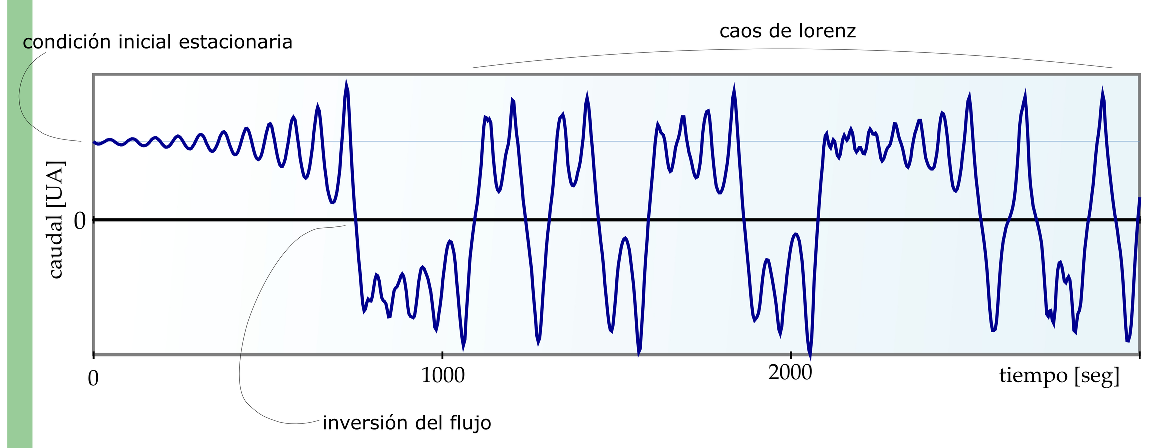
detalles de la implementación numérica

- ley de fricción de blasius
  $f = 0{,}075\,\mathrm{Re}^{-0{,}25}$
- coeficiente de transferencia térmica con las fuentes constante
  $h = 1000\ \mathrm{W\,m^{-2}\,K^{-1}}$
- resolvemos la ecuación de energía completa a lo largo del loop, sin utilizar la propiedad de antisimetría
- estamos buscando inestabilidades intencionalmente, por lo que el esquema numérico más simple que reproduzca la fenomenología que queremos observar será suficiente:
  + integral en la ecuación de momento: método de trapecios
  + ecuación de momento: esquema euler explícito
  + ecuación de energía: esquema warming-beam upwind explícito de segundo orden

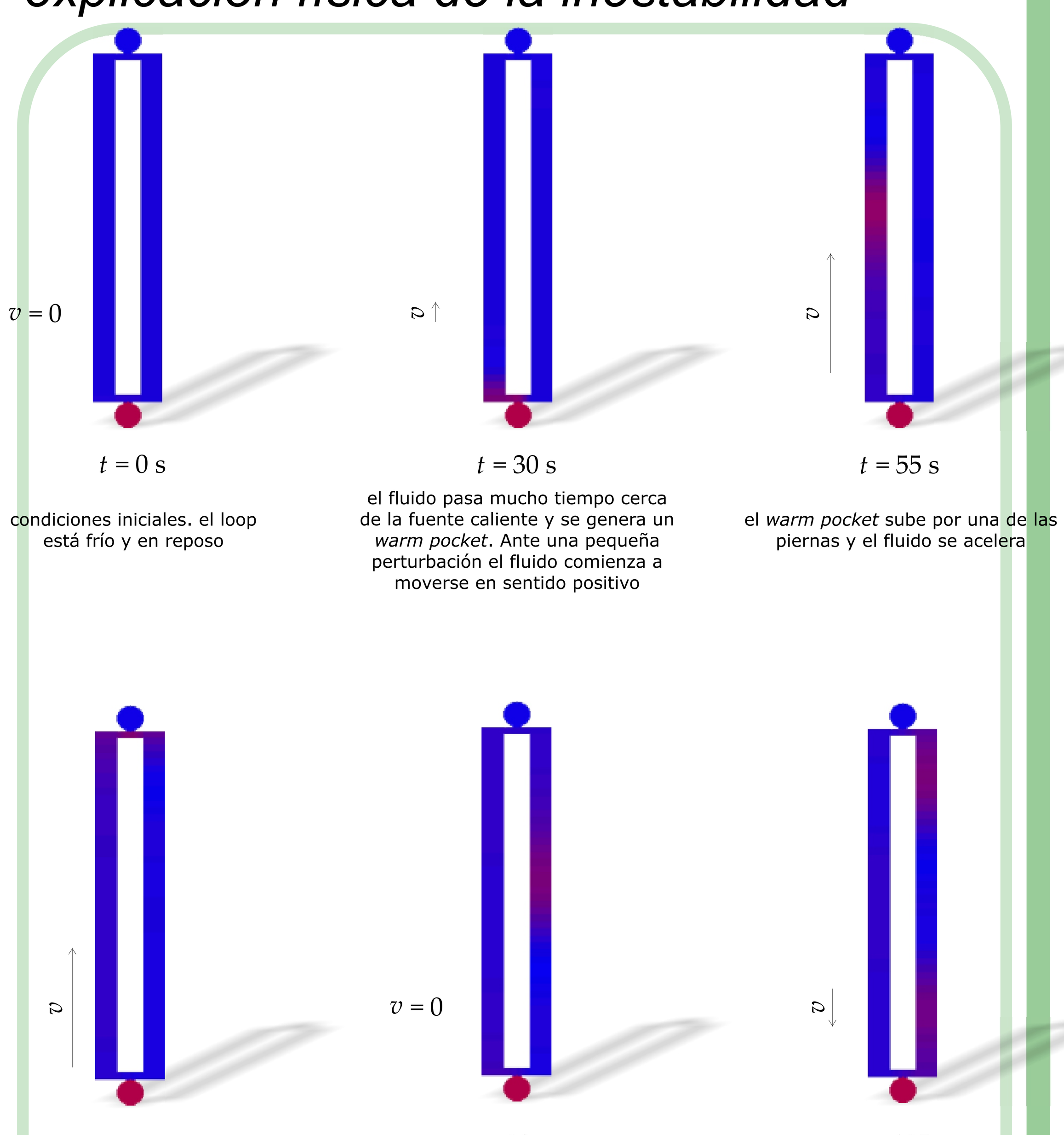
parámetros resultantes

$\alpha = 700$
$\varepsilon = 3{,}21$
$\xi = 1{,}75$

inestabilidad de la solución estacionaria



explicación física de la inestabilidad



$t = 0$ s — condiciones iniciales. el loop está frío y en reposo

$t = 30$ s — el fluido pasa mucho tiempo cerca de la fuente caliente y se genera un *warm pocket*. Ante una pequeña perturbación el fluido comienza a moverse en sentido positivo

$t = 55$ s — el *warm pocket* sube por una de las piernas y el fluido se acelera

$t = 65$ s — cuando el *warm pocket* pasa por la fuente fría, la velocidad es grande y llega a la otra pierna casi sin enfriarse

$t = 80$ s — el fluido se desacelera hasta detenerse. Dado que la velocidad es pequeña, se genera otro *warm pocket*

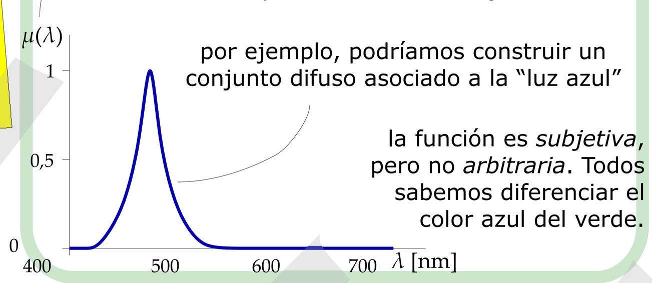
$t = 105$ s — el warm pocket asciende por la pierna opuesta y el flujo se invierte. El proceso continúa con dos warm pockets y con la posibilidad de generar ahora *cold pockets*

la herramienta

lógica difusa

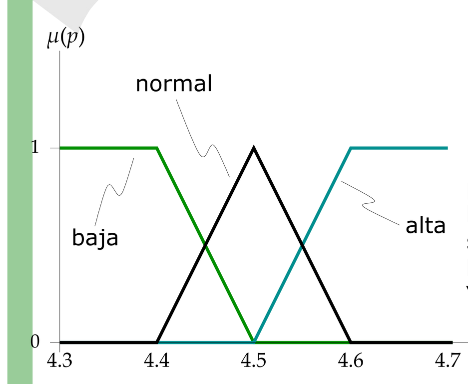
es una teoría matemática para tratar problemas expresados en forma lingüística tales como "presión alta" o "baja temperatura". La idea central es el **conjunto difuso.**

una función de membresía da la *certeza* de que un elemento *pertenezca* a un conjunto difuso



por ejemplo, podríamos construir un conjunto difuso asociado a la "luz azul"

la función es *subjetiva*, pero no *arbitraria*. Todos sabemos diferenciar el color azul del verde.

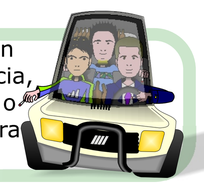


podemos asignar al valor lingüístico "presión a la salida del GV de Atucha I" los valores lingüísticos "baja", "normal" y "alta"

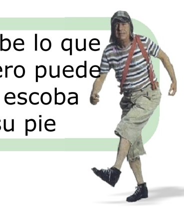
existen operaciones y relaciones matemáticamente con las funciones de membresía de las diferentes variables lingüísticas que intervienen en un problema.

reglas lingüísticas

no hace falta pensar en funciones de transferencia, ciclos termodinámicos o vínculos holónomos para conducir un auto



el chavo no sabe lo que es una ODE pero puede balancear una escoba invertida con su pie



tácitamente usamos reglas lingüísticas de causa y efecto en la vida diaria...

- si tengo hambre me como un chorizo
- si la mina es muy linda me olvido el intento con otra
- si estoy llegando a la esquina piso un poco el freno

...y a veces las usamos en situaciones técnicas y en la propia ingeniería de control...

- si la potencia es baja hay que sacar un poco las barras de control
- si la temperatura del refrigerante es alta, hacer un scram
- si el nivel del presurizador es alto y aumenta la presión en la contención, la válvula de alivio está abierta → three mile island!

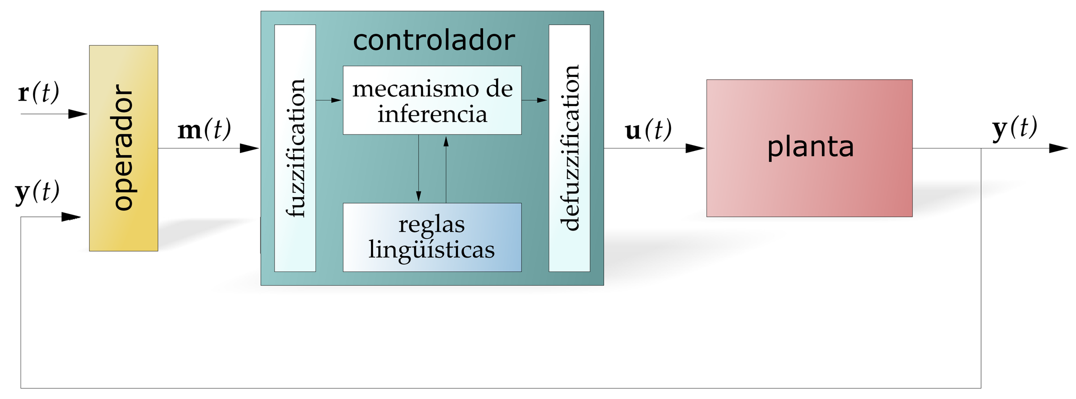
forma semántica de las reglas

premisa — consecuencia

$$\textbf{IF } m_1 \textbf{ IS } A \textbf{ AND } \cdots \textbf{ AND } m_n \textbf{ IS } B \textbf{ THEN } u_i \textbf{ IS } C$$

variable lingüística — cláusula 1 — conjunto difuso — variable lingüística — cláusula n — conjunto difuso — variable lingüística — conjunto difuso

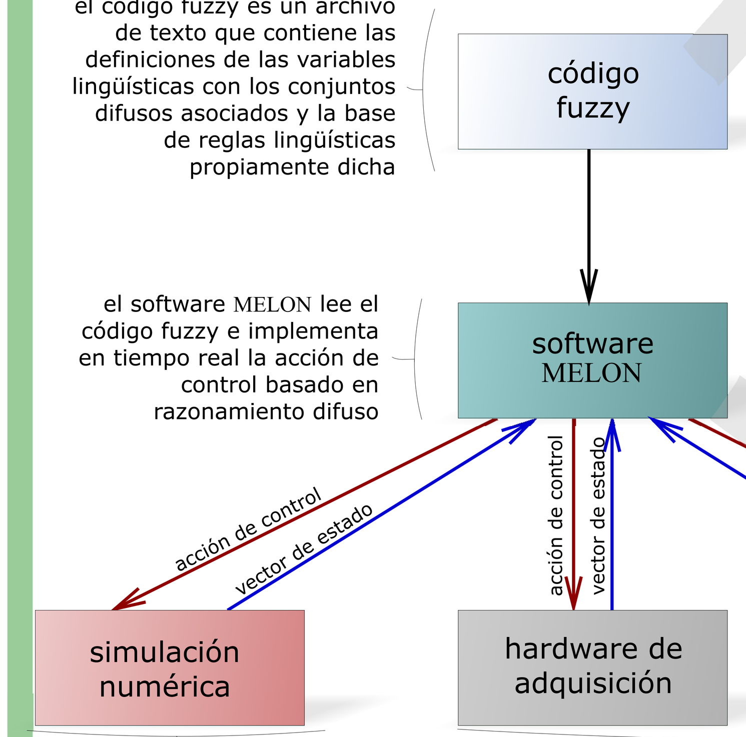
el controlador lingüístico difuso



la implementación computacional

el código fuzzy es un archivo de texto que contiene las definiciones de las variables lingüísticas con los conjuntos difusos asociados y la base de reglas lingüísticas propiamente dicha

el software MELON lee el código fuzzy e implementa en tiempo real la acción de control basado en razonamiento difuso



ejemplo de código fuzzy

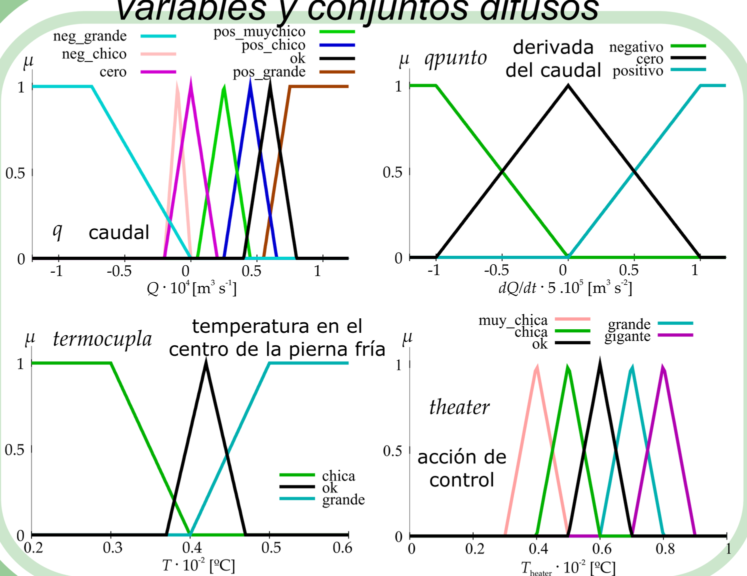
```
# controlador proporcional para cinetica puntual
# version shared memory
# 05-02-2007

# frecuencia de muestreo, en hertz
SAMPLING FREQUENCY    200

INTERSECTION   MINIMUN
DEFUZZIFICATION CAV

VAR error INPUT IPC_SHARED 1285 GAIN 0.25
VAR rho OUTPUT IPC_SHARED 1286 GAIN 150e-5

LIMIT RATE ABSOLUTE rho 20e-5

VALUE negativo error   TRIANGULAR_MIN -1    1
VALUE cero     error   TRIANGULAR      0    1
VALUE positivo error   TRIANGULAR_MAX  1    1

VALUE negativa rho     TRIANGULAR     -1    1
VALUE cero     rho     TRIANGULAR      0    1
VALUE positiva rho     TRIANGULAR      1    1

IF error IS negativo THEN rho IS positiva
IF error IS cero THEN rho IS cero
IF error IS positivo THEN rho IS negativa
```

un proceso independiente realiza la integración numérica de las ecuaciones diferenciales del problema. MELON lee el estado de la planta y envía la acción de control sobre la temperatura T_{heater} de la fuente caliente mediante un recurso de shared memory

eventualmente, el software MELON puede implementar su acción de control a un dispositivo real externo a través de una placa de adquisición y control o simplemente utilizando el puerto paralelo estándar

la solución

variables y conjuntos difusos



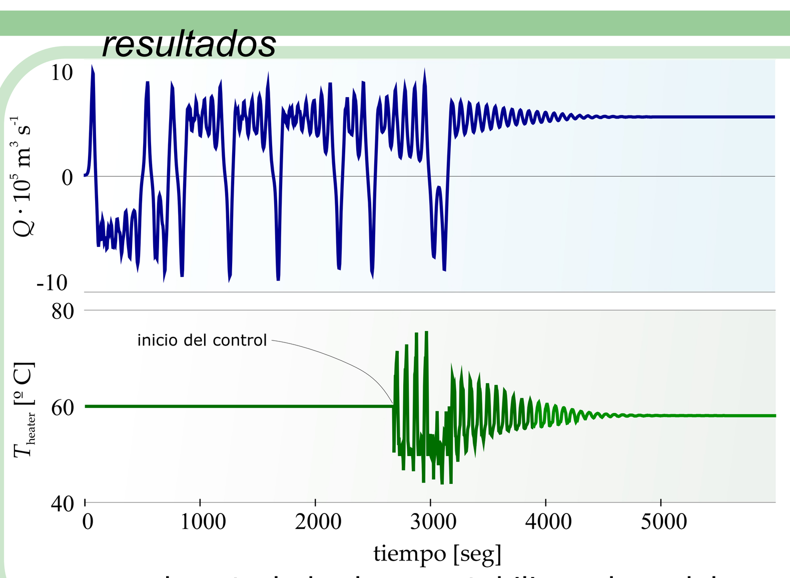
IF q **IS** neg_grande **AND** *termocupla* **IS** chica **THEN** *theater* **IS** grande — inestabiliza la solución negativa

IF q **IS** neg_grande **AND** *qpunto* **IS** negativo **THEN** *theater* **IS** muy_chica
IF q **IS** neg_grande **AND** *qpunto* **IS** cero **THEN** *theater* **IS** muy_chica
IF q **IS** neg_grande **AND** *qpunto* **IS** positivo **THEN** *theater* **IS** chica
— intenta invertir el sentido del flujo

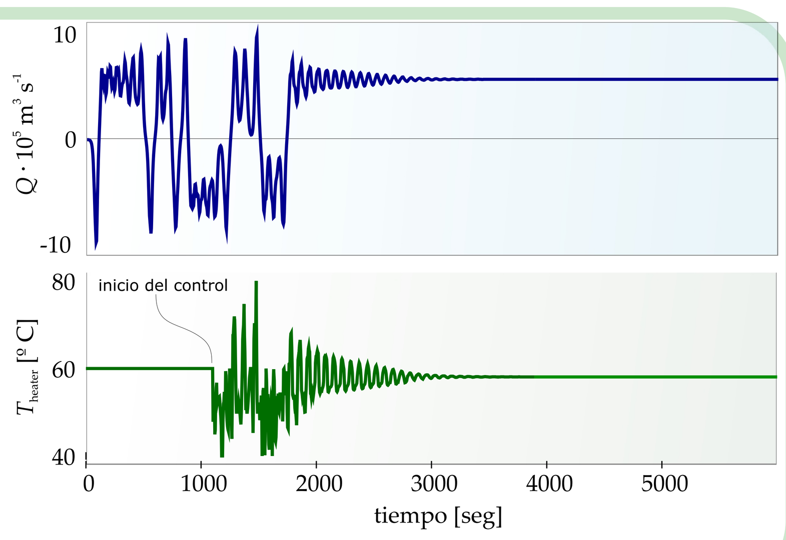
IF q **IS** neg_chico **AND** *qpunto* **IS** negativo **THEN** *theater* **IS** muy_chica
IF q **IS** neg_chico **AND** *qpunto* **IS** cero **THEN** *theater* **IS** chica
IF q **IS** neg_chico **AND** *qpunto* **IS** positivo **THEN** *theater* **IS** chica
IF q **IS** cero **AND** *qpunto* **IS** negativo **THEN** *theater* **IS** chica
IF q **IS** cero **AND** *qpunto* **IS** cero **THEN** *theater* **IS** ok
IF q **IS** cero **AND** *qpunto* **IS** positivo **THEN** *theater* **IS** ok
IF q **IS** pos_muychico **THEN** *theater* **IS** chica
— evita la generación en exceso de warm pockets

IF q **IS** pos_chico **AND** *qpunto* **IS** negativo **THEN** *theater* **IS** chica
IF q **IS** pos_chico **AND** *qpunto* **IS** cero **THEN** *theater* **IS** chica
IF q **IS** pos_chico **AND** *qpunto* **IS** positivo **THEN** *theater* **IS** muy_chica
IF q **IS** ok **AND** *termocupla* IS ok **THEN** *theater* **IS** ok
IF q **IS** ok **AND** *qpunto* **IS** negativo **THEN** *theater* **IS** chica
IF q **IS** ok **AND** *qpunto* **IS** cero **THEN** *theater* **IS** ok
IF q **IS** ok **AND** *qpunto* **IS** positivo **THEN** *theater* **IS** grande
IF q **IS** pos_grande **AND** *qpunto* **IS** negativo **THEN** *theater* **IS** gigante
IF q **IS** pos_grande **AND** *qpunto* **IS** cero **THEN** *theater* **IS** grande
IF q **IS** pos_grande **AND** *qpunto* **IS** positivo **THEN** *theater* **IS** grande
— estabiliza la solución positiva

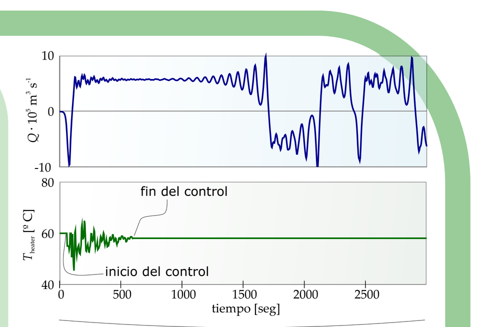
resultados



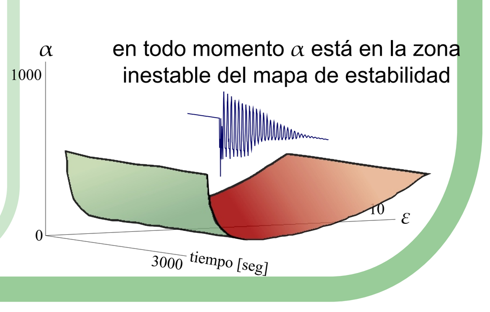
el controlador logra estabilizar el caudal en un valor positivo dado...



...para cualquier condición inicial



el control es realmente necesario



en todo momento α está en la zona inestable del mapa de estabilidad

conclusiones

- los loops de conveción natural presentan un comportamiento caótico-inestable en cierta región del espacio de parámetros
- la lógica difusa provee una potente herramienta para atacar problemas de control altamente no-lineales, particularmente aquellos difíciles de tratar matemáticamente
- es posible controlar el caudal del problema de Welander en régimen caótico utilizando reglas lingüísticas y conocimiento cualitativo del sistema
- el controlador propuesto logra establecer un caudal estacionario dado en módulo y dirección, actuando sobre la temperatura de la fuente caliente

referencias

J. C. Ferreri and W. Ambrosini. Stability analysis of single-phase thermosyphon loops by finite-difference numerical methods. *Nuclear Engineering and Design*, 201:11-23, 2000

J. C. Ferreri and W. Ambrosini. On the analysis of thermal-fluid-dynamic instabilities via numerical discretization of conservation equations. *Nuclear Engineering and Design*, 215:153-170, 2002

J. C. Ferreri and W. Ambrosini. The effect of truncation error on the numerical prediction on linear stability boundaries in a natural circulation single-phase loop. *Nuclear Engineering and Design*, 183:53-76, 1998

Chuen Chien Lee. Fuzzy logic in control systems: fuzzy logic controller - Part I. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, 20(2):04-419, 1990

Chuen Chien Lee. Fuzzy logic in control systems: fuzzy logic controller - Part II. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, 20(2):419-435, 1990

Edward Lorenz. Deterministic non-periodic flow. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 20(2):130-141, 1963

Germán Theler. Controladores basados en lógica difusa y loops de convección natural caóticos. *Proyecto Integrador de la Carrera de Ingeniería Nuclear. Instituto Balseiro*, 2007.

Pierre Welander. On the oscillatory instability of a differentially heated fluid loop.*Journal of Fluid Mechanics*, 29(1):17-30, 1967

Lofti A. Zadeh. Fuzzy Sets. *Information and Control*, 8:338-353, 1965