

# FUZZY-LOGIC ADAPTIVE CRUISE CONTROL

AUTOR: José Luis Calvo Subirá.

## INTRODUCCIÓN

El control de crucero adaptativo (adaptive cruise control, ACC) se usa en vehículos con el objetivo de autonomizar determinados aspectos de la conducción bajo ciertas condiciones. Estos sistemas confían en la información que los radares y otras herramientas de medición proporcionan al sistema sobre la distancia al vehículo que circula por delante, así como la velocidad relativa. Tras procesar dicha información, el sistema ACC debe producir un valor de salida para la aceleración del vehículo, una aceleración negativa supone una acción de frenado, un valor nulo supone mantener la velocidad y un valor positivo supone incrementar la velocidad.

Modelar analíticamente un vehículo es bastante complejo, por lo que es interesante recurrir a técnicas de lógica difusa que permitan introducir en el sistema reglas de control con contenido lingüístico definidas por un experto.

En este trabajo se pretende diseñar un sistema inteligente que sea capaz de proporcionar valores de aceleración adecuados, dando lugar a una conducción autónoma en las situaciones en las que se puede encontrar un vehículo en movimiento. Evidentemente, existe un elevado número de condiciones que se deberían tener en cuenta para diseñar un ACC robusto que pudiese funcionar, por ejemplo, en una autopista, tales como los límites de velocidad, el estado de los neumáticos, el coeficiente de fricción con el suelo (luvia, nieve, etc) así como incluir la posibilidad de realizar adelantamientos. Sin embargo, esto supondría introducir dos dimensiones más al problema. Por consiguiente, se asumen las siguientes condiciones a lo largo del trabajo:

- Únicamente existe desplazamiento longitudinal
- No se consideran adelantamientos
- No existen límites de velocidad

## SISTEMA DE INFERENCIA BORROSA

El sistema inteligente diseñado se basa en las siguientes propiedades como valores de entrada:

- **Velocidad relativa**: diferencia de velocidades entre el vehículo controlado y el vehículo situado enfrente. En este modelo, la velocidad relativa puede oscilar entre los -100 km/h y los 100 km/h, y se representa mediante un conjunto borroso compuesto por un total de 5 elementos: -100, -50, 0, 50, 100 km/h. Si la velocidad es muy negativa, el vehículo se está acercando rápidamente, si es muy positiva, se está alejando rápidamente. De la misma forma, si la velocidad relativa es cero, ambos vehículos circulan a la misma velocidad.

Suponemos que a través de conocimiento experto se definen los siguientes conjuntos borrosos:

VELOCIDAD\_POSITIVA = { 0/-100km/h, 0/-50km/h, 0.2/0, 0.9/50 km/h, 0.5/100 km/h }

VELOCIDAD\_MUY\_POSITIVA = { 0/-100km/h, 0/-50km/h, 0/0, 0.6/50 km/h, 1/100 km/h }

VELOCIDAD\_NULA = { 0.3/-100km/h, 0.5/-50km/h, 1/0, 0.4/50 km/h, 0/100 km/h }

VELOCIDAD\_MUY\_NEGATIVA = { 1/-100km/h, 0.4/-50km/h, 0/0, 0/50 km/h, 0/100 km/h }

- **Distancia:** es la distancia del vehículo con el objeto de delante. En este modelo, y de acuerdo con la literatura consultada, la máxima distancia medible es de 150 metros. De este modo, la distancia se representa mediante un conjunto borroso compuesto por los siguientes 5 elementos: <=30, 60, 90, 120, 150 metros. Se definen los siguientes conjuntos borrosos:

DISTANCIA\_CERCA = { 0.7/<=30m, 1/60m, 0.5/90m, 0.2/120m, 0/150m }

DISTANCIA\_MÁXIMA = { 0/<=30m, 0/60m, 0/90m, 0.4/120m, 1/150m }

DISTANCIA\_MÍNIMA = { 1/<=30m, 0.5/60m, 0/90m, 0/120m, 0/150m }

La **aceleración** que debe producir el vehículo es la variable de salida del sistema inteligente. Dicho conjunto borroso está formado por los siguientes elementos: -2.5, -1.25, 0, 1.25, 2.5 m/s<sup>2</sup>. Una aceleración negativa es equivalente a decir que el vehículo debe llevar cabo una acción de frenado.

FRENAR\_FUERTEMENTE = { 1/-2.5 m/s<sup>2</sup>, 0.2/-1.25 m/s<sup>2</sup>, 0/0 m/s<sup>2</sup>, 0/1.25 m/s<sup>2</sup>, 0/2.5 m/s<sup>2</sup> }

FRENAR\_SUAVEMENTE = { 0.5/-2.5 m/s<sup>2</sup>, 1/-1.25 m/s<sup>2</sup>, 0.3/0 m/s<sup>2</sup>, 0/1.25 m/s<sup>2</sup>, 0/2.5 m/s<sup>2</sup> }

A continuación, se introduce el conocimiento experto a través de las siguientes **reglas**:

- 1) Si la distancia es máxima y la velocidad relativa es positiva, entonces el vehículo debe acelerar (aceleración positiva).
- 2) Si la distancia es grande y la velocidad es muy positiva, entonces el vehículo debe acelerar fuertemente (aceleración muy positiva).
- 3) Si la distancia es mínima y la velocidad es muy negativa, entonces el vehículo debe frenar fuertemente (aceleración muy negativa).
- 4) Si la distancia es cerca y la velocidad relativa es nula, entonces el vehículo debe frenar (aceleración negativa).

El motor de inferencia utiliza los siguientes operadores:

- Mínimo como *T-norma*,
- Máximo como *T-conorma*,
- Regla *max-min* para la composición de relaciones borrosas.
- Función de implicación de **Kleene-Dienes**:  $I(a,b) = \max(1-a, b)$ .

## INFERENCIA BORROSA – MODUS PONENS GENERALIZADO

En un momento dado, el sistema ACC del vehículo obtiene a través de los sensores y radares una distancia de, por ejemplo, **55 metros** y calcula una velocidad relativa de **-70km/h**.

La distancia pertenece a los siguientes conjuntos borrosos DISTANCIA\_CERCA y DISTANCIA\_MÍNIMA, por lo que el conjunto borroso de este hecho puede suponerse de la siguiente forma:

$DISTANCIA_{55} = \{ 0.4/\leq 30m, 0.9/60m, 0.2/90m, 0/120m, 0/150m \}$

Por otra parte, la velocidad relativa calculada puede representarse mediante el siguiente conjunto borroso:

$VELOCIDAD\_NEGATIVA_{70} = \{ 0.8/-100km/h, 0.2/-50km/h, 0/0, 0/50 km/h, 0/100 km/h \}$

De esta forma, ambos hechos (distancia y velocidad relativa) están representados por sus respectivos conjuntos borrosos.

Las reglas que se disparan son la Regla 3 y la Regla 4 debido a la pertenencia de los valores de los hechos a los conjuntos borrosos de sus predicados. Para obtener el conjunto borroso de salida es preciso componer el hecho con cada una de las dos reglas.

### Regla 3

Incluye una T-norma que afecta a ambos conjuntos de entrada y una implicación entre ese resultado y el conjunto borroso de salida:

*Si la distancia es mínima y la velocidad es muy negativa, entonces el vehículo debe frenar fuertemente (aceleración muy negativa).*

#### 1) T-norma entre DISTANCIA\_MÍNIMA y VELOCIDAD\_MUY\_NEGATIVA

	-100	-50	0	50	100
$\leq 30$	1	0.4	0	0	0
60	0.5	0.4	0	0	0
90	0	0	0	0	0
120	0	0	0	0	0
150	0	0	0	0	0

Tabla 1.  $T(DISTANCIA\_MINIMA, VELOCIDAD\_MUY\_NEGATIVA)$

#### 2) Implicación $T(DISTANCIA\_MÍNIMA, VELOCIDAD\_MUY\_NEGATIVA)$ y FRENAR\_FUERTEMENTE

	-2.5	1.25	0	-1.25	2.5
30, -100	1	0.2	0	0	0
30, -50	1	0.6	0.6	0.6	0.6
30, 0	1	1	1	1	1
30, 50	1	1	1	1	1
30, 100	1	1	1	1	1
60, -100	1	0.5	0.5	0.5	0.5
60, -50	1	0.6	0.6	0.6	0.6
60, 0	1	1	1	1	1
60, 50	1	1	1	1	1
60, 100	1	1	1	1	1
90, -100	1	1	1	1	1
90, -50	1	1	1	1	1
90, 0	1	1	1	1	1
90, 50	1	1	1	1	1
90, 100	1	1	1	1	1
120, -100	1	1	1	1	1
120, -50	1	1	1	1	1
120, 0	1	1	1	1	1
120, 50	1	1	1	1	1
120, 100	1	1	1	1	1
150, -100	1	1	1	1	1
150, -50	1	1	1	1	1
150, 0	1	1	1	1	1
150, 50	1	1	1	1	1
150, 100	1	1	1	1	1

Tabla 2.  $I(T(DISTANCIA\_MÍNIMA, VELOCIDAD\_MUY\_NEGATIVA), FRENAR\_FUERTEMENTE)$

3) T-norma entre los hechos DISTANCIA\_55 y VELOCIDAD\_NEGATIVA\_70:

	-100	-50	0	50	100
<=30	0.4	0.2	0	0	0
60	0.8	0.2	0	0	0
90	0.2	0.2	0	0	0
120	0	0	0	0	0
150	0	0	0	0	0

Tabla 3.  $T(DISTANCIA\_55, VELOCIDAD\_NEGATIVA\_70)$

4) Componemos la Regla 3 con el hecho obtenido en el paso anterior. El conjunto borroso de salida obtenido es el que se presenta a continuación:

$SALIDA\_ACELERACIÓN\_R3 = \{ 0.8/-2.5 \text{ m/s}^2, 0.5/-1.25 \text{ m/s}^2, 0.5/0 \text{ m/s}^2, 0.5/1.25 \text{ m/s}^2, 0.5/2.5 \text{ m/s}^2 \}$

#### **Regla 4**

*Si la distancia es corta y la velocidad relativa es nula, entonces el vehículo debe frenar suavemente (aceleración negativa).*

1) T-norma entre DISTANCIA\_CERCA y VELOCIDAD\_NULA

	-100	-50	0	50	100
<=30	0.3	0.5	0.7	0.4	0
60	0.3	0.5	1	0.4	0
90	0.3	0.5	0.5	0.4	0
120	0.2	0.2	0.2	0.2	0
150	0	0	0	0	0

*Tabla 4. T(DISTANCIA\_CERCA, VELOCIDAD\_NULA)*

2) Implicación T(DISTANCIA\_CERCA, VELOCIDAD\_MUY\_NULA) y FRENAR\_FUERTEMENTE

	-2.5	-1.25	0	1.25	2.5
30, -100	0.7	1	0.7	0.7	0.7
30, -50	0.5	1	0.5	0.5	0.5
30, 0	0.5	1	0.3	0.3	0.3
30, 50	0.6	1	0.6	0.6	0.6
30, 100	1	1	1	1	1
60, -100	0.7	1	0.7	0.7	0.7
60, -50	0.5	1	0.5	0.5	0.5
60, 0	0.5	1	0.3	0	0
60, 50	0.6	1	0.6	0.6	0.6
60, 100	1	1	1	1	1
90, -100	0.7	1	0.7	0.7	0.7
90, -50	0.5	1	0.5	0.5	0.5
90, 0	0.5	1	0.5	0.5	0.5
90, 50	0.6	1	0.6	0.6	0.6
90, 100	1	1	1	1	1
120, -100	0.8	1	0.8	0.8	0.8
120, -50	0.8	1	0.8	0.8	0.8
120, 0	0.8	1	0.8	0.8	0.8
120, 50	0.8	1	0.8	0.8	0.8
120, 100	1	1	1	1	1
150, -100	1	1	1	1	1
150, -50	1	1	1	1	1
150, 0	1	1	1	1	1
150, 50	1	1	1	1	1
150, 100	1	1	1	1	1

*Tabla 5. I( T(DISTANCIA\_CERCA, VELOCIDAD\_MUY\_NULA), FRENAR\_FUERTEMENTE )*

- 3) Componemos la Regla 4 con el hecho calculado anteriormente. El conjunto borroso de salida obtenido es el que se presenta a continuación:

$$\text{SALIDA\_ACELERACIÓN\_R4} = \{ 0.7/-2.5 \text{ m/s}^2, 0.8/-1.25 \text{ m/s}^2, 0.7/0 \text{ m/s}^2, 0.7/1.25 \text{ m/s}^2, 0.7/2.5 \text{ m/s}^2 \}$$

Dados los dos conjuntos borrosos de salida tras la composición con cada una de las reglas, se calcula la T-norma entre ambos conjuntos:  $T(\text{SALIDA\_ACELERACIÓN\_R3}, \text{SALIDA\_ACELERACIÓN\_R4})$

$$\text{SALIDA\_ACELERACIÓN} = \{ 0.7/-2.5 \text{ m/s}^2, 0.5/-1.25 \text{ m/s}^2, 0.5/0 \text{ m/s}^2, 0.5/1.25 \text{ m/s}^2, 0.5/2.5 \text{ m/s}^2 \}$$

## CONTROLADOR BORROSO TIPO MAMDANI

### DISEÑO

En este apartado se presenta un sistema de inferencia tipo **Mamdani**. Tanto las variables de entrada (distancia y velocidad relativa) como la variable de salida (aceleración) se representan mediante números borrosos.

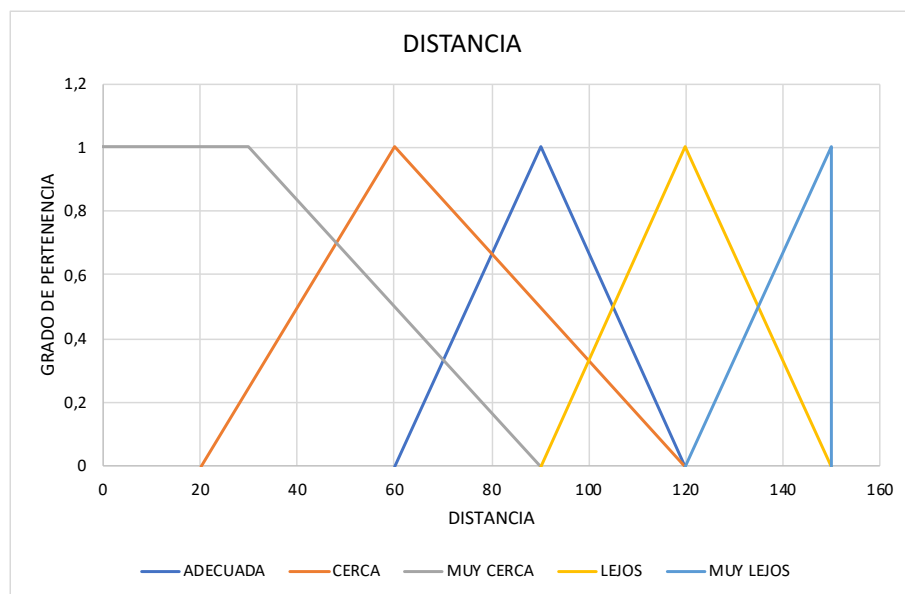


Ilustración 1. Term-set Distancia (m)

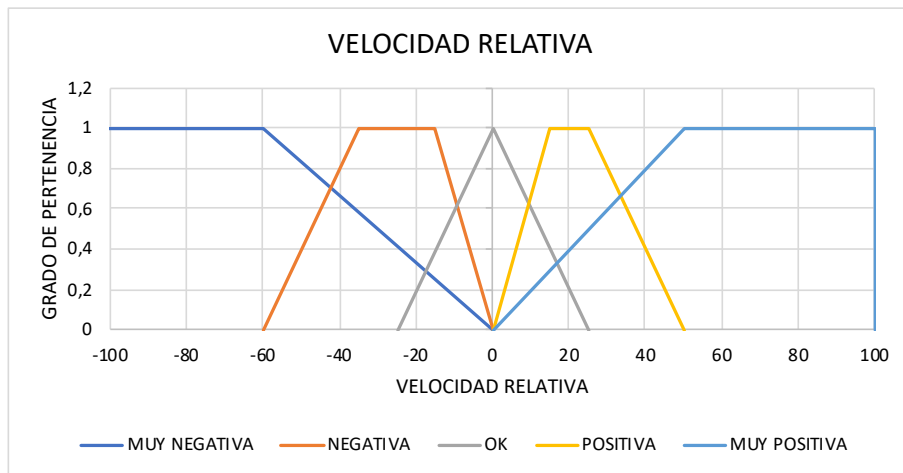


Ilustración 2. Term-set Velocidad Relativa (km/h)

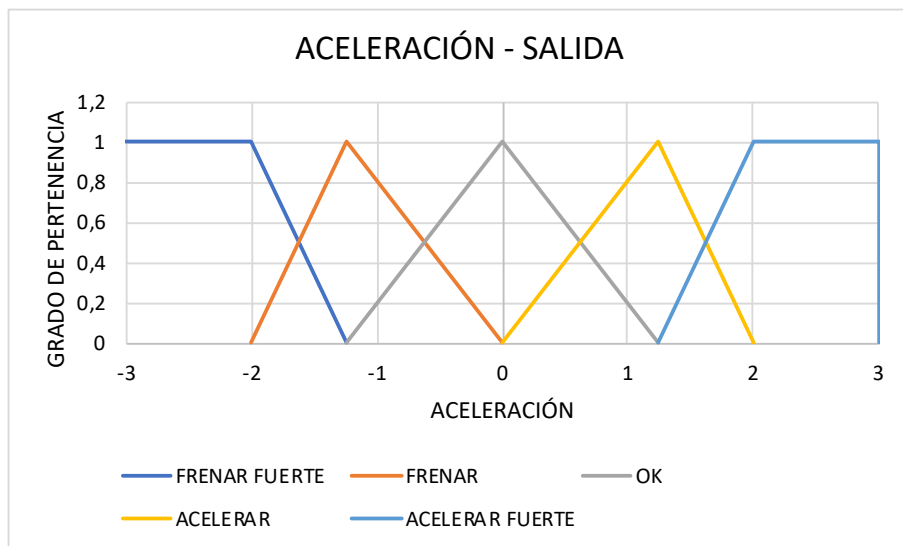


Ilustración 3. Term-set. Aceleración (m/s<sup>2</sup>)

La base de conocimiento del sistema estará compuesta por reglas similares a las usadas en el apartado anterior. No obstante, en este caso se definirán reglas para todas las combinaciones posibles de las variables de entrada.

Velocidad/Distancia	MUY CERCA	CERCA	ADECUADA	LEJOS	MUY LEJOS
MUY NEGATIVA	Frenar Fuerte (R1)	Frenar Fuerte (R6)	Frenar (R11)	Frenar (R16)	OK (R21)
NEGATIVA	Frenar Fuerte (R2)	Frenar Fuerte (R7)	Frenar (R12)	Frenar (R17)	OK (R22)
NULA	Frenar Fuerte (R3)	OK (R8)	OK (R13)	Acelerar (R18)	Acelerar (23)
POSITIVA	OK (R4)	Acelerar (R9)	Acelerar (R14)	Acelerar (R19)	Acelerar (24)
MUY POSITIVA	Acelerar (R5)	Acelerar (R10)	Acelerar Fuerte (R15)	Acelerar Fuerte (R20)	Acelerar Fuerte (25)

Tabla 6. Reglas de la base de conocimiento del sistema

## EJEMPLOS EN FUZZYCLIPS

### Ejemplo 1

Ficheros necesarios:

- BC\_acc.clp: base de conocimiento.
- BH\_acc\_70\_neg60.clp: base de hechos.

En el primer caso, suponemos que el sistema de medición del vehículo obtiene una distancia y velocidad relativa con respecto del vehículo de delante de **70 metros** y **-60 km/h**, respectivamente. Dichos valores están definidos en el fichero *BH\_acc.clp* como un número borroso. Tras cargar en el sistema tanto la base de conocimiento como la base de hechos (BH\_acc.clp), las ventanas de *Facts* y la agenda de reglas muestran lo siguiente:

```
Facts (MAIN)
f-0      (initial-Fact) CF 1.00
f-1      (DISTANCIA ???) CF 1.00
f-2      (VELOCIDAD ???) CF 1.00 0) )
( (-60.0 0.0) (-60.0 1.0) (-60.0 0.0) )
```

*Ilustración 4. Hechos iniciales. Ejemplo 1*

```
Agenda (MAIN)
0      R1: f-1,f-2
0      R6: f-1,f-2
0      R11: f-1,f-2
```

*Ilustración 5. Agenda de reglas. Ejemplo 1*

Al ejecutar el proceso, se disparan las reglas **R1**, **R6** y **R11**, en ese orden. El resultado, es el conjunto borroso de la siguiente imagen asociado a la variable “aceleración” (la variable de salida), proporcionado por *FuzzyClips*. Con el objetivo de obtener un número real como resultado, se ha calculado el centro de masas del conjunto y la media del máximo. Ambos resultados pueden apreciarse también en la siguiente ilustración.



```

FuzzyCLIPS> (plot-fuzzy-value t * -3 3 5)

Fuzzy Value: ACCELERACION
Linguistic Value: ??? (*)

1.00
0.95
0.90
0.85*****
0.80
0.75      *
0.70
0.65
0.60
0.55      *
0.50
0.45
0.40      *
0.35      *****
0.30      *
0.25
0.20
0.15      *
0.10      *
0.05
0.00      *****
|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
-3.00   -1.80   -0.60    0.60    1.80    3.00

Universe of Discourse: From -3.00 to 3.00

FuzzyCLIPS> (moment-defuzzify 5)
-1.906667882324337
FuzzyCLIPS> (maximum-defuzzify 5)
-2.4375
FuzzyCLIPS>

```

*Ilustración 6. Conjunto borroso de salida. Ejemplo 1*

La salida obtenida supone que el sistema ejercería una aceleración de -1.9 o -2.43 m/s<sup>2</sup>, depende del método de “desfucificación” que se use. En conclusión, el control adaptativo de velocidad llevaría a cabo una acción de frenado con el objetivo de mantener una distancia prudencial con el vehículo que circula por delante.

## Ejemplo 2

Ficheros necesarios:

- BC\_acc.clp: base de conocimiento.
- BH\_acc\_110\_40.clp: base de hechos.

En este caso, el hecho inicial contempla los siguientes valores para las variables de entrada:

- Distancia: 110 metros
- Velocidad relativa: 40 km/h

Una vez cargamos ambas bases de conocimiento, *FuzzyClips* define ahora una base de hechos distinta a la del ejemplo anterior (el conjunto agenda no se ha modificado).

```

Facts (MAIN)
f-0      (initial-fact) CF 1.00
f-1      (DISTANCIA ???) CF 1.00
f-2      (VELOCIDAD ???) CF 1.00 0.0)  )
( (40.0 0.0) (40.0 1.0) (40.0 0.0)  )

```

*Ilustración 7. Hechos iniciales. Ejemplo 2*

```

Agenda (MAIN)
0      R9: f-1,f-2
0      R14: f-1,f-2
0      R19: f-1,f-2
0      R10: f-1,f-2
0      R15: f-1,f-2
0      R20: f-1,f-2

```

Ilustración 8. Agenda de reglas. Ejemplo 2

El número de hechos es el mismo, aunque con distintos valores. No obstante, podemos apreciar en la ilustración 8 las reglas a disparar han incrementado ya que los hechos pertenecen a un mayor número de los conjuntos borrosos definidos en el apartado de diseño. Tras disparar las reglas **R9, R14, R19, R10, R15 y R20**, el conjunto de borroso de salida y sus resultados “desfucificados” son los siguientes:

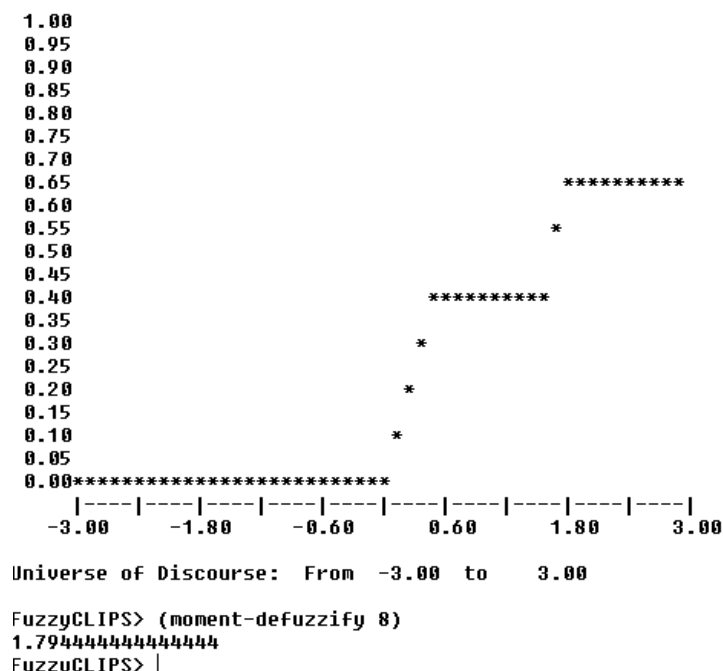


Ilustración 9. Conjunto de salida. Ejemplo 2

La salida de este caso es muy distinta a la del ejemplo 1. El sistema deduce que las condiciones de entrada permiten aumentar la velocidad de forma segura, por lo que produce una aceleración positiva.