



1- Introducción:

Desde las primeras ideas formalizadas de la Lógica Difusa en los años 60, se han venido intentando cada vez con más éxito la aplicación de esta rama de la lógica al Control Automático, incluyendo el de procesos, es ésta la razón por la que incluimos el Control Difuso, dentro del Temario más amplio de Otros Sistemas de Control.

Estas notas, por si introductorias, tratan de explicar sus fundamentos y principios de aplicación de forma simple sentando la bases para que aquellos alumnos que deseen seguir profundizando en el tema cuenten ya con un primer paso hecho, por lo que se desarrollarán estas líneas con un enfoque basado en el Estudio de un caso, junto con el cual se presentarán la mayoría de las funciones de la Lógica Difusa evitando toda vez que sea posible la rigurosidad de planteos de la lógica formal en su concepción genérica.

1.1- La lógica Difusa surge como un intento de formalización del razonamiento con incertidumbre. En particular y al contrario que otras formas de razonamiento intenta abordar problemas definidos en términos lingüísticos y por lo tanto imprecisos, donde todos los datos están expresados en términos cualitativos.

1.2- El termino *difuso* (o *borroso*) corresponde a la traducción de la palabra inglesa *fuzzy*, por lo que emplearemos indistintamente cualquiera de ellos, incluyendo sus derivaciones como *fuzzyficación* equivalente a *borroficación*, etc.

1.3- En un primer acercamiento y a partir de la Lógica Clásica, que establece que cualquier enunciado o proposición puede tomar un valor lógico (verdadero o falso, alto o bajo, prendido o apagado, cerrado o abierto, en definitiva 1 ó 0, que para el caso por ejemplo de una puerta sólo tiene dos posibilidades, esto es abierta o cerrada, bajo la óptica de la Lógica Difusa, dicha puerta no tiene porqué estar necesariamente abierta (valor 1) ni cerrada (valor 0), sino que además puede estar abierta a medias (valor 0.5), bastante abierta (valor 0.8), casi cerrada (0.1), etc.

1.4- La principal ventaja de utilizar términos lingüísticos como a medias, bastante, casi poco, mucho, algo, etc. está en que permite plantear el problema en los mismos términos en los que lo haría un **experto humano**.



1.5- Al decir de quien hiciera la presentación por primera vez (1965) de un trabajo sobre Conjuntos Borrosos , el soviético Lofti Zadeh y actualmente catedrático e investigador en la Universidad de California - Berkeley :

"No tiene sentido buscar la solución a un problema no perfectamente definido, por medio de un planteamiento matemático muy exacto, cuando es el ser humano el primero que razona empleando inexactitud "

Siguiendo con lo que dice el teórico de Berkeley "cualquiera de nosotros es capaz de estacionar su automóvil en unos pocos segundos, porque no hace falta encajarlo exactamente en un espacio perfectísimamente delimitado. Si pretendiéramos hacerlo así tardaríamos tres años....."

1.6-Según lo dicho puede deducirse que el empleo de la Lógica Clásica vs la Difusa está en relación directa con el problema a resolver , así el conjunto de número pares e impares entrarían perfectamente dentro de la clásica , la segunda para contestar por ejemplo el siguiente interrogante ,tal persona es alta , algo baja o de estatura normal.

Será nuestra tarea darle un marco de representación formal a tal tipo de planteos y con vistas a su empleo en el Control Automático, como ya veremos.

La lógica Difusa permite plantear el problema en los mismos términos en los que lo haría un experto humano.

2 - Incertidumbre del Léxico:

2.1- Dentro del variado espectro de incertidumbres , está el correspondiente al léxico proveniente de la imprecisión de las palabras que empleamos , como ya vimos " altura humana" Quien es alto? , un niño tiene un concepto distinto de lo que es una persona alta del que tiene un adulto . Lo mismo pasa por ejemplo con "días cálidos" . Cuando lo es para un habitante de Tierra del Fuego y cuando lo es para uno de Salta ? , etc.

Estas expresiones constituyen incertidumbres del léxico o incertidumbres lingüísticas.

2.2- Modelando la Incertidumbre Lingüística - Conceptos de Conjunto Difuso: Consideremos el caso de definir pacientes con "fiebre alta" cuando es igual o superior a 42 °C , habría un conjunto de ellos con - fiebre alta - y otro -sin fiebre alta- , no obstante dentro de éste último conjunto de pacientes los habría



con temperatura normal , otros con temperaturas levemente superior a la normal y otros hacia y con hasta casi los 42 °C , por lo que podríamos decir que cada uno de ellos tendría un *cierto grado* de *fiebre alta* , formando un degradé donde es *difuso* cuanto de *fiebre alta* tiene cada uno (de allí el nombre) , salvo el de temperatura *normal* que *no participaría* de este *conjunto difuso* o lo que es lo mismo, que lo *hace* con un *grado cero*.

2.3- Si consideramos *todo el conjunto* de pacientes podríamos decir que cada de ellos *participa* con un *cierto grado* de *pertenencia* al subconjunto denominado de *fiebre alta* , a los grado de pertenencia los denominaremos con la letra μ (x) y pudiéndose construir la siguiente Tabla:

μ (34,44 °C) = 0	μ (37,77 °C) = 0.1	μ (41,11 °C) = 0.9
μ (35,55 °C) = 0	μ (38,88 °C) = 0.35	μ (42,00 °C) = 1
μ (36,50 °C) = 0	μ (40,00 °C) = 0.65	μ (43,33 °C) = 1

Estos *grado de pertenencia* puede ser representada por una *función continua*, haciéndose notar que se podría decir que un paciente con 39 °C tiene un *poco* de *fiebre alta* y otro con 40 °C con *casi tiene fiebre alta*. A través de esta función continua asociamos ciertos grados de pertenencias a ciertas expresiones lingüísticas (*poco* , *casi* , etc.).

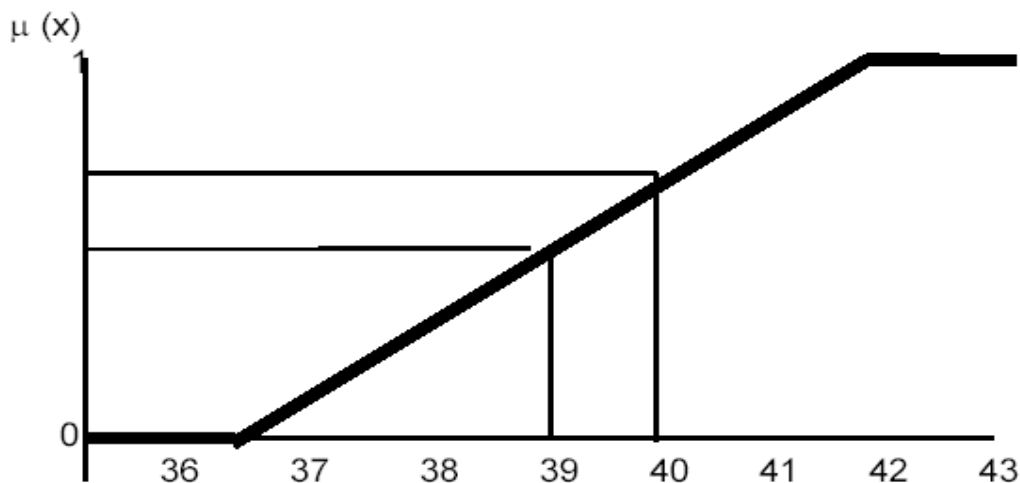


Figura que representa el grado de pertenencia $\mu(x)$ dentro de la función continua del conjunto de fiebre alta.

2.4 - Debe notarse que el conjunto difuso así expresado es una generalización del conjunto convencional donde el grado de pertenencia es nulo "0" o es todo "1"

Definimos ahora al conjunto *temperatura alta* como *término lingüístico* que junto con otros términos lingüísticos asociados con la temperatura de los pacientes, como baja, normal y en ascenso y representadas por sendas funciones continuas representando así en forma completa a la variable *lingüística fiebre*.

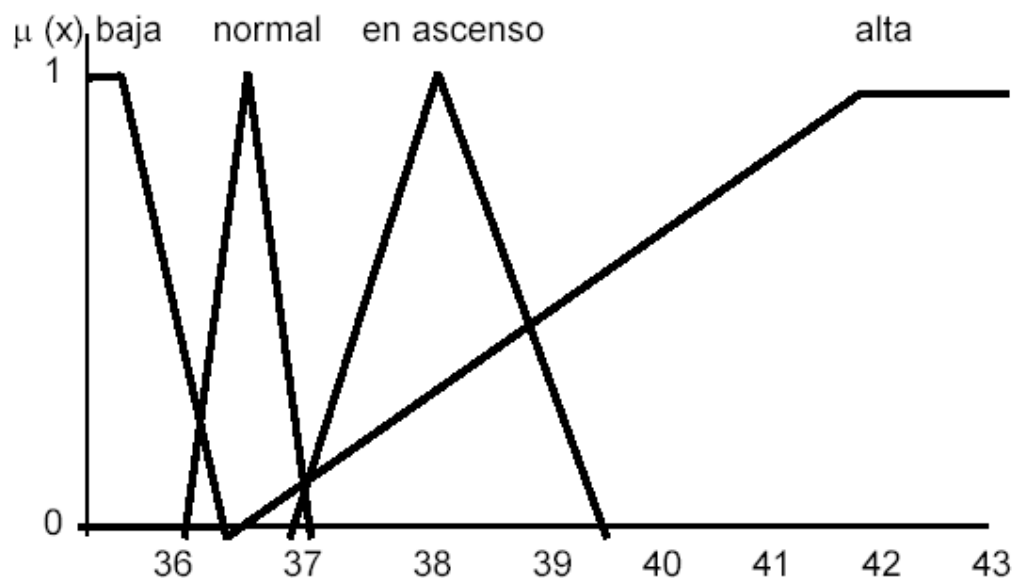


Figura que muestra como una variable lingüística traduce valores reales en valores lingüísticos.

La variable lingüística fiebre nos permite traducir las distintas medidas de la temperatura corpórea, dada en grados centígrados en descripciones lingüísticas.

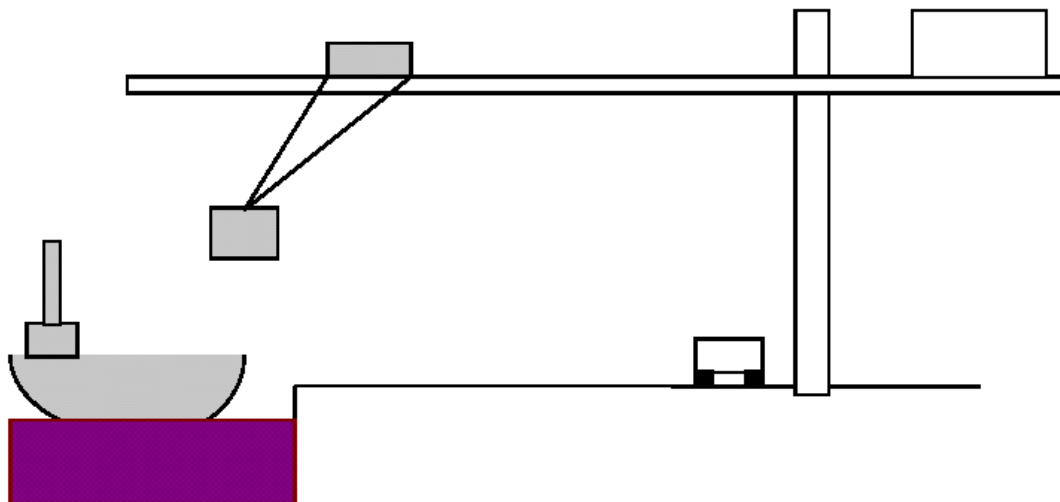
Por ejemplo, una temperatura corpórea de 37,8 °C podrá ser evaluada como temperatura en ascenso, casi un poco de alta.

Palabras claves: grado de pertenencia $\mu(x)$, término lingüístico, función continua, variable lingüística.

3 - Tecnologías basadas en Lógica Difusa - Estudio de un caso.

3.1- Las grúas de containers se usan para descargar y cargar de y hacia barcos en la mayoría de los puertos . Una grúa levanta un container mediante cables flexibles que penden desde un extremo de un gran barral horizontal, en el otro está la cabina de comando y control.

Levantado lo suficiente y sobre rieles montados en el gran barral, un carro desplaza el ahora colgante container en forma horizontal hasta un vagón de tren, donde lo deposita.



Cuando el container es levantado y el carro en el barral comienza a desplazarse hacia el interior , el container comienza a balancearse , lo cual no constituye un problema durante el desplazamiento , ya que está lo suficientemente asegurado como para impedir un desprendimiento no deseado.

El problema de control aparece cuando ya estando sobre el vagón se debería esperar hasta el balanceo se amortigüe lo suficiente , en un día no ventoso esto eventualmente sucede pero lleva mucho tiempo y los costos aumentan considerablemente, es por ello que la acción de cargar y descargar barcos se debe hacer en el mínimo tiempo posible.

La otra posibilidad sería mover el container en su desplazamiento vertical suavemente de tal manera de minimizar el balanceo, pero eso lleva también



mucho tiempo y una última alternativa sería fijar el container con múltiples cables de fijación de forma tal de anular todos sus grados de libertad, encareciendo el costo de la grúa como de la operación de fijado y soltado del container a la grúa.

Por todo lo expuesto las grúas cuentan con un motor eléctrico cuya velocidad puede ser controlada por el operador, que si está bien entrenado es capaz de compensar el balanceo del container y descargar el mismo sobre el vagón en un tiempo aceptable y mucho menor que los que llevaban los métodos precedentemente analizados.

3.2 - A fin de automatizar esta complicada maniobra , se ha tratado de controlar mediante :

- Control PID
- Control basado en modelo
- Control Difuso

El primero no fue exitoso porque el proceso es altamente alineal , el segundo derivó en un modelo con una ecuación diferencial de 5° Orden que describía su comportamiento mecánico , si bien en teoría funcionaba en la práctica no dado que disturbios como el viento no pueden ser incluidos en el modelo.

3.3 - Por otro lado veamos como controla el operador : una vez que ha levantado el container, comienza el movimiento horizontal del carro a *media velocidad* , para ver como se balancea el container , dependiendo de dicha reacción , el ajusta la velocidad de tal forma de dejar un *poco atrás* el container del carro , a partir de ese momento da *máxima velocidad* al motor que impulsa el carro comprobándose mínimo balanceo en esta etapa.

Estando *cerca* del vagón el operador *reduce* la velocidad o aún más , aplica *potencia negativa* para frenar el carro. Hecho esto se ve que el container se adelanta levemente al carro que lo desplaza , a partir de este punto se incrementa la velocidad del motor hasta que el carro está encima del container que no se balancea y ha quedado debajo del vagón.

Como vemos las acciones del operador es capaz de compensar los disturbios y las alinealidades del sistema . Un análisis de estas acciones revelan y describen su estrategia de control:

- 1) Empieza a desplazar el carro con motor a media potencia.



- 2) Estando en esta etapa , lejos del vagón , deja un poco atrás al container y aumenta al máximo la velocidad .
- 3) Cerca del vagón reduce la velocidad del carro hasta que el container se adelanta un poco respecto del primero.
- 4) Cuando el container está cerca del vagón , incrementa la velocidad del motor.
- 5) Cuando el container está sobre el vagón y el balanceo es nulo, para el motor.

En definitiva la efectiva estrategia de un operador entrenado consisten en los cinco puntos arriba descriptos principales , a los que agregaremos tres de corrección "sobre la marcha" y están basados en la "Reglas del Pulgar".

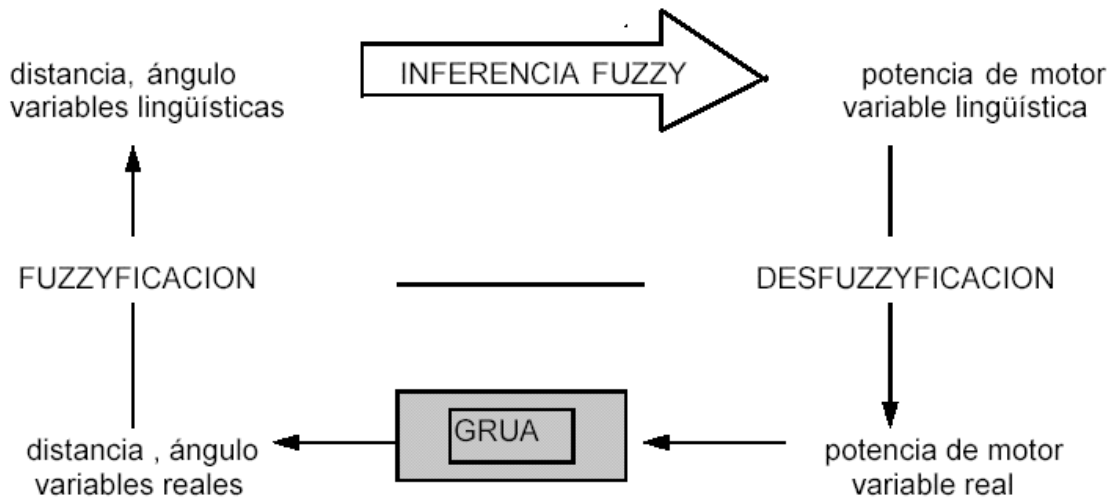
3.4 - Implementando una estrategia de control lingüística: para la automatización de la grúa es necesario utilizar transmisores , uno de distancia entre el carro y el vagón y otro angular que nos de una medida del balanceo del container , estas dos entradas al controlador fuzzy y la aplicación de los ocho puntos que aplica el operador ahora desarrollados bajo el formato IF- THEN, se tendrá :

- 1) IF distancia = lejos AND ángulo = cero
THEN potencia = pos_media (media potencia positiva - hacia el vagón)
- 2) IF distancia = lejos AND ángulo = neg_pequeño
THEN potencia = pos_maximo (máxima potencia positiva)
- 3) IF distancia = lejos AND ángulo = neg_grande
THEN potencia = pos_media
- 4) IF distancia = media AND ángulo = neg_pequeño
THEN potencia = neg_media (media potencia negativa - hacia barco)
- 5) IF distancia = media AND ángulo = cero
THEN potencia = cero
- 6) IF distancia = media AND ángulo = pos_pequeño
THEN potencia = pos_media
- 7) IF distancia = cerca AND ángulo = pos_pequeño
THEN potencia = pos_media
- 8) IF distancia = cero AND ángulo = cero
THEN potencia = cero

Este formato se denomina *inferencia difusa* y se puede generalizar como:

IF <situación1> AND <situación2> THEN <acción>

3.5 - Estructura del controlador fuzzy para grúa: La figura de abajo muestra la estructura de tal controlador, llevando la *distancia* y *ángulo* a *variables lingüísticas* y estas descritas por expresiones en *términos lingüísticos* como (aún en la mitad , casi lejos , etc.) , constituyen la llamada etapa de *fuzzyficación*.



Una vez que todas las variables reales están traducidas en sus respectivas lingüísticas, se realiza el proceso de inferencia a partir de reglas bajo el formato IF - THEN que definen por un lado el comportamiento del sistema (situación) y como resultado surge una nueva variable lingüística (acción) , en nuestro caso, para determinada situación , la acción resultante podría ser ajustar la potencia del motor un "poco menos que a la mitad de potencia" . La etapa de desfuzzycación traduce este resultado lingüístico en una variable real en KWatts.

3.6 - Sentadas las bases de un controlador fuzzy , desarrollaremos ahora el set completo de términos lingüísticos para cada variable fuzzyficada y sus grados de pertenencia :

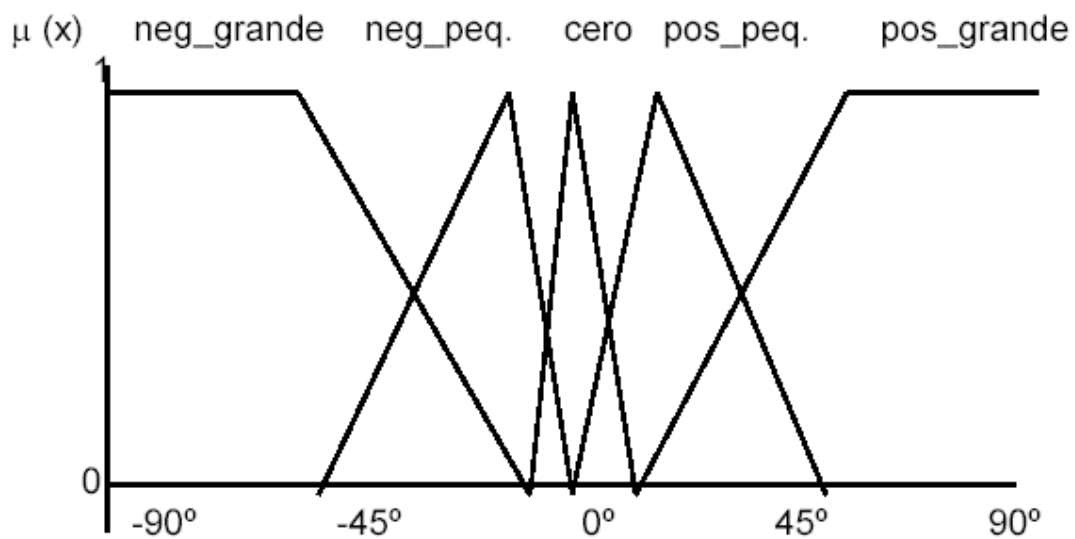
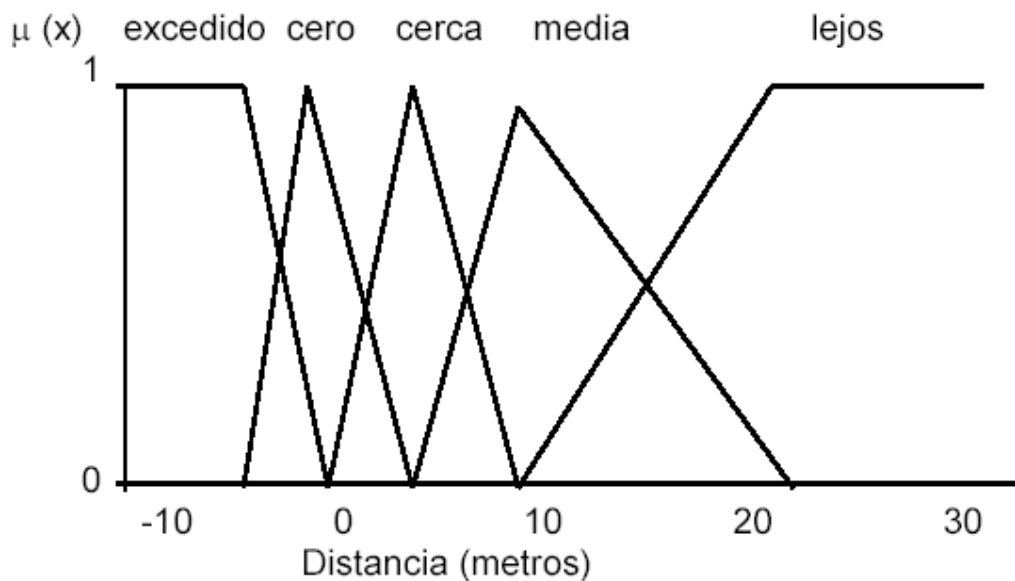
VARIABLE

TERMINOS

distancia $\in \{ \text{lejos} , \text{media} , \text{cerca} , \text{cero} , \text{excedido} \}$

ángulo $\in \{ \text{pos_grande} , \text{pos_pequeño} , \text{cero} , \text{neg_pequeño} , \text{neg_grande} \}$

potencia $\in \{ \text{pos_max} , \text{pos_media} , \text{cero} , \text{neg_media} , \text{neg_max} \}$





Veamos ahora la respuesta del controlador fuzzy ante una situación producida en un instante dado, por ejemplo que el container está a distancia de 12 metros del vagón y con una inclinación de 4° (está un poco adelantado respecto de la vertical) en su recorrido hacia el vagón .

La relación que se establece a partir de considerar estas variables, sus términos y grados de pertenencia (ver gráficos) serán:

VARIABLE	TERMINOS
distancia	$\in \{ 0.1, 0.9, 0, 0, 0 \}$
ángulo	$\in \{ 0, 0.8, 0.2, 0, 0 \}$

Además vemos que las reglas de aplicación en el formato IF - THEN son las: 1), 5) y 6), que para su aplicación debemos definir dos nuevos conceptos:

Agregación: hace a la evaluación y cálculo de la parte IF de la regla.

Composición: hace a la evaluación y cálculo de la parte THEN de la regla.

Agregación: Debemos decir que la función conectiva AND expuesta en la regla IF - THEN no es la booleana pura sino una que contempla las condición difusa de " mas o menos ", para ello este operador AND en lógica difusa se expresa en términos de tomar como salida de dicha operación el mínimo dado por alguno de los dos operandos, así tenemos:

$$\text{AND: } \mu_{A \wedge B} = \min \{ \mu_A, \mu_B \}$$

Esto se traduce a las reglas IF - THEN que tienen aplicación para este instante, como:

1) IF distancia = lejos AND ángulo = cero $\equiv \min \{ 0.1 ; 0.2 \} = 0.1$

5) IF distancia = media AND ángulo = cero $\equiv \min \{ 0.9 ; 0.2 \} = 0.2$

6) IF distancia = media AND ángulo = pos_pequeño $\equiv \min \{ 0.9 ; 0.8 \} = 0.8$

Composición: Cada regla define una acción a tomar en la parte THEN, el grado de adecuación de la misma tiene una relación con el grado de verdad de la parte IF, por lo que surge que para las reglas involucradas:

1) THEN potencia = pos_media

5) THEN potencia = cero

6) THEN potencia = pos_media

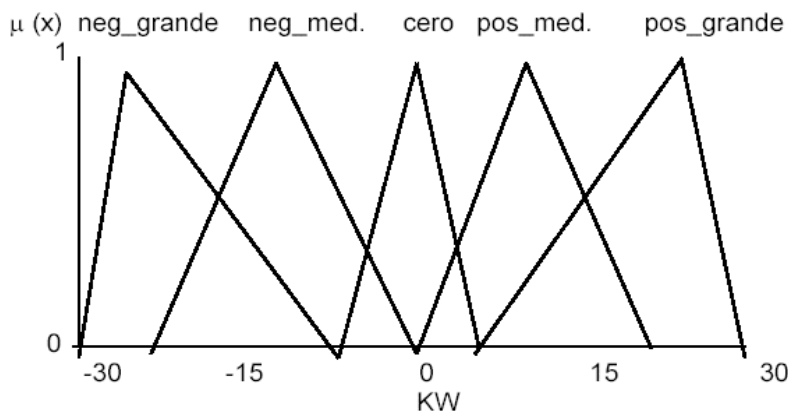
Vemos que las reglas 1) y 6) indican potencia positiva media , pero con distinto grado de "verdad " mientras que la 5) indica potencia nula , por lo que el paso de inferencia se realiza mediante el operador OR , no el booleano , sino el difuso definido como:

$$\text{OR : } \mu_{A \cup B} = \max \{ \mu_A , \mu_B \}$$

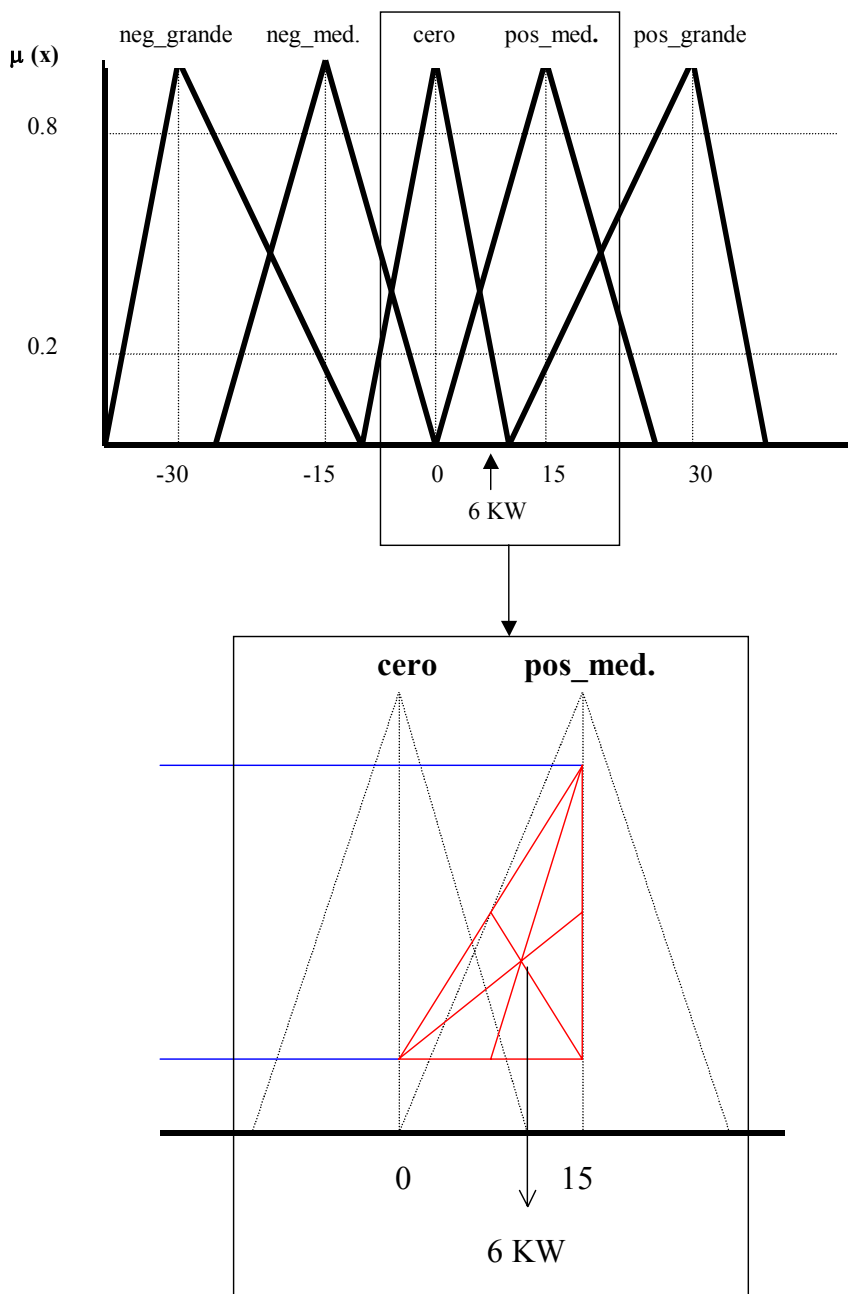
Esto se hace que la variable lingüística *potencia* y sus términos , para este instante , resulten en:

pos_grande con un grado de pertenencia 0.0
pos_media con un grado de pertenencia 0.8 (= max { 0.8 ; 0.1 })
cero con un grado de pertenencia 0.2
neg_media con un grado de pertenencia 0.0
neg_grande con un grado de pertenencia 0.0

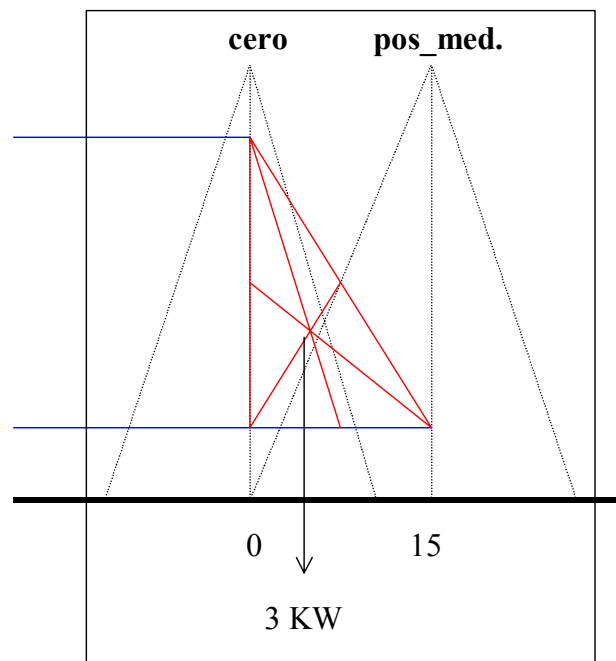
3.7 - Desfuzzyficación de variable lingüística *potencia*: terminada la *inferencia* , el resultado de la variable potencia está dado en términos lingüísticos debiéndolos ahora traducirlos a la variable real KW, esta etapa como ya dijimos se llama desfuzzyficación , la relación entre la variable lingüística y la real está dada por los términos lingüísticos y su distinto grado de pertenencias , como vemos a continuación:



De la aplicación de las reglas IF-THEN han surgido dos valores a defuzzyficar, uno de 0.8 en potencia media y uno de 0.2 en potencia nula, para obtener el valor real empleamos el método de "centro de gravedad" o "centro de máximo", a partir del cual encontramos el mejor valor de compromiso, cerca de 6 KW:



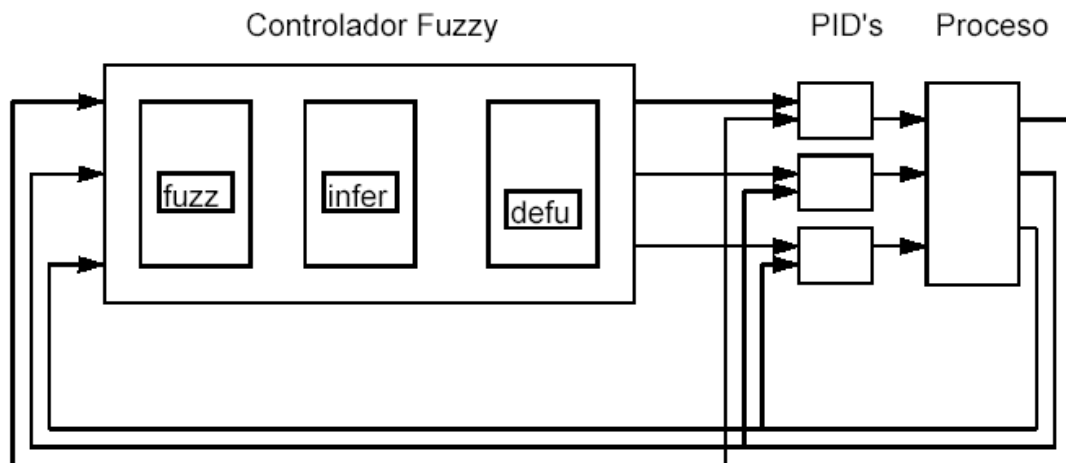
Si el mayor grado de pertenencia hubiese correspondido al término lingüístico “cero” y el menor al “pos_med.”, la estimación de la potencia en ese instante sería:



Nota final: El procesador de texto usado no permite una graficación con un escalado preciso, por lo que no puede apreciarse una proporcionalidad adecuada.

4 - Combinando el Control Difuso con otros métodos convencionales de control: Como sabemos el controlador PID responde adecuadamente al control de una variable, (sistema SISO), pero no lo podemos hacer extensivo a toda la planta (sistema MIMO), tal como lo hace un supervisor humano entrenado o un controlador basado en modelo, cuya construcción requiere un conocimiento muy profundo del proceso y un esfuerzo matemático considerable.

Otra alternativa es construir un controlador fuzzy a partir del conocimiento del supervisor entrenado, las entradas al mismo serían el de todas las variables a considerar en este sistema MIMO, en el controlador difuso tendrían lugar los pasos ya vistos de fuzzificación, inferencia y defuzzificación, dando lugar a salidas que cambiarían los set points de cada controlador PID involucrado en el control convencional de la planta.



Dicho de otra forma , a partir de una planta controlada mediante controladores PID (valga la redundancia) , se puede implementar un sistema supervisor MIMO basado en técnicas difusas, construido a partir del conocimiento de su equivalente humano y con la finalidad de optimizar la performance integral de la planta , ya que posibilita un control en avanzación en un ámbito MIMO y bajo un esquema multicascada ya que el controlador fuzzy opera como maestro de múltiples esclavos PID.

5 - Implementación: Los controladores difusos pueden implementarse en computadores tipo PC directamente para sistemas sencillos y no críticos, vía controladores PID o PLC y en Sistemas de Control Distribuidos para plantas más complejas, contando a nivel de software con paquetes especializados y herramientas de construcción ya orientadas a las distintas etapas del desarrollo de un controlador difuso, otro camino más arduo es desarrollarlo directamente con un lenguaje de alto nivel como Fortran o C.

Profesor Titular: Ing. Alfredo Ernesto Puglesi
Profesor Adjunto: Ing. María Susana Bernasconi
JTP: Ing. Esther Bibiana Castiglione
Colaboró: Marcos Castagnolo