

Capítulo 4

Control Difuso

4.1 Introducción

El Control Difuso o FC, por sus siglas en ingles “Fuzzy Control” es considerado como la aplicación más importante de la teoría de lógica difusa. La lógica difusa es una técnica diseñada para imitar el comportamiento humano (los humanos razonan eficientemente con definiciones difusas o vagas). Esta técnica fue concebida para capturar información vaga e imprecisa. La lógica difusa trata de crear aproximaciones matemáticas para la resolución de ciertos tipos de problemas y producir resultados exactos a partir de datos imprecisos, por lo cual es particularmente útil en aplicaciones electrónicas.

Los controles difusos son típicamente utilizados cuando el proceso a controlar es muy complejo, no-lineal y su modelo matemático no es fácil de obtener. Por lo que se hace uso de la información (o experiencia) disponible acerca de la planta a controlar, dicha

experiencia se puede conjugar mediante un conjunto de reglas de control, las cuales expresen la información de forma resumida.

Entre las ventajas de los controles difusos, radica en que son menos sensibles a cambios de parámetros o perturbaciones, esto es, comparando los controles convencionales con el control difuso se encuentra que es más robusto que el tradicional PID.

Además, tiene la ventaja de que sus parámetros pueden actualizarse de manera sencilla si los puntos de operación de la planta cambian. En muchos casos, inclusive un operador no especializado en control puede generar la base de reglas de control, esto se debe a que no es difícil de generar las reglas de la base de conocimiento, ya que las reglas emplean variables lingüísticas en vez de variables numéricas.

Dada su exitosa facilidad, es posible encontrar el control difuso en aplicaciones como control de sistemas (control de tráfico aéreo y automovilístico, lavadoras, compuerta de presas hidroeléctricas, etc.), predicción y automatización, reconocimiento de patrones (seguimiento de objetos con cámaras de video, reconocimiento de huellas digitales, etc.) y sistemas de conocimiento (bases de datos, sistemas expertos).

4.2 Lógica difusa

Las bases de la teoría en lógica difusa se establecen en 1965 por el profesor Lofti, A Zadeh de la Universidad de Berkeley.

El éxito de esta teoría se encuentra en la facilidad de toma de decisiones, el hacerle saber al sistema lo que el individuo desea y que se cumplan las condiciones tal cual se le indicó. Por lo que el enfrentarse a procesos no lineales o con modelos matemáticos complejos ya no representa un inconveniente para el área de control.

La lógica difusa facilita el manejo de procesos con información no exacta, es decir que la información maneja cierto grado de imprecisión e incertidumbre. A diferencia de la lógica tradicional que maneja información precisa y definida.

A continuación se presentan algunas definiciones elementales que permitirán comprender la técnica de control difuso.

4.3 Teoría de conjuntos difusos

La teoría de conjuntos clásica se puede ejemplificar con un elemento “ x ”, el cual pertenezca o no a un conjunto A , con esta idea se entiende que se trata de una teoría de conjuntos bivalentes. El grado de pertenencia a un conjunto solo puede ser respectivamente 1 o 0 . Consecuentemente, con la teoría de conjuntos clásica es muy difícil expresar la vaguedad o imprecisión de un concepto, en otras palabras, con un conjunto clásico no se puede expresar de forma computacional conceptos como “pequeño”, “mediano” y “grande” porque estos conceptos se asocian a las cosas con más grados de pertenencia que 0 o 1 .

Por ejemplo, si definimos el concepto de “persona alta” con la teoría de conjuntos clásica lo podríamos representar como el conjunto: $\{x \text{ es alta si } \text{altura}(x) \geq 190 \text{ cm}\}$. Esta definición implicaría que una persona cuya altura fuera de 185 centímetros no sería considerada una persona “alta”, lo que está bastante alejado de la realidad. Para nuestra manera de razonar esta persona sería considerada “alta” aunque no tanto como una persona cuya altura fuera de 195 centímetros. Este problema de interpretación aparece al intentar clasificar este concepto humano a través de conjuntos cuyas fronteras son abruptas y por ello se creó la teoría de los conjuntos difusos, con el objetivo de solucionar la incapacidad de representación de conceptos humanos utilizando conjuntos tradicionales.

4.4 Conjunto difuso

Un conjunto difuso se define matemáticamente como:

$$A = \{x, \mu_A(x) \mid x \in U\} \quad (4.1)$$

Donde $\mu_A : x \rightarrow [0,1]$ es la función de pertenencia, $\mu_A(x)$ es el grado de pertenencia de la variable x y U es el dominio de la aplicación, llamado en términos “difusos” el Universo en Discurso. Visto de otra forma, entre mas cerca esté A del valor 1 , mayor será la pertenencia del objeto x al conjunto A .

Para el caso en el que U es continuo, un conjunto difuso A se puede representar como [29]:

$$A = \int_x \frac{\mu_A(x)}{x} \quad (4.2)$$

Ahora, para el caso en que U es discreto, el conjunto difuso A se puede representar como [29]:

$$A = \sum_{i=1}^n \frac{\mu_A(x_i)}{x_i} \quad (4.3)$$

Algunos de los conceptos de los conjuntos difusos mas utilizados son los siguientes [29]:

Soporte: El soporte de un conjunto difuso A , es el subconjunto de U para cuyos componente.

$$\mu_A(x) > 0 \quad (4.4)$$

Punto de cruce: En particular el elemento x de U para el cual $\mu_A = 0.5$ se le denomina punto de cruce.

Singletón: un conjunto difuso cuyo soporte consta de un solo elemento de U y que además $\mu_A = 1$ se le llama singletón [29].

4.5 Función de pertenencia

Un conjunto difuso puede representarse también gráficamente como una función, especialmente cuando el universo en discurso U (o dominio) es continuo (no discreto). En la Figura 4.1 se ejemplifica el concepto de temperatura “alta”, en donde la abscisas (eje X) es el universo en discurso U y la ordenada (eje Y) son los grados de pertenencia en el intervalo $[0,1]$.

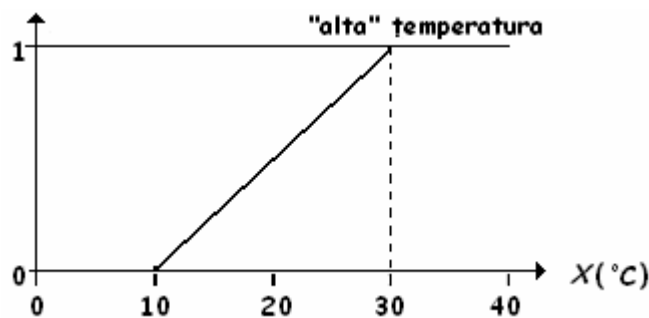


Figura 4.1. Ejemplo de grados de pertenencia, correspondiente a una medición de temperatura registrada de cualquier equipo.

4.5.1 Tipos de funciones de pertenencia

Para cualquier función de pertenencia en general es recomendado el uso de funciones simples, esto es, se busca simplificar los cálculos matemáticos y no perder exactitud, ya que precisamente se está definiendo un concepto difuso. Más esto puede llevar a tomar decisiones como las de concepto, contexto, y aplicación a la cual se vaya aplicar la

función de pertenencia. A continuación se muestran las funciones de pertenencia más comunes:

1. *Triangular* (Figura 4.2). Definido por sus límites inferior (a) y superior (b), y el valor modal (m), tal que $a < m < b$. [30]

$$A = \begin{cases} 0 & \text{si } x \leq a \\ (x - a)/(m - a) & \text{si } x \in (a, m] \\ (b - x)/(b - m) & \text{si } x \in (m, b) \\ 0 & \text{si } x \geq b \end{cases} \quad (4.5)$$

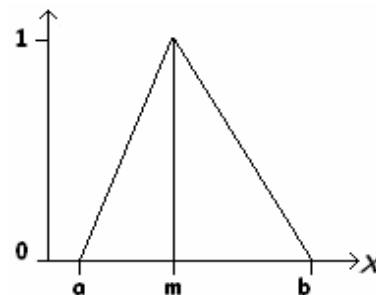


Figura 4.2. Función de pertenencia triangular.

2. *Función gamma*, Γ (Figura 4.3): Definida por su límite inferior (a) y el valor $k > 0$. [30]

$$A = \begin{cases} 0 & \text{si } x \leq a \\ 1 - e^{-k(x-a)^2} & \text{si } x > a \end{cases} \quad (4.6)$$

$$A = \begin{cases} 0 & \text{si } x \leq a \\ \frac{k(x-a)^2}{1 + k(x-a)^2} & \text{si } x > a \end{cases} \quad (4.7)$$

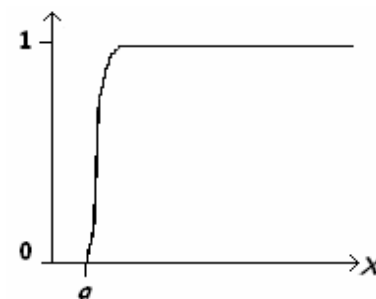


Figura 4.3. Función de pertenencia gamma.

3. *Función S* (Figura 4.4): Definida por sus límites inferior (a) y superior (b), y el valor m o punto de inflexión, tal que $a < m < b$. [30]

- El crecimiento es más lento cuanto mayor sea la distancia $a-b$.

$$A = \begin{cases} 0 & \text{si } x \leq a \\ 2[(x-a)/(b-a)]^2 & \text{si } x \in (a, m] \\ 1 - 2[(x-b)/(b-a)]^2 & \text{si } x \in (m, b) \\ 1 & \text{si } x \geq b \end{cases} \quad (4.8)$$

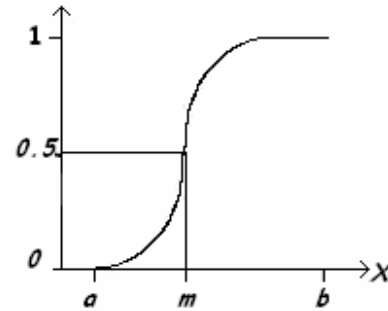


Figura 4.4. Función de pertenencia S.

4. *Función Gaussiana* (Figura 4.5): Definida por su valor medio m y el valor $k > 0$. [30].

$$A = e^{-k(x-m)^2} \quad (4.9)$$

- Es la típica campana de Gauss.
- Cuanto mayor el k , más estrecha es la campana.

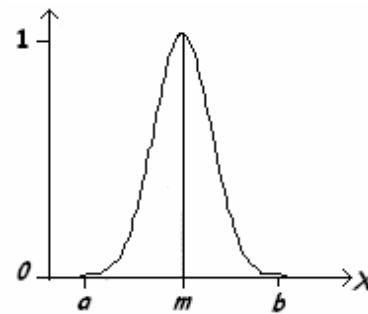


Figura 4.5 Función de pertenencia Gaussiana.

5. *Función trapezoidal* (Figura 4.6): Definida por sus límites inferior (a) y superior (d) y los límites de su soporte, b y c , inferior y superior respectivamente. [30]

$$A = \begin{cases} 0 & \text{si } (x \leq a) \text{ o } (x \geq d) \\ (x-a)/(b-a) & \text{si } x \in (a,b] \\ 1 & \text{si } x \in (b,c) \\ (d-x)/(d-c) & \text{si } x \in (c,d) \end{cases} \quad (4.10)$$

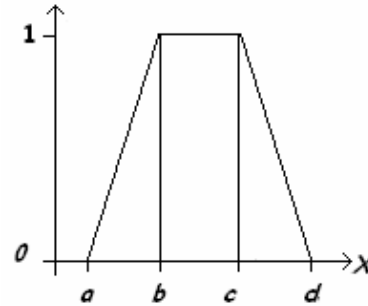


Figura 4.6. Función de pertenencia trapezoidal.

6. *Función Pseudos-Exponencial* (Figura 4.7): Definida por su valor medio m y el valor $k > 1$.

$$A = \frac{1}{1 + k(x - m)^2} \quad (4.11)$$

- Cuanto mayor es el valor de k , el crecimiento es más rápido aún y la “campana” es más estrecha.

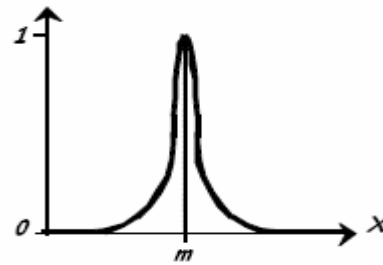
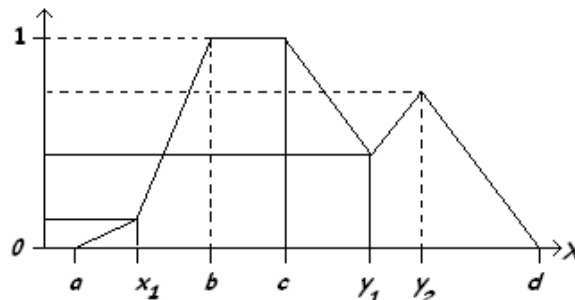


Figura 4.7. Función de pertenencia pseudo-exp.

7. *Función trapecio extendido* (Figura 4.8): Definida por los cuatro valores de un trapecio $[a,b,c,d]$, y una lista de puntos entre a y b , o entre c y d , con su valor de pertenencia asociado a cada uno de esos puntos. [30]

- En general, la función trapezoidal se adapta bien a la definición de cualquier concepto, con la ventaja de su fácil definición, representación y



simplicidad de cálculos.

Figura 4.8. Función de pertenencia trapecio extendido.

- En casos particulares, el trapecio extendido puede ser de gran utilidad. Este permite gran expresividad aumentando su complejidad.

4.6 Operaciones con conjuntos difusos

Las tres operaciones básicas de los conjuntos difusos: unión, intersección y el complemento, fueron definidos por Zadeh. [30]

$$- \text{Unión: } A \circ B \Rightarrow A \cup B \Rightarrow \mu_{A \cup B} = \max\{\mu_A(x), \mu_B(x)\} \quad (4.12)$$

$$- \text{Intersección: } A \text{ y } B \Rightarrow A \cap B \Rightarrow \mu_{A \cap B} = \min\{\mu_A(x), \mu_B(x)\} \quad (4.13)$$

$$- \text{Complemento: } \bar{A} \Rightarrow \neg A \Rightarrow \mu_{\bar{A}} = 1 - \mu_A(x) \quad (4.14)$$

$$- \text{Producto cartesiano: } \mu_{A_1 \times \dots \times A_n}(x_1, x_2, x_3) = \min\{\mu_{A_1}(x_1), \dots, \mu_{A_n}(x_n)\} \quad (4.15)$$

4.7 Controlador difuso

El controlador difuso de la Figura 4.9 está constituido por 4 principales componentes, dicha estructura fue desarrollada por Lee, 1990: base de conocimiento, sistemas de codificación, sistemas de inferencia y sistemas de decodificación.

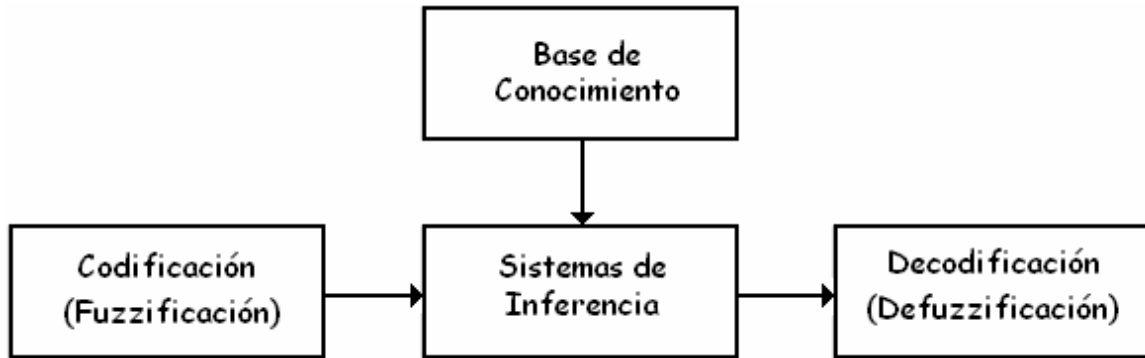


Figura 4.9. Estructura general de un controlador difuso.

4.7.1 Sistema de codificación

Bloque en el que cada variable de entrada se le asigna un grado de pertenencia a cada uno de los conjuntos que se ha considerado mediante las funciones características asociadas a estos conjuntos difusos. Las entradas a este bloque son valores concretos de las variables de entrada y las salidas son los grados de pertenencia a los conjuntos difusos considerados.

4.7.2 Base de conocimientos

Contiene el conocimiento asociado al dominio de la aplicación y los objetivos del control. Dicha base está formada por una base de datos y un conjunto de reglas difusas de control.

La base de conocimientos debe cumplir con dos objetivos fundamentales: el primero es proveer las definiciones necesarias para definir las reglas lingüísticas de control y la manipulación de información difusa en un control difuso, y la segunda almacena los objetivos y política de control (como experto en el dominio).

4.7.3 Sistemas de inferencia

Bloque mediante el cual los mecanismos de inferencia relacionan los conjuntos difusos de entrada y salida, y representa a las reglas que definen el sistema. Las entradas a este bloque son conjuntos difusos (grados de pertenencia) y las salidas son también conjuntos difusos, asociados a la variable de salida.

4.7.4 Sistema de decodificación

Bloque en el cual a partir del conjunto difuso obtenido en el mecanismo de inferencia y mediante los métodos matemáticos de defusificación, se obtiene un valor concreto de la variable de salida, es decir el resultado.

4.8 Control difuso de un convertidor SMC en lazo cerrado

En esta sección se discutirá el control en lazo cerrado aplicado en la regulación de la corriente de salida de un SMC.

4.8.1 Estrategia de control

Observando el gran contenido de interruptores que maneja el SMC de 3X2 (ver Figura 2.1) se da por comprendido que la obtención de una función de transferencia para un sistema de esas magnitudes tiende a ser muy complicada, mas aún, los múltiples estados de conmutación que se generan en dicha topología hacen ver que es un sistema no-lineal.

De esta manera se sugiere el uso de una estrategia de control basada en control difuso, dada la facilidad que ofrece dicho control, se propone el establecer diferentes reglas difusas basadas en la experiencia. De esta manera, se cae en el cuestionamiento de decidir que variable de salida regular (voltaje, corriente o potencia).

Existe una relación de proporcionalidad en el convertidor SMC de 3X2, dicha relación va ligada entre el voltaje de entrada, el voltaje de salida y la corriente de salida. Es decir, al dar una entrada de voltaje al SMC, se tiene una salida de voltaje que se ajusta a la Ecuación 2.12 en simulación, mas en la realidad, se presentan pérdidas ya sea por conmutación o por las mismas características de los semiconductores, las cuales aseguran la existencia de una ganancia que reduce la salida de voltaje y a su vez la de la corriente, puesto que ambas se encuentran en fase.

Ahora, si se alimenta el convertidor en un rango definido, se obtiene una serie de mediciones a la salida con un comportamiento de tipo lineal, tanto en voltaje como en

corriente de salida; tal como se justificara mas adelante. Visto de otra manera, se puede decir, que el producto de las variables de salida generara una potencia, la cual a su vez contará con un comportamiento de tipo lineal también. Así, la corriente de salida estará en función del voltaje de entrada y dado que la carga será fija, sólo se regulará la potencia a un valor asentado dentro de un rango previamente definido. Por lo que, la salida será manipulada por un cuarto factor, que en este caso es el ciclo de trabajo. En la Figura 4.10 se muestra un diagrama a bloques del control junto con el SMC de 3X2. El bloque de “control difuso” será alimentado por las señales de V_s , I_o y V_o , en donde las últimas dos conformarán la potencia de salida del circuito.

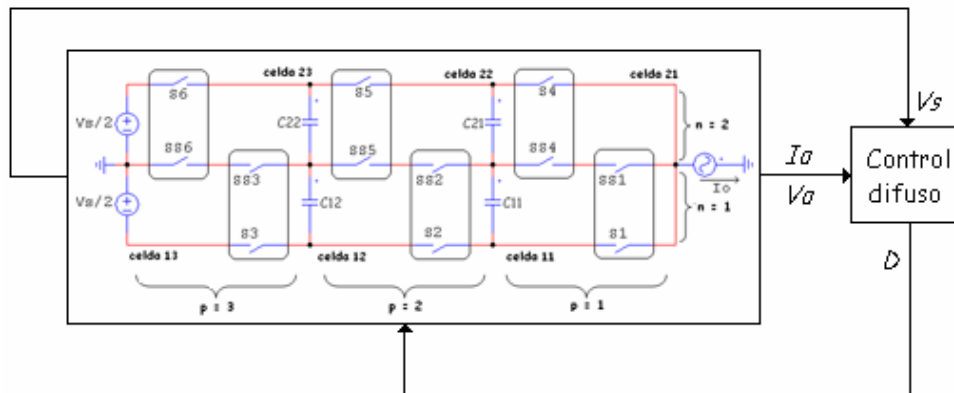


Figura 4.10. Diagrama a bloques del control difuso y el convertidor SMC de 3X2.

4.8.2 Definición de variables

El circuito SMC de 3X2 cuenta con una sola variable de entrada y dos de salida: el voltaje de la fuente (V_s), voltaje de salida (V_o) y corriente de salida (I_o) respectivamente.

El producto de las variables de salida da como resultado la potencia de salida (P_o). Como se mencionó en el apartado anterior, existe un comportamiento lineal en las variables de entrada como de salida, en las Figuras 4.11, 4.12 y 4.13 se presentan tres gráficas que justifican el comportamiento lineal del SMC de 3X2, dichas mediciones se lograron al simular durante múltiples ocasiones el SMC de 3X2 y lograr formar una base de datos capaz de justificar la linealidad mencionada. Los resultados observados son con diferentes ciclos de trabajo y con una carga fija de tipo resistiva.

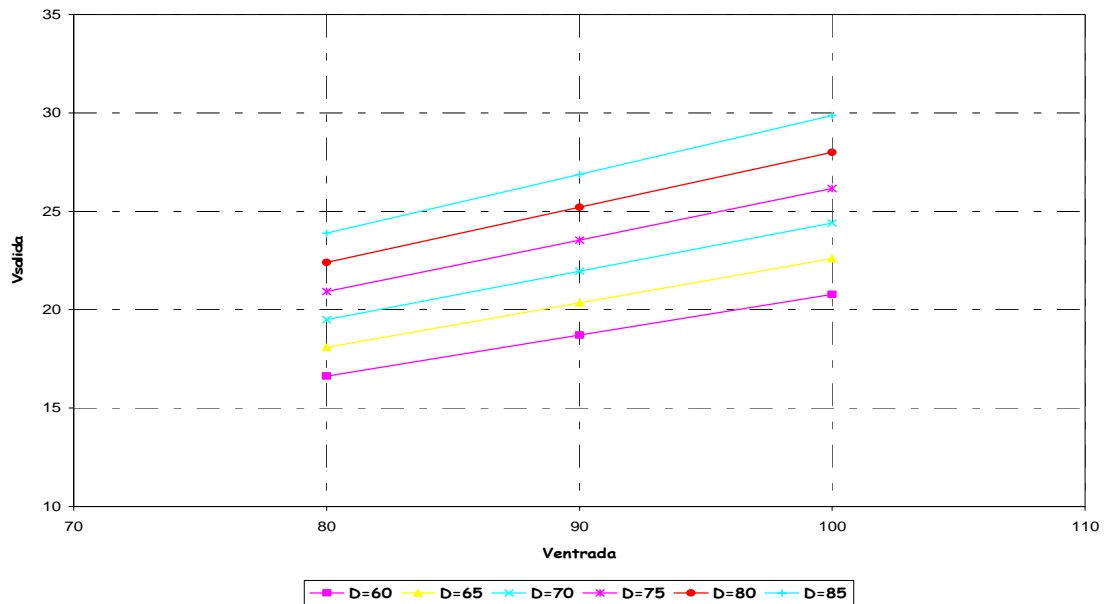


Figura 4.11. Voltaje de entrada contra voltaje de salida.

Para la Figura 4.11 se presenta el voltaje de entrada contra el voltaje de salida, obsérvese que en la gráfica los trazos son de forma lineal para los diferentes ciclos de trabajo (D), dichos ciclos están en función del color del trazo y la tabla que se ubica en la parte inferior a la gráfica.

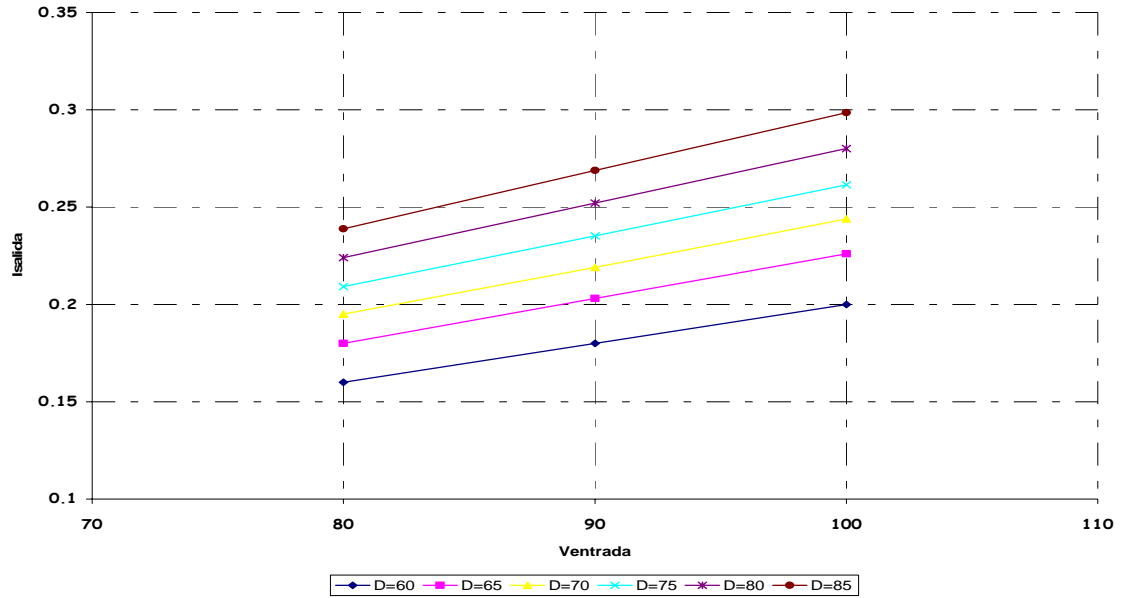


Figura 4.12. Voltaje de entrada contra corriente de salida.

En la Figura 4.12 se presenta el voltaje de entrada contra la corriente de salida, al igual que la Figura 4.11 se tienen trazos de forma lineal con diferentes ciclos de trabajo.

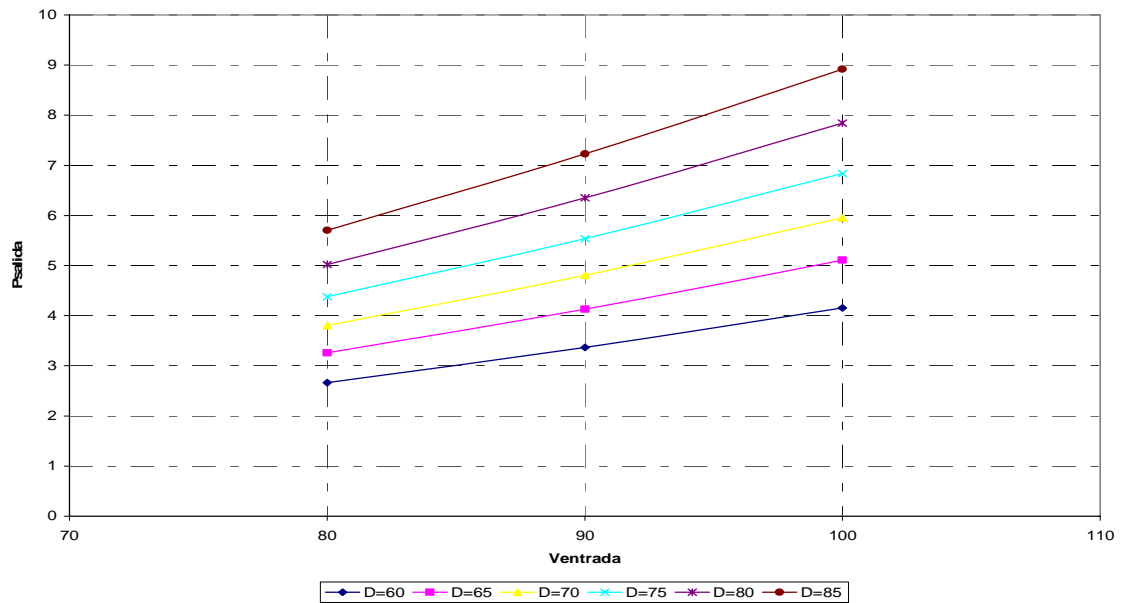


Figura 4.13. Voltaje de entrada contra potencia de salida.

Ahora, para la Figura 4.13 se muestra la relación de la potencia de salida contra el voltaje de entrada y se observa un comportamiento lineal para los diferentes ciclos de trabajo.

Las graficas anteriores muestran que el voltaje de entrada y ciclo de trabajo ayudan a regular el voltaje de salida y la corriente, es decir, la potencia de salida. Por lo que, se considerará como una variable de salida del sistema al ciclo de trabajo, ya que este será el elemento clave que ayude a regular el voltaje de entrada.

Se puede concluir que el SMC de 3X2 trabaja de forma lineal, lo que facilitará el estudio del control tanto para determinar las funciones de membresía, así como las reglas difusas que conforman la base de conocimientos.

4.8.3 Funciones de membresía

Como ya se justificó en el apartado anterior, se emplearán el voltaje de entrada y el producto del voltaje y la corriente de salida, es decir la potencia de salida; por lo que ahora estas variables serán definidas como las funciones de membresía. De modo que considerando lo dicho al final del apartado anterior, se cuenta también con el ciclo de trabajo como la otra función de membresía, finalmente se cuentan con tres funciones de membresía ya definidas para controlar el SMC de 3X2: voltaje de entrada, potencia de salida y ciclo de trabajo.

Ahora, es necesario definir el número de conjuntos (o cluster) que formarán cada una de las funciones de membresía, así que cada uno de los cluster contará con una etiqueta lingüística que la defina; estas etiquetas se asignaron con base en la resolución que se espera en la respuesta del control, es decir, a mayor número de clusters se reducen las posibilidades que el control funcione bajo su propia naturaleza y a menor número de cluster la teoría de control difusa toma sus criterios y otorga respuestas, por lo que no es conveniente el manejar un número exagerado de clusters.

Por ejemplo, para la potencia de salida se establecieron etiquetas como: muy bajo, bajo, nominal, alto y muy alto, las cuales dieran una idea de donde se ubican en el rango de corriente definido. Obsérvese las Figuras 4.14, 4.15 y 4.16 se muestran ordenados los clusters para cada función de membresía.

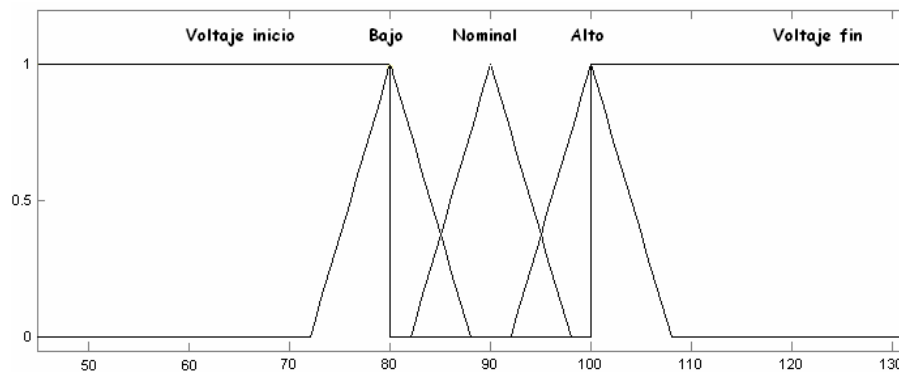


Figura 4.14. Voltaje de entrada.

En la Figura 4.14 se tiene la función de membresía para el voltaje de entrada, a la cual se le definieron cinco clusters: voltaje de inicio, bajo, nominal, alto y voltaje fin, tanto el primer y último cluster se definieron con una función de pertenencia diferente a la del

resto, esto debido a que se busca hacer que el SMC de 3X2 entre en funcionamiento a partir de ochenta volts y cese su actividad después de cien volts; esto se debe a que sólo se está regulando un rango del voltaje de entrada al que puede ser expuesto el inversor.

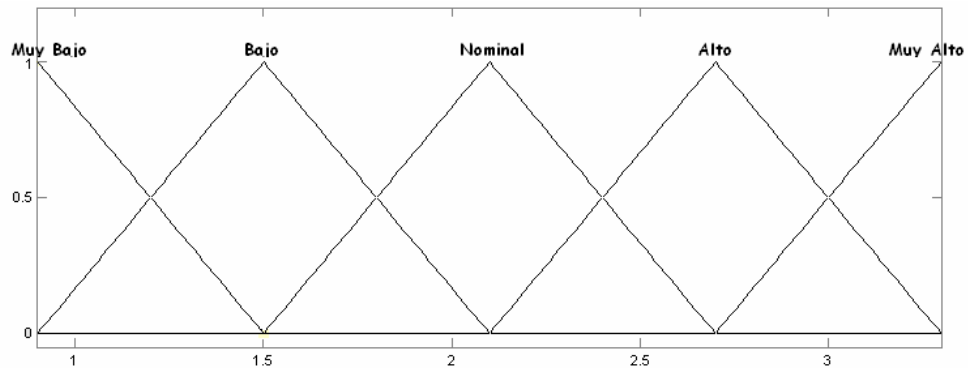


Figura 4.15. Potencia de salida.

Ahora, para la Figura 4.15 se muestran los cluster que conforman la función de membresía de la potencia de salida, como se muestra son cinco clusters: muy bajo, bajo, nominal, alto y muy alto, los cuales se muestran con una función de pertenencia de tipo triangular.

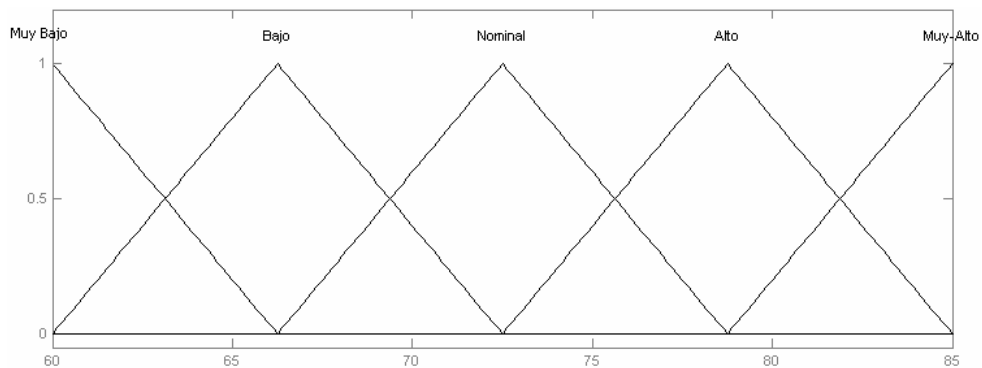


Figura 4.16. Ciclo de trabajo.

Para la última figura se presenta la función de membresía del ciclo de trabajo, se compone por cinco clusters, al igual que en la Figura 4.16 se cuenta con diferentes funciones de pertenencia, tales con el mismo objetivo para el caso de la Figura 4.16.

4.8.4 Fusificación de las variables de entrada

Como ya se mencionó en el apartado 4.7.1, la fusificación consiste en otorgar el grado de pertenencia a cada uno de los conjuntos, esto se logra empleando la técnica de triángulos semejantes.

Dicha técnica de triángulos semejantes se presenta en el apartado 4.5.1.1 (Figura 4.2), donde su representación matemática se señala con la función A . Ahora, tomando la función de membresía de la potencia de salida (Figura 4.15) y la técnica de triángulos semejantes se puede explicar de forma más clara esta técnica, ver Figura 4.17.

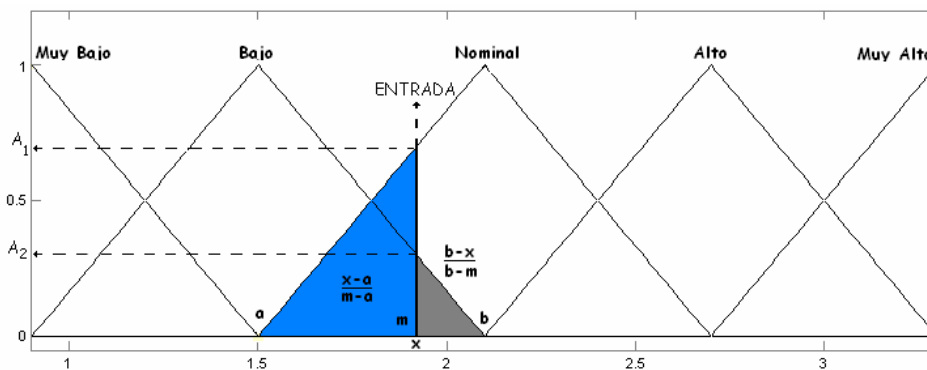


Figura 4.17. Triángulos semejantes en la función de membresía para la potencia de salida.

A cada entrada que se asigne al sistema se obtendrá una o dos pertenencias, tal es el caso de la Figura 4.17. La técnica de triángulos semejantes se ve representada por la acción de una entrada, la cual corta entre los clusters de nombre “nominal” y “bajo”, de tal manera que se forman un par de triángulos, uno de color azul y el otro gris, para ambos casos se muestra su ecuación con la cual se puede determinar el valor de su pertenencia en A_1 y A_2 , dicha ecuación se apoya en la Ecuación 4.5. De esta forma se logra la fusificación.

Para el caso del SMC de 3X2 se contará con dos funciones de membresía, una para la potencia de salida (μP_o) y otra para el voltaje de entrada (μV_s), las cuales se verán afectadas por la entrada, es decir que cada una de las variables de entrada tendrá que ser comparada con su respectivo espacio, de esta forma se sabrá a que cluster pertenecen.

4.8.5 Base de conocimientos difusa

La Tabla 4.1 muestra el conjunto de reglas difusas generadas a partir de un estudio de campo y una serie de simulaciones del SMC de 3X2. Dicha tabla es el punto de partida para la generación del conjunto de reglas sobre las cuales se rige la inferencia.

Voltaje entrada		Voltaje inicio	Baja	Nominal	Alta	Voltaje fin
Potencia salida	Muy Baja	Nominal	Muy Alta	Muy Alta	Alta	Nominal
	Baja	Nominal	Muy Alta	Alta	Alta	Nominal
	Nominal	Nominal	Alta	Nominal	Baja	Nominal
	Alta	Nominal	Baja	Baja	Baja	Nominal
	Muy Alta	Nominal	Muy Baja	Muy Baja	Muy Baja	Nominal

Tabla 4.1. Base de conocimientos difusa.

En la Tabla 4.1 se hace una comparación entre el voltaje de entrada y la potencia de salida, por lo cual la salida estará en función del ciclo de trabajo.

4.8.6 Método de inferencia

Existen diferentes métodos de inferencia dentro de la literatura de control difuso, dentro de los más comúnmente usados están los de Mamdani, Lusing Larson y Takagi-Sugeno-Kang.

El método que se empleará para la inferencia será el de Mamdani, dada la facilidad que presenta para su implementación, también es conocido como el método de “mínimo-máximo”, en donde, dicho método consiste en que cada pertenencia de cada conjunto debe ser comparada con cada pertenencia de los demás conjuntos de las variables de entrada, y al comparar, se debe guardar el valor mínimo de pertenencia entre ellos y se debe colocar en el conjunto del universo de salida que indica la regla [31].

A continuación se ejemplifica el proceso de inferencia:

Valores de entrada: el fusificador entrega los valores de las membresías para los diferentes clusters de cada espacio de entrada.

$\mu_{A_1}(x) = 0.7$, valor de membresía de la variable x en la entrada A , cluster 1.

$\mu_{A_2}(x) = 0.3$, valor de membresía de la variable x en la entrada A , cluster 2.

0, para el resto de los cluster del espacio A .

$\mu_{B_1}(y) = 0.4$, valor de membresía de la variable y en la entrada B , cluster 1

$\mu_{B_2}(y) = 0.6$, valor de membresía de la variable y en la entrada B , cluster 2

0, para el resto de los cluster del espacio B .

Aplicación de la regla: las pertenencias que existen se aplican sobre la base de conocimientos para saber en que cluster del espacio de salida se produce el consecuente de cierta combinación de antecedentes descritos en dichas reglas.

Regla 1: Si A_1 y B_2 entonces C_3

Regla 2: Si A_3 y B_1 entonces C_2

⋮

Regla n : Si X_n y Y_m entonces C_z

Leyendo las reglas como: si hay una membresía en el cluster “ n ” del espacio “ X ” y en el cluster “ m ” del espacio “ Y ”, entonces se da en el cluster “ z ” del espacio de salida “ C ”.

Membresía de salida: el valor de la membresía que se hereda al cluster de salida en cada regla cumplida, es el valor mínimo de las membresías de los clusters de los espacios de entrada que se involucran en la regla.

$\mu_{C_3}(z) = 0.6$, valor de membresía de la variable z en la salida C , cluster 3.

$\mu_{C_5}(z) = 0.3$, valor de membresía de la variable z en la salida C , cluster 5.

Formación del polígono: después de aplicar todas las reglas, se pueden tener varios valores de membresía para un mismo cluster del espacio de salida, si es que varias reglas heredaron en él. Además es necesario formar el polígono de salida que refleje el valor de las membresías a lo largo de los clusters del espacio de salida. Para obtener el producto final del proceso de inferencia, se hace un barrido por cada cluster, tomando siempre el valor máximo de membresía que presente cualquier regla. Entre clusters se debe tomar el valor de membresía al mayor de cada uno.

En la Figura 4.18 se muestra de forma gráfica como el método de inferencia Mandami logra la formación del polígono de salida.

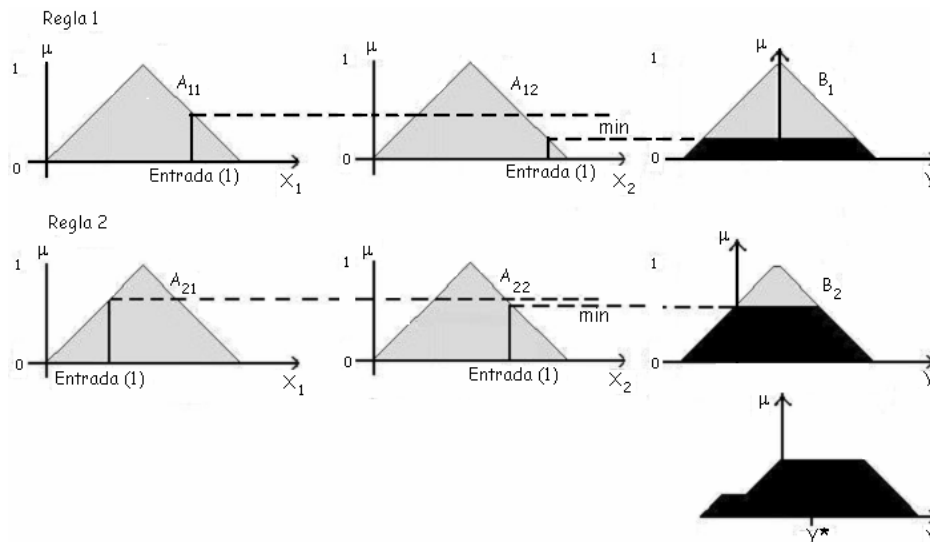


Figura 4.18. Método de inferencia máximo-mínimo (Mamdani).

4.8.7 Método de Defuzificación

El último bloque del proceso de control difuso es el de defusificación, para ello se emplea el método del centroide o centro de área. Dado el polígono (Figura 4.19) generado del proceso de inferencia se debe calcular el centro de gravedad, para esto existe la Ecuación 4.16. [31]

$$z^* = \frac{\int \mu_c(z)z \cdot dz}{\int \mu_c(z) \cdot dz} \quad (4.16)$$

En donde z^* , es el centroide.

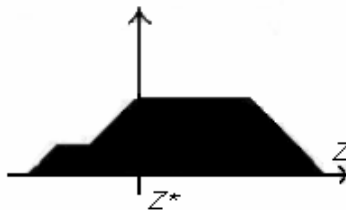


Figura 4.19. Método de centroide.

O bien, para el caso de sistemas discretos, se calcula el centroide discretizado con la Ecuación 4.17. [31]

$$z^* = \frac{\sum \mu_c(z)z}{\sum \mu_c(z)} \quad (4.17)$$

