

UNIVERSIDAD AUTONOMA DE NUEVO LEON

FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA
Y ELECTRICA

DIVISION DE ESTUDIOS DE POSGRADO



APLICACION DE LOGICA DIFUSA AL CONTROL
DE VOLTAJE EN ESTADO ESTABLE

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE MAESTRO
EN CIENCIAS DE LA INGENIERIA ELECTRICA
CON ESPECIALIDAD EN POTENCIA

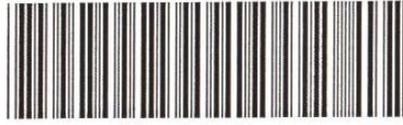
PRESENTA
MANUEL LEY MENDOZA

SAN NICOLAS DE LOS GARZA, N. L.
JUNIO DE 1999

APLICACION DE LOGICA DIFUSA AL CONTROL
DE LA ESTABILIDAD EN EL ESTADO

TM
Z5853
.M2
FIME
1999
L4

1999.



1020126383

UNIVERSIDAD AUTONOMA DE NUEVO LEON

FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA
Y ELECTRICA

DIVISION DE ESTUDIOS DE POSGRADO



APLICACION DE LOGICA DIFUSA AL CONTROL
DE VOLTAJE EN ESTADO ESTABLE

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE MAESTRO
EN CIENCIAS DE LA INGENIERIA ELECTRICA
CON ESPECIALIDAD EN POTENCIA

PRESENTA
MANUEL LEY MENDOZA

SAN NICOLAS DE LOS GARZA, N. L.
JUNIO DE 1999

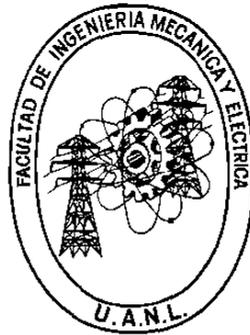
TM
25853
.M2
FINE
1999
L4

0131-64560



FONDO
TESIS

**UNIVERSIDAD AUTONOMA DE NUEVO LEON
FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA Y ELECTRICA
DIVISION DE ESTUDIOS DE POSGRADO**



**APLICACION DE LOGICA DIFUSA AL
CONTROL DE VOLTAJE EN ESTADO ESTABLE**

T E S I S

**QUE PARA OBTENER EL GRADO DE MAESTRO
EN CIENCIAS DE LA INGENIERIA ELECTRICA
CON ESPECIALIDAD EN POTENCIA**

P R E S E N T A

MANUEL LEY MENDOZA

San Nicolas de los Garza, N. L.

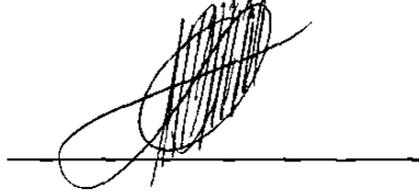
Junio de 1999

San Nicolas de los Garza, N.L., Junio de 1999

UNIVERSIDAD AUTONOMA DE NUEVO LEON
FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA Y ELECTRICA
DIVISION DE ESTUDIOS DE POST-GRADO

Los miembros del comité de tesis recomendamos que la tesis **APLICACION DE LOGICA DIFUSA AL CONTROL DE VOLTAJE EN ESTADO ESTABLE** realizada por el Ing. Manuel Ley Mendoza, matrícula 1036321 sea aceptada para su defensa como opción al grado de Maestro en Ciencias de la Ingeniería Eléctrica con especialidad en Potencia.

EL Comité de Tesis



Asesor

Dr. Oscar L. Chacón Mondragón



Coasesor

Dr. Ernesto Vázquez Martínez



Coasesor

Dr. Florencio Aboytes García



Vo. Bo.

M. C. Roberto Villarreal Garza
División de Estudios de Post-Grado

Dedicado con respeto y amor:

A mis padres *José Ley González* y *Matilde Mendoza de Ley* quienes me dieron la vida y que les debo agradecer lo que he llegado hacer en ella.

A mi esposa y compañera *María Magdalena Molina Campa* por su siempre incondicional apoyo, comprensión, amor y por permitirme formar parte de su vida.
¡GRACIAS AMOR!

A mi hermana *Chuy* por estarme cuidando y protegiendo siempre, **¡GRACIAS !**, dios te cuida te proteja donde te encuentres.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a *Dios* a mi santo patrono *San Judas Tadeo*.

A mis hermanos *Chuy, Loly, Nelly, Chito, Lupita, Yani, Martín, Lucy, Elba* y *Mimi*, les agradezco sencillamente por ser mis hermanos. *¡Gracias!* por su ejemplo a seguir. A mis *sobrinos* por permitirme la oportunidad de quererlos, a mis *cuñados* por sus sabios consejos y apoyo que me brindaron en el transcurso de mis estudios.

Con cariño a la *Familia López Medina*, por su amable atención en nuestra instancia en Monterrey y considerarnos como sus hijos.

A la *Familia* de mi esposa por permitirme formar parte de ellos.

Agradezco en forma muy especial a mis asesores *Dr. Oscar L. Chacón Mondragón, Dr. Ernesto Vázquez Martínez* por magnífica dirección en el desarrollo de esta tesis y al *Dr. Florencio Aboytes García* por su valiosa aportación y comentarios en la realización de este trabajo.

A todos mis *compañeros de doctorado*, en atención por su apoyo incondicional y valiosos comentarios que me ayudaron en esta etapa de mi vida y en el desarrollo de esta tesis.

A los *Profesores del DIE* que con su sabiduría y empeño, instruyeron y aumentaron mis conocimientos, además, de fomentar valiosos valores morales principalmente la solidaridad y compañerismo. Al *CONACYT* por su valioso apoyo económico.

En especial a una compañera fiel por permitirme desahogar mis momentos difíciles, sin escuchar en ningún momento un solo reproche de ella. Mi perra *Nenita*.

Junio, 1999.

RESUMEN

Publicación No. _____

Manuel Ley Mendoza, M. C: En Ingeniería Eléctrica

Universidad Autónoma de Nuevo León, 1999

Profesor Asesor : Dr. Oscar L. Chacón Mondragón

En el presente trabajo se expone una nueva alternativa de solución al problema de control voltaje en los sistemas eléctricos de potencia en estado de operación estable. Uno de los principales requerimientos de un SEP es mantener los voltajes dentro de un rango operativo. Existen diferentes acciones de control para cumplir este requerimiento, tales como: cambio de tap en transformadores, desconexión / conexión de bancos de capacitores o reactores, instalación de compensadores estáticos de vars y cambios de voltajes en generación. En esta investigación se utilizó la alternativa de controlar los cambios de los voltajes en los nodos de generación.

En este trabajo se mencionan diversas alternativas de solución para el problema de control voltaje como: coeficientes de sensibilidad (CS), sistemas expertos (SE), reglas heurísticas entre otras más, donde se ponen de manifiesto sus principales características, resaltando las ventajas y desventajas para cada una de ellas.

Para esta tesis la alternativa propuesta consiste en un sistema de lógica difusa (SLD), el objetivo principal es mostrar su aplicación al problema de control de voltaje en estado estable. Los resultados obtenidos de la aplicación de esta metodología son comparados con los obtenidos por un estudio de Flujos Optimos con una función objetivo de Minimización de Pérdidas (FOMP), para este análisis se utilizó el sistema de 9 nodos del IEEE. Los resultados

obtenidos muestran que el sistema de lógica difusa desarrollado tiene potencial para la solución de este problema.

Los casos de prueba utilizados para el análisis del desempeño del **SLD** consistieron en variaciones de carga y desconexión de líneas de transmisión en el sistema de prueba de 9 nodos del IEEE.

INDICE

Agradecimientos	iv
Resumen	v
Lista de Figuras	xi
Lista de Tablas	xii

CAPITULO 1

INTRODUCCION

1.1	Introducción	1
1.2	Problema de control de voltaje	2
1.3	Alternativas de solución	4
1.4	Metodología propuesta	6
1.5	Objetivo de la tesis	8
1.6	Estructura de la tesis	8

CAPITULO 2

PROBLEMA DE CONTROL DE VOLTAJE EN ESTADO ESTABLE

2.1	Introducción	10
2.2	Conceptos básicos de control de voltaje	11
	2.2.1 Relación entre el flujo de reactivos y el control de voltaje	11
	2.2.2 Ecuaciones de flujo de potencia reactiva	13
	2.2.3 Control de voltaje local	15
	2.2.4 Control de voltaje en nodos de carga	19
2.3	Definición del problema de control de voltaje en estado estable	20
2.4	Ecuaciones del modelo Q - V	22
2.5	Coefficientes de sensibilidad del modelo Q - V	24

INDICE (Continuación)

2.6	Cambio de voltaje en un nodo de carga al variar un voltaje en generación	25
2.7	Conclusiones	28

CAPITULO 3

INTRODUCCION A LOS CONJUNTOS DIFUSOS Y LOGICA DIFUSA

3.1	Introducción	29
3.2	Conceptos básicos de conjuntos difusos	29
3.2.1	Definiciones	30
3.2.2	Operadores de conjuntos difusos unión, disyunción y complemento	31
3.2.3	NORMAS-T y CONORMAS-T	32
3.2.4	Relaciones difusas y sus composiciones	34
3.3	Conceptos básicos de lógica difusa	34
3.3.1	Variables lingüísticas	36
3.3.2	Modus ponens generalizado	37
3.3.3	Implicaciones difusas	38
3.4	Operación del SLD	39
3.5	Conclusiones	43

CAPITULO 4

SISTEMA DE LOGICA DIFUSA

APLICACION AL CONTROL DE VOLTAJE DEL SEP

4.1	Introducción	44
4.2	Estructura de un sistema de lógica difusa (SLD)	44
4.2.1	Parámetros de un SLD	46
4.2.2	Estrategias de fusificación	46

INDICE (Continuación)

4.2.3	Base de conocimientos como reglas	49
4.3	Aplicación de lógica de operación del SLD	51
4.4	Determinación del perfil de voltaje del SEP	53
4.5	Etapas del SLD	53
4.5.1	Fusificación de los voltajes de los nodos de carga	54
4.5.2	Evaluación de reglas	55
4.5.3	Desfusificación de salida	61
4.6	Evaluación de la solución	62
4.7	Conclusiones	63

CAPITULO 5

RESULTADOS DE LA APLICACION DEL SLD EN EL CONTROL DE VOLTAJE EN SISTEMAS ELECTRICOS DE POTENCIA

5.1	Introducción	64
5.2	Metodología de análisis de resultados	64
5.3	Sistema de 9 nodos del IEEE	65
5.4	Caso 1: Aumento de carga en un nodo del sistema	67
5.5	Caso 2: Aumento de carga en todos los nodos de carga del sistema	70
5.6	Caso 3: Desconexión de una línea	72
5.7	Caso 4: Desconexión de carga	74
5.8	Conclusiones del capítulo	75

CAPITULO 6

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1	Introducción	77
6.2	Conclusiones	78

INDICE (Continuación)

6.3	Aportaciones	79
6.4	Recomendaciones para investigaciones futuras	80
	REFERENCIAS	81
	APENDICE	84
	SISTEMA DE LOGICA DIFUSA	

LISTA DE FIGURAS

2.1	Circuito básico. Diagrama unifilar (a) y diagrama fasorial (b)	11
2.2	Diagrama fasorial para carga con potencia atrasado	12
2.3	Conexión de dos nodos a través de una reactancia	14
2.4	Control de voltaje primario	15
2.5	Soporte de voltaje mediante control de voltaje local	16
2.6	Sistema de potencia elemental	17
2.7	Sistema de potencia de cinco nodos	26
3.1	Representación de conceptos de conjuntos difusos y lógica difusa	31
3.2	Funciones membresía de un conjunto calificativo de la variable lingüística voltaje	37
3.3	Representación esquemática del razonamiento Mamdani	41
3.4	Método de defusificación del centro del área	43
4.1	Diagrama de bloques de un SLD	45
4.2	Tipos de funciones membresía	48
4.3	Estructura general del SLD	52
4.4	Diagrama de flujo de información para el control de voltaje propuesto	53
4.5	Fusificación de los voltajes de los nodos de carga	54
4.6	Operadores difusos	58
4.7	Grados de membresía obtenidos en la etapa de fusificación	60
4.8	Proceso de evaluación de una regla	61
4.9	Proceso de defusificación mediante el método de centroide	62
5.1	Sistema de 9 nodos del IEEE	66
5.2	Perfil de voltajes obtenidos en Caso 1	70
5.3	Perfil de voltajes obtenidos en Caso 2	72
5.4	Perfil de voltajes obtenidos en Caso 3	74

LISTA DE TABLAS

5.1	Parámetros del sistema (p.u.)	66
5.2	Datos iniciales de nodos (p.u.)	67
5.3	Resultados para el Caso 1	68
5.4	Resultados para el Caso 1 en las potencias P y Q	69
5.5	Resultados para el Caso 2	71
5.6	Resultados para el Caso 2 en las potencias P y Q	71
5.7	Resultados para el Caso 3	73
5.8	Resultados para el Caso 3 en las potencias P y Q	74
5.9	Resultados para el Caso 4 (solución por SLD)	75

CAPITULO 1

INTRODUCCION

1.1 Introducción

Hoy en día existe una gran diversidad de áreas en las que se han hecho aplicaciones de las técnicas de Inteligencia Artificial (IA), tales como simulación sensorial, robótica, sistemas expertos, lenguajes naturales, redes de neuronas, lógica difusa, ..., etc., en las cuales se estudia de manera sistemática el comportamiento inteligente, con el fin de imitar o simular las habilidades humanas mediante la creación y utilización de máquinas y computadoras. Estas buscan reproducir el razonamiento, aprendizaje, capacidades mecánicas y sensoriales del ser humano, para su aplicación en la solución de problemas en la industria [7,16].

Actualmente se han implementado aplicaciones de IA para la solución de problemas en sistemas eléctricos de potencia (SEP) [3,4,9,25,27]; algunas de estas aplicaciones son el diagnóstico de ubicación de fallas, detección de fallas, planeación de expansión de redes eléctricas, estimación de estado y pronóstico de carga entre otras más[19,20,22,26,28].

Un problema común en sistemas eléctricos de potencia es el control de voltaje/potencia reactiva, el cual consiste en mantener el voltaje en todos los nodos dentro de un rango de variación del ($\pm 5\%$) voltaje nominal. Existen diferentes estrategias de control para mantener el voltaje de los nodos dentro de este rango, como son la conexión/desconexión de reactores y bancos de capacitores, instalación de compensadores estáticos de VAR's, cambios de taps en transformadores y cambios de voltaje de generación entre otras, y su uso esta en dependencia de las características del sistema eléctrico de potencia.

La solución para el problema del control de voltaje que se plantea en esta tesis es el desarrollo de un Sistema de Lógica Difusa (SLD) basado en el cambio de voltaje en los nodos de generación de un SEP.

Existen métodos de solución analítica para el problema de control de voltaje en sistemas de potencia en operación. En estos métodos se desarrollan algoritmos con un alto grado de complejidad en su formulación matemática, aumentando su complejidad con restricciones impuestas al sistema y considerando problemas de gran escala. La solución de estos problemas no es trivial. Ambas características, complejidad y gran escala, dificultan la efectividad de estas metodologías, razón por la cual se han aplicado diversas alternativas para la solución al problema de control de voltaje/potencia reactiva, como son sistemas de base de conocimientos, reglas heurísticas, sistemas expertos y aplicación de conjunto difusos, etc. [6,10,11,13,15].

La alternativa propuesta en esta tesis consiste en el diseño de un SLD; éste analiza los voltajes violados en nodos de carga y utiliza una base de conocimientos (formado por un conjunto de reglas), con las cuales propone un cambio de voltaje en generación, para mantener un perfil de voltaje adecuado. Los voltajes violados y los cambios de voltaje en generación se modelan en base a conjuntos difusos.

El objetivo principal de esta tesis es demostrar las bondades de la alternativa propuesta para el problema de control de voltaje en estado estable. En esta investigación se utilizó el sistema de 9 nodos del IEEE.

1.2 Problema de control de voltaje

En [5,8,11], se establece que en la operación de sistemas de potencia, el control de voltaje es una función prioritaria. El objetivo de este control es ajustar todos los voltajes nodales dentro de una banda operativa, para lo cual se utilizan diferentes dispositivos de control, del sistema de potencia, como bancos de capacitores, reactores en derivación,

transformadores con tap, y sistemas de excitación en generadores entre otros, etc. El mantener al voltaje en límites operacionales hace que la solución del problema sea más compleja, comparada con el control de la frecuencia, en estado estable se tiene un único valor de frecuencia en todo el sistema, mientras que los voltajes nodales pueden ser diferentes.

El comportamiento de la potencia reactiva es no lineal. Cuando un nodo en un sistema de potencia tiene un voltaje anormal, ya sea bajo o alto, las estrategias de control más comunes son la conexión o desconexión de un banco de capacitores o reactores, las modificaciones a las posiciones del taps del transformadores, o la variación el voltaje en nodos de generación, para restablecer un perfil de voltaje apropiado ($V_i \approx 1.0 p.u.$).

En condiciones de bajo voltaje, la inserción de banco de capacitores o condensadores síncronos proporcionan potencia reactiva al sistema, incrementando los voltajes en los nodos de carga. En el caso de transformadores, el cambio de tap modifica la magnitud del voltaje, ocasionando un incremento o decremento de la potencia reactiva inyectado al sistema. Similarmente, un alto voltaje en un nodo de generación incrementa la inyección de potencia reactiva, mejorando el perfil de voltaje en el sistema [5]. En general, en condiciones normales de operación del sistema de potencia, los límites de voltajes en los nodos de carga son de ± 5 % con respecto al voltaje nominal.

El control de voltaje es importante para los SEP, teniendo como objetivo principal el mantener a los nodos de carga dentro de los límites de una banda operativa. La alternativa propuesta en esta tesis es utilizar lógica difusa, una de las áreas de IA, para el control de voltaje, ya que da solución al problema de una forma flexible y eficiente

En este proyecto se analiza el problema de control de voltaje en estado estable, utilizando como estrategia de control la variación de los voltajes de generación. Esta estrategia de control se realiza a través de un sistema de lógica difusa (SLD), el cual, a partir de la información de los voltajes violados en los nodos de carga, se determina el cambio

necesario en voltajes de generación, para mantener un mejor perfil de voltaje en el sistema de potencia, dentro de los límites operativos.

1.3 Alternativas de solución

Existen diferentes alternativas para la solución del problema de control de voltaje en estado estable en SEP, como estudios de flujo aplicando de coeficientes de sensibilidad (CS), flujos óptimos (FO) utilizando diferentes métodos de optimización [14] y la aplicación de diversas áreas de la IA, como reglas heurísticas, reglas-base, sistemas expertos (SE) y aplicación de conjunto difusos.

El análisis de sensibilidad es una alternativa ampliamente utilizada; Carlos Pérez R. (UANL 1990) [11], utiliza la matriz de sensibilidad con la finalidad de poder realizar un estudio del sistema ante pequeños cambios en las variables independientes (o de control), sin la necesidad de realizar un estudio de flujos completo. En el estudio de sistemas eléctricos, el conocer los efectos de algunas variables de control sobre el estado de las variables eléctricas, proporciona información valiosa para la operación del sistema de potencia. El análisis de sensibilidad se puede realizar por medio de un estudio flujos, o mediante expresiones analíticas.

Una desventaja de esta alternativa, es que la matriz de sensibilidad, es válida sólo para pequeñas variaciones alrededor del punto de operación, es decir, mientras no cambie la topología del sistema de la red. Si por algún evento, el sistema sufre un cambio en la topología o tiene un cambio grande en generación, se deberá calcular nuevamente la matriz de sensibilidad que corresponda a la nueva red del sistema. El utilizar la matriz de sensibilidad representa un estudio altamente combinatorio para lograr una solución satisfactoria en el problema de control de voltaje.

Otra alternativa para la solución de este problema es la aplicación de técnicas de programación lineal o no lineal para minimizar las violaciones de voltaje en los nodos de un

SEP [14]; se pueden proponer diferentes objetivos de acuerdo a cada caso, tales como maximizar potencia reactiva en el sistema, minimizar el número de acciones de control para mantener a los voltajes del sistema dentro de un rango de operativo ó el minimizar pérdidas de potencia activa entre otras. En [2] se define una función objetivo donde se expresan los cambios en las variables de control disponibles. En este caso el objetivo es minimizar el número de cambios de tal forma que se mantengan los voltajes del sistema dentro de los límites operativos.

En 1986, Chen-Chien Liu [9], desarrollo un sistema experto para el control de voltaje (VCES) en la Universidad de Washington. En este trabajo se aplicaban reglas heurísticas para el control de potencia reactiva/voltaje de un sistema de potencia, donde los conocimientos empíricos del SE, se obtienen del personal de operación, al seleccionar las acciones de control que solucionan eficientemente los problemas de voltajes alto y/o bajos.

Este sistema (VCES), cuenta con un programa que evalúa las reglas para identificar inconsistencias en los resultados del sistema; sin embargo, el número total de posibles reglas encadenadas es enorme, lo que dificulta el proceso de validación de la base de conocimientos. Resultados preliminares acerca de la evaluación de VCES son dados por Liu 1987, utilizando el sistema de 30 nodos del IEEE. En este trabajo la evaluación de esta metodología propuesta se basa en dos criterios principales: la calidad de la solución y la eficiencia del procesamiento.

La principal limitación de VCES se localiza en la evaluación de las reglas heurísticas en condiciones anormales de operación, caracterizadas por voltajes cercanos a los límites de operación permitidos, ya que las reglas heurísticas están diseñadas para la corrección de pequeñas variaciones de voltajes.

El uso de SE presenta desventajas como el trabajar bajo ciertos lenguajes de programación, ó el que la evaluación de las reglas se deba realizar en cierto orden, lo que requiere de una estructura altamente eficiente en la base de conocimientos. Así, la eficiencia

del SE depende de la calidad de los conocimientos, lo que requiere el uso de algoritmos de identificación de inconsistencias.

En [27] Ching – Tzong y Chien – Tung Lin, utilizaron la teoría de conjuntos difusos para establecer una nueva metodología sobre el control de potencia reactiva/voltaje en los sistemas de potencia. El propósito en este trabajo fue aumentar la seguridad de voltaje en sistema de potencia. Para ello, se utilizan conjuntos difusos para modelar dos variables lingüísticas: nivel de violación del nodo y capacidad de control del dispositivo, utilizadas para medir el perfil de voltaje del sistema, y establecer una estrategia de control para satisfacer una cierta condición de operación dada.

La característica principal de este proyecto fue un aumento permanente de la seguridad en sistemas de potencia, utilizando un control óptimo de potencia reactiva/voltaje, para mejorar los perfiles de voltaje.

Esta última alternativa permite ampliar el campo de investigación sobre la aplicación de lógica difusa para la solución del problema de control de voltaje, utilizando los diferentes dispositivos de control con que cuenta el sistema de potencia. Por esta razón, esta tesis se enfoca al diseño de un SLD para el control de voltaje en estado estable de sistemas de potencia, utilizando como estrategia de control, cambios en los voltajes de los nodos de generación.

1.4 Metodología propuesta

El problema de control de voltaje de SEP en estado estable en cualquier acepción, es muy complejo en su representación, mediante un modelo matemático y en consecuencia computacionalmente costoso; por esta razón, se propone el uso de lógica difusa para caracterizar el problema en base al comportamiento de las variables eléctricas del SEP. Para ello se utilizan conjuntos difusos para modelar y desarrollar un SLD, de manera de evaluar el

nivel de violación de voltaje en los nodos de carga y proponer los cambios adecuados en el voltaje de los nodos de generación.

En este trabajo se considera como objetivo único el controlar los voltajes en los nodos de carga dentro de límites operativos sin ninguna otra consideración de restricciones u objetivo adicional.

La variable correspondiente al nivel de violación de voltaje fue representada por cinco funciones de membresía V_{mb} , V_b , V_n , V_a , V_{mb} (ver apéndice A.1), que corresponde a valores lingüísticos de *voltaje muy bajo*, *voltaje bajo*, *voltaje nominal*, *voltaje alto* y *voltaje muy alto* respectivamente. De manera similar la variable de cambios de voltaje en los nodos de generación fue representada por cinco funciones membresía $DAVg$, DVg , $IMVg$, IVg y $LAVg$ correspondientes a *decremento alto de voltaje en generación*, *decremento de voltaje en generación*, *incremento medio de voltaje en generación*, *incremento de voltaje en generación* y *incremento alto de voltaje en generación* respectivamente.

Para las variables que definen el nivel de violación de voltaje y los cambios de voltaje en nodos de generación, los universos de discurso seleccionados son los intervalos 0.9 a 1.1 y 0.94 a 1.06 p.u. respectivamente, los cuales incluyen los límites de voltajes operativos para los nodos de carga y nodos de generación del SEP en estado estable.

Las reglas contenidas en la base de conocimientos forman las estrategias de control del SLD propuesto. Este conjunto de reglas se generan mediante simulaciones con el sistema de prueba de nodos del IEEE, sintonizando las funciones de membresía y evaluando las reglas de control propuestas. Una regla se constituye del par de declaraciones SI-ENTONCES; la primera describe estados anormales del sistema (SI) y la segunda describe las acciones de control a ser ejecutadas (ENTONCES). El resultado de la evaluación de las reglas es una salida difusa, la cual se defusifica para determinar los valores exactos de las acciones de control (incremento o decremento en los voltajes de generación), con lo cual se estima corregir el problema de voltaje en los nodos de carga [24].

Para obtener información del estado del sistema (con relación a los voltajes), se realiza un estudio de flujos para determinar los nodos de carga con violación de voltajes. Esta información constituyen los datos de entrada al **SLD**, los cuales se fusifican utilizando funciones membresía del nivel de violación de voltajes en los nodos de carga. Con esta información se evalúa las reglas (base de conocimientos de la operación del sistema) obteniendo una salida difusa, la cual se defusifica para obtener los incrementos positivos o negativos de voltajes en nodos de generación utilizando las funciones de membresía correspondientes. Estos nuevos voltajes de generación se utilizan para realizar un nuevo estudio de flujos. Si el problema persiste, el sistema determina un nuevo cambio en voltajes de nodos de generación. Este **SLD** se simulará con ayuda de la herramienta computacional MATLAB, con la cual se realizarán estudios para distintos eventos de un sistema de potencia seleccionado. Resultados obtenidos muestran que la aplicación de lógica difusa es una buena alternativa para la solución a este problema.

1.5 Objetivo de la tesis

El objetivo de esta investigación es mostrar las bondades del uso de lógica difusa para el control de voltaje en estado estable en un SEP. Con este fin, se analiza el comportamiento de este método ante eventos tales como: desconexión de una línea, aumento de carga, desconexión de carga, etc., que desplazan los voltajes en los nodos, fuera del rango de variación $\pm 5\%$ del voltaje nominal.

1.6 Estructura de la tesis

En el capítulo 1, se presenta un breve resumen del problema de voltaje y los antecedentes a la solución de este, así como el objetivo y una breve descripción de la estructura de la tesis.

Para el capítulo 2 se presenta el concepto y la formulación matemática del problema de control de voltaje en estado estable, así como la descripción del uso de coeficientes de sensibilidad del modelo Q - V para la solución del problema.

En el capítulo 3 se presentan los conceptos básicos de conjuntos difusos y lógica difusa, las operaciones básicas con conjuntos difusos y distintos métodos de inferencia que se pueden utilizar para un **SLD**.

Para el capítulo 4 se describe la estructura general de un **SLD**, incluyendo la definición de las funciones membresía y la base de conocimientos. Así mismo, se establece la aplicación de lógica difusa al control de voltaje en la operación de un sistema de potencia.

En el capítulo 5 se muestra la aplicación del **SLD** ante diferentes contingencias demostrando que la metodología propuesta es efectiva. Los resultados son comparados con los obtenidos por flujos óptimos para minimización de pérdidas (**FOMP**); se analizan los voltajes en nodos de carga obtenidos por ambos métodos para establecer las bondades de la lógica difusa en la solución del problema de control de voltaje en estado estable.

En el capítulo 6 se presentan las conclusiones obtenidas en la aplicación de lógica difusa al control de voltaje en estado estable en SEP; se describen las ventajas y limitaciones del **SLD** desarrollado. Así mismo, se hace un conjunto de recomendaciones para continuar los trabajos de investigación enfocados a eliminar las limitaciones del **SLD**.

Finalmente, la tesis cuenta con un apéndice, en el se enumera las reglas de la base de conocimientos del **SLD** que describen la estrategia de control utilizada.

CAPITULO 2

PROBLEMA DE CONTROL DE VOLTAJE EN ESTADO ESTABLE

2.1 Introducción

En la operación de sistemas de potencia el control de voltaje es una función de prioritaria. El objetivo de este control es de ajustar todos los voltajes nodales dentro de una banda operativa. Esto hace que la solución del problema sea más compleja, comparada con el sistema, ya que se trata de un problema multivariable donde todos los voltajes nodales pueden ser diferentes.

En el problema de control de voltaje se relaciona el flujo de potencia reactiva con el perfil de voltaje de sistema, siendo muy importante la localización de fuentes de potencia reactiva y la estructura del sistema de transmisión. Además de ello, la generación y el consumo de potencia reactiva en elementos de transmisión y transformación es variable y depende de la condición de operación del sistema.

Existen diferentes formas de solución del problema de control de voltaje/potencia reactiva para mantener un perfil adecuado de voltaje de la red y utilizar eficientemente las fuentes de potencia reactiva. Existen diversas estrategias para la corrección del problema de control de voltaje/potencia reactiva, algunas de las cuales se han implementado en distintas aplicaciones, utilizando el análisis de sensibilidad [11], reglas heurísticas [9], sistemas expertos [6,9,13], reglas base [9], etc. El objetivo de cada una de estas aplicaciones es la toma de decisiones en lo que respecta a las posibles acciones de control que permitan mantener el perfil adecuado de voltaje en el sistema.

En este proyecto se resuelve el problema de control de voltaje en estado estable, utilizando como estrategia de control la variación de los voltajes en nodos de generación.

Esta estrategia de control se realiza a través de un sistema de lógica difusa (SLD), el cual, a partir de la información de los voltajes violados en nodos de carga fuera de límites operativos, determina el cambio necesario en los voltajes de generación para mantener un mejor perfil de voltaje en el sistema de potencia; es importante indicar que el mejorar el perfil de voltaje en un sistema eléctrico de potencia trae consigo una reducción de pérdidas por transmisión de potencia reactiva [29,5].

2.2 Conceptos básicos de control de voltaje

En las siguientes secciones se describen los conceptos básicos asociados al problema de control de voltaje en un sistema eléctrico de potencia.

2.2.1 Relación entre los flujos de reactivos y el control de voltaje

Es común en la literatura asociar el problema de voltaje con la circulación de potencia reactiva. Esto se puede demostrar analizando el circuito de la Fig. 2.1.

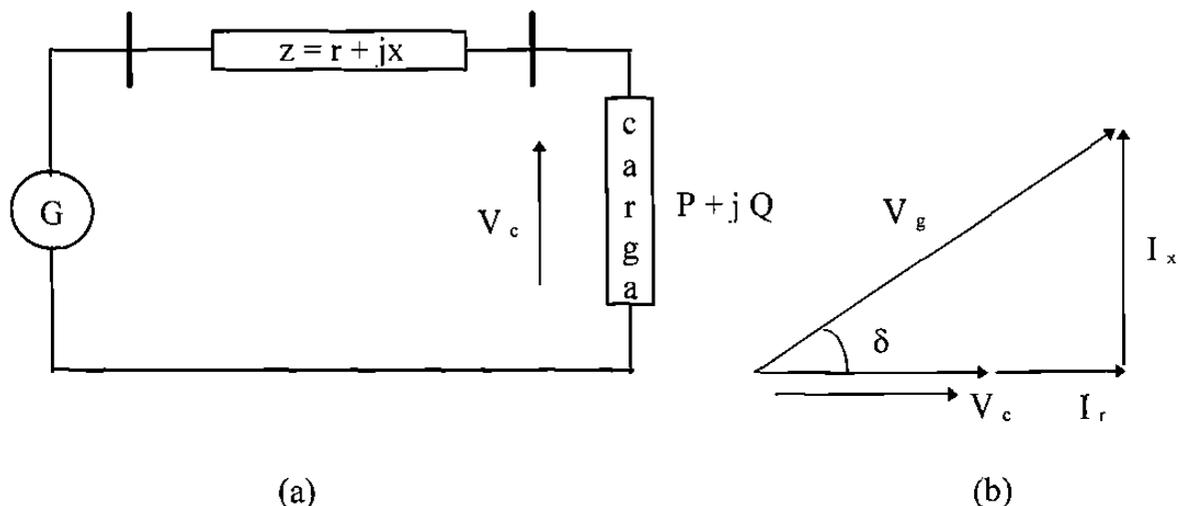


Fig. 2.1. Circuito básico. Diagrama unifilar (a) y diagrama fasorial (b).

Considerando que la carga solo consume potencia activa, se tiene:

$$V_g^2 = \left(V_c + \frac{P}{V_c} r \right)^2 + \left(\frac{P}{V_c} x \right)^2 \quad (2.1)$$

de donde, considerando ángulos pequeños, se tiene:

$$\delta \cong \frac{P}{V_c V_g} x \quad (2.2)$$

$$V \cong \frac{P}{V_c} r \quad (2.3)$$

El análisis de las ecuaciones (2.2) y (2.3) muestra que la carga activa afecta en mayor grado el desfaseamiento entre los voltajes y que el cambio del voltaje depende del valor de la carga, pero su efecto se reduce debido al valor de la resistencia [5]. En el caso de que la carga de la Fig. 2.1 demande potencia reactiva inductiva (factor de potencia en atraso), se tiene el diagrama fasorial de la Fig. 2.2.

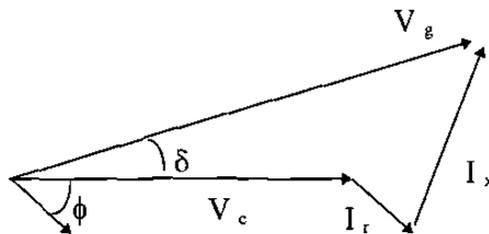


Fig. 2.2. Diagrama fasorial para carga con factor de potencia atrasado.

donde :

$$V_g^2 = \left(V_c + \frac{P}{V_c} r + \frac{Q}{V_c} x \right)^2 + \left(\frac{P}{V_c} r - \frac{Q}{V_c} x \right)^2 \quad (2.4)$$

Al analizar la ecuación (2.4) en combinación con la Fig.2.2 se concluye que la componente en fase con el voltaje de carga es la que tiene mayor efecto en la caída de voltaje del punto de generación a la carga, es decir:

$$\Delta V = \frac{P}{V_c} r + \frac{Q}{V_c} x \quad (2.5)$$

donde se observa que la demanda de potencia reactiva tiene mayor efecto debido a que está multiplicada por la reactancia del elemento de transmisión. Comparando los términos en (2.5) se obtiene:

$$\alpha = \frac{\frac{Q}{V_c} x}{\frac{P}{V_c} r} = \frac{P}{Q} \left(\frac{x}{r} \right) \quad (2.6)$$

De aquí que a medida que la relación x/r aumenta (sistemas de transmisión en alta tensión) y que el factor de potencia difiere más de la unidad, el efecto de la corriente reactiva es mayor al cambio de voltaje.

Analizando el diagrama de la Fig. 2.2 se observa que el ángulo entre el voltaje de generación y la corriente es $(\phi + \delta)$, lo cual indica que el generador opera con un factor de potencia más atrasado que el de la carga. En este caso se debe generar y transmitir la potencia reactiva de la carga y la potencia reactiva que consume el sistema de transmisión.

2.2.2 Ecuaciones de flujo de potencia reactiva

Si se consideran dos nodos unidos por una reactancia (Fig. 2.3), el flujo de potencia reactiva se puede expresar en función de las magnitudes de voltaje y la diferencia angular.

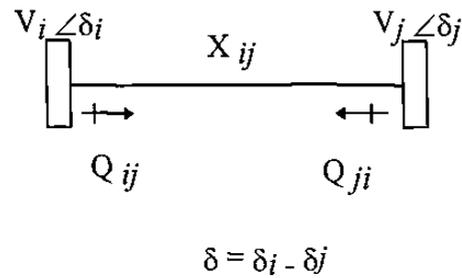


Fig. 2.3. Conexión de dos nodos a través de una reactancia.

La expresión resultante para flujo de i a j es la siguiente

$$Q_y = \frac{V_i}{X_y} = (V_i - V_j \cos \delta) \quad (2.7)$$

En (2.7) se observa que el flujo de potencia reactiva depende del signo de la diferencia de las magnitudes de voltaje entre los extremos de los elementos. De esta manera, para diferencias angulares pequeñas, la potencia reactiva tenderá a circular del voltaje mayor al voltaje menor. El consumo de potencia reactiva en el elemento de transmisión se obtiene sumando los flujos en direcciones opuestas:

$$Q_p = Q_y + Q_{ji} \quad (2.8)$$

y de acuerdo a (2.7) se obtiene:

$$Q_p = \frac{V_i^2}{X_y} + \frac{V_j^2}{X_y} - \frac{2V_i V_j}{X_y} \cos \delta \quad (2.9)$$

Las consumo reactivo en (2.9) depende en forma aproximada de la diferencia de voltajes al cuadrado. De esta forma, el consumo de reactivos en la reactancia tiene un

comportamiento no lineal, que se incrementa a medida que se tiene una diferencia mayor entre los voltajes de los nodos.

2.2.3 Control de voltaje local

De acuerdo a los conceptos básicos presentados se puede concluir que para evitar la degradación del perfil de voltaje es necesario eliminar o reducir el flujo de potencia reactiva en el sistema. Sin embargo, en sistemas reales las fuentes de reactivos no necesariamente están cerca de la carga, de ahí que se requiera cierto transporte de potencia reactiva.

La primera fase en el control de voltaje es tener nodos de voltaje controlado que definan en forma general el perfil de voltaje del sistema. Este control de voltaje es de tipo local y trata de mantener el voltaje en un nodo especificado. Esto se logra a través de cambios en la inyección de potencia reactiva, mediante la acción del sistema de excitación de generadores o la conexión continua de reactores o capacitores (CEV's). En la Fig. 2.4 se presenta un esquema de control local típico.

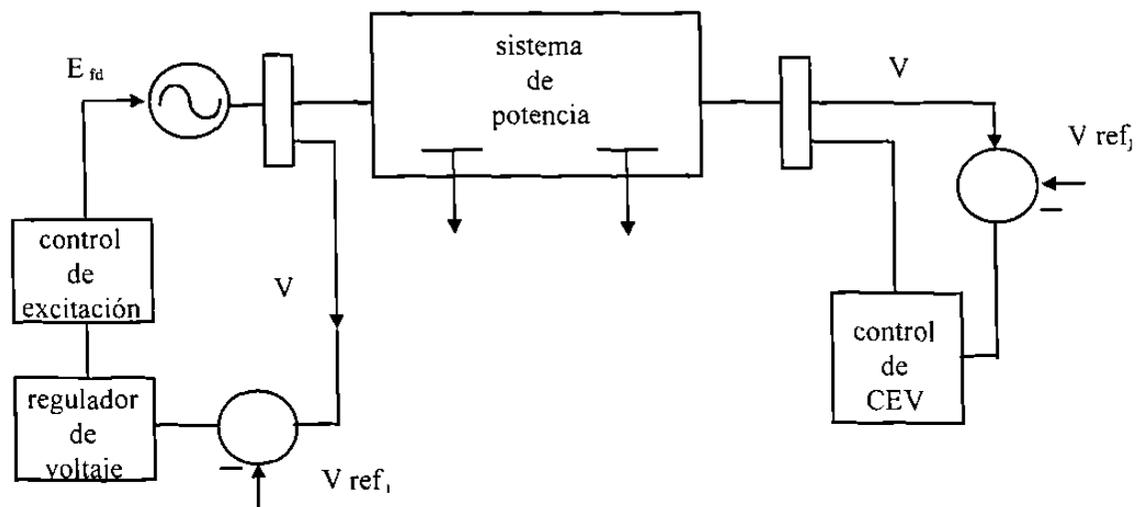


Fig. 2.4. Control de voltaje primario.

Si el sistema de control mostrado en la Fig. 2.4 se aplica en diversos puntos del sistema se tendrá la estructura básica que definirá el flujo de reactivos en la red. En forma esquemática la Fig. 2.5 muestra como los nodos de voltaje controlado sirven de referencia (soporte) al perfil de voltaje del sistema.

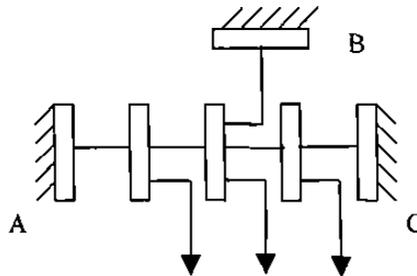


Fig. 2.5. Soporte de voltaje mediante control de voltaje local.

En la figura 2.5 los nodos A, B y C son de voltaje controlado y mantienen el nivel de voltaje aportando la potencia reactiva requerida por las cargas y el sistema de transmisión. En un caso real las fuentes de reactivos son limitadas y sólo podrán mantener el voltaje mientras los requerimientos de potencia reactiva del sistema estén dentro de la capacidad de la fuente. Si se llega a un límite, se pierde el soporte de reactivos y el control de voltaje en la zona donde se localiza la fuente.

De esta manera, en un sistema de potencia es muy importante la localización de las fuentes de reactivos; el objetivo en la ubicación es tratar de lograr un soporte de voltaje adecuado y reducir la transmisión de potencia reactiva a los nodos de carga. De otra forma, si se tiene pocas fuentes de potencia reactiva y están alejadas eléctricamente de la carga, entonces se tendrá la degradación del perfil de voltaje debido a la transmisión de reactivos a grandes distancias. Se debe resaltar que este es un problema acumulativo, ya que al tener mayores diferencias de voltaje también se incrementa el consumo de reactivos en los elementos de transmisión, lo que a su vez causa una mayor caída de voltaje.

Es importante señalar que en estado estable los controles mantendrán el voltaje del nodo controlado en el valor especificado. En cambio, ante perturbaciones, se tendrán cambios en los voltajes y el regreso a los valores de referencia dependerá de la respuesta dinámica de los sistemas de excitación de los generadores, de la respuesta del control de CEV's, y de la inercia electromagnética de los generadores. En un sistema de potencia los nodos de voltaje controlado actúan como compensadores de potencia reactiva, suministrando los reactivos necesarios, de acuerdo a las variaciones de la demanda, de manera de mantener el voltaje especificado (referencia).

El resultado de modificar el voltaje de generación es un cambio en el flujo de reactivos, ocasionando un intercambio de potencia reactiva entre generadores y modificando en consecuencia el perfil de voltaje del sistema. La efectividad del cambio (mejoramiento del perfil de voltaje) dependerá de que se reduzca el flujo de reactivos en las trayectorias de mayor impedancia.

En forma natural se tiene la tendencia a suministrar la potencia reactiva requerida por la carga a través de las líneas con menor impedancia. Esto se puede mostrar utilizando las ecuaciones del flujo de potencia reactiva en el sistema de la Fig. 2.6.

$$Q_{ij} = \frac{V_i}{X_{ij}} (V_i - V_j \cos \delta_{ij}) \quad (2.10)$$

$$Q_{kj} = \frac{V_k}{X_{kj}} (V_k - V_j \cos \delta_{kj}) \quad (2.11)$$

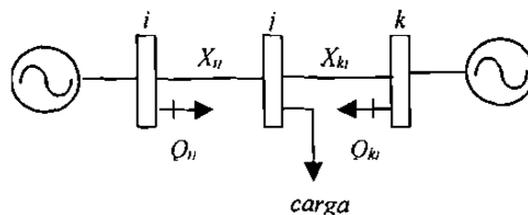


Fig. 2.6. Sistema de potencia elemental.

Si se considera que los voltajes de generación y las diferencias angulares son iguales ($V_i = V_k$, $\delta_{ij} = \delta_{kj}$), entonces:

$$\frac{Q_{ij}}{Q_{kj}} = \frac{X_{kj}}{X_{ij}} \quad (2.12)$$

Esta ecuación muestra que la relación de flujos reactivos dependerá de las reactancias de cada rama. Así, si $X_{kj} = 4X_{ij}$, el flujo Q_{ij} será cuatro veces mayor que el flujo Q_{kj} . De esta forma, a medida que la reactancia del elemento de transmisión es mayor, el flujo de reactivos disminuye. La distribución de flujos de reactivos trata de lograr el equilibrio de voltaje en el nodo j , por lo que la ecuación (2.12) también se puede escribir en forma aproximada como una caída de voltaje:

$$\Delta V = \frac{Q_{ij} X_{ij}}{V_i} = \frac{Q_{ij} X_{kj}}{V_k} \quad (2.13)$$

En forma alterna se puede decir, que al aumentar la demanda de la potencia reactiva en el nodo j , ésta se obtendrá en mayor proporción de la fuente de reactivos más cercana eléctricamente a la carga, de manera de tener la menor desviación de voltaje en el nodo j .

Un análisis interesante es la evaluación del efecto de incrementar el voltaje en la fuente de reactivos más alejada de la carga. En este caso, el control es opuesto a la tendencia natural, ya que se estaría forzando un flujo de reactivos a través de una trayectoria de alta impedancia. La conclusión es que esta acción no es efectiva, ya que el incremento en la aportación de reactivos en la fuente se consumirá en la reactancia de la línea de transmisión.

La acción de control recomendada sería modificar el voltaje en la fuente de reactivos más cercana a la carga con lo cual se disminuye el flujo de reactivos por las trayectorias de alta impedancia. El resultado es un efecto positivo en el control de voltaje en el nodo de carga.

2.2.4 Control de voltaje en nodos de carga

Las alternativas que se tienen normalmente en un SEP para el control de voltaje son, [5]:

- Movimiento de voltaje en generación.
- Movimiento de cambiadores de tap bajo carga.
- Conexión y desconexión de reactores en derivación.
- Conexión y desconexión de capacitores en redes de distribución.
- Operación de generadores como condensadores síncronos.
- Conexión y desconexión de líneas de transmisión.
- Reducción de la calidad de servicio (frecuencia, voltaje).
- Cortes de carga.

Las cinco primeras acciones se realizan en condiciones normales de operación y las tres últimas son acciones de emergencia para evitar problemas de sobrevoltajes. Es importante considerar que estas acciones tienen las restricciones siguientes:

- Transformadores de potencia con tap fijo de carga y generación.
- Reactores conectados a través de cuchillas, lo que obliga a realizar maniobras en líneas para su conexión o desconexión.
- Rango limitado de variación de potencias reactiva en unidades generadoras.

En conclusión, el control de voltaje en los nodos de carga en una red longitudinal requiere de una adecuada coordinación de las fuentes de potencias reactivas disponibles en el sistema.

2.3 Definición del problema de control de voltaje en estado estable

En [8,12] se establece para el problema de control de voltaje, la importancia de conocer el efecto que se tiene en el sistema ante cambios en las variables de control. De esta manera, se puede controlar el perfil de voltaje de la red y utilizar eficientemente las fuentes de potencia reactiva. El problema de control de voltaje en estado estable se puede representar por un conjunto de ecuaciones algebraicas no lineales y restricciones operativas:

$$f(x, u) = 0 \quad (2.14)$$

$$x^l \leq x \leq x^u$$

$$u^l \leq u \leq u^u$$

$$h^l < h(x, u) \leq h^u$$

donde x es el vector de variables dependiente, u es el vector de las variables de control, las cuales están acotadas dentro de un rango operativo y $h(x, u)$ representan restricciones operativas en la red de transmisión, en función a las variables dependientes y de control.

Las funciones f definen las inyecciones de potencia activa y reactiva en el sistema eléctrico de potencia. En el vector u se incluyen todas las variables donde se pueden realizar cambios directamente, como voltajes en generación (Δv_g), inyección de potencia reactiva en nodos (ΔQ), etc. En el vector x se agrupan las variables que se calculan al resolver (2.14) como voltajes en nodos de carga, los cuales deben permanecer dentro de un rango de operación $[x^l, x^u]$.

El control de voltaje en estado estable forma parte de un grupo de acciones de control continuas encaminadas a mantener un estándar de seguridad en el sistema eléctrico de potencia, el cual está compuesto por un conjunto de contingencias factibles. En general, el concepto de seguridad en un sistema eléctrico de potencia se define como su habilidad de soportar perturbaciones sin llegar a condiciones de emergencia; esto significa que el control

de voltaje debe ser capaz de mantener los voltajes en todos los nodos del sistema dentro de límites operativos, cumpliendo las restricciones operativas impuestas por la red, tanto en estado estable, como después de haber ocurrido una contingencia (desconexión de líneas y/o generadores, fallas, etc.). Si esto se logra, el control de voltaje contribuye a mantener la seguridad operativa del sistemas eléctrico de potencia.

Las ecuaciones (2.14) son no lineales y su solución requiere de un proceso de linealización alrededor de x_0 y u_0 de la forma:

$$f(x_0, y_0) + \left[\frac{\partial f}{\partial x} \right]_0 \Delta x + \left[\frac{\partial f}{\partial u} \right]_0 \Delta u = 0 \quad (2.15)$$

+

Despejando Δx de (2.15) se obtiene:

$$\Delta x = - \left[\frac{\partial f}{\partial x} \right]_0^{-1} \left[\frac{\partial f}{\partial u} \right]_0 \Delta u \quad (2.16)$$

$$\Delta x = S_{x/u} \Delta u \quad (2.17)$$

donde la relación entre variables dependientes y de control es a través de la matriz de sensibilidad $S_{x/u}$.

En la ecuación (2.17), los elementos de la matriz $S_{x/u}$ son coeficientes de sensibilidad que relacionan los cambios de las variables dependientes al ocurrir variaciones de variables de control. Así, el elemento (i, j) está ligado a cambios en la variable x_i debido a variaciones en u_j . En las ecuaciones (2.15) se observa que es necesario obtener la inversa de la matriz $[\partial f / \partial x]$, lo que requiere de una especificación adecuada de variables (x) y ecuaciones (f). Aquí se sigue un procedimiento similar al utilizado en estudios de flujos de potencia para la selección de variables. De hecho, la matriz de derivadas con respecto a las variables

dependientes es el Jacobiano del conjunto de ecuaciones (2.14). En aplicaciones de tiempo real, el cálculo requiere técnicas eficientes para determinar directamente elementos particulares o columnas de valores de la matriz de sensibilidad.

2.4 Ecuaciones del modelo Q - V

Para ilustrar las ecuaciones generales en estado estable, entre los voltajes nodales (V_i) y las inyecciones de potencia reactiva (Q_i), se evalúan las derivadas de control con respecto a las variables dependientes:

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_1 & J_2 \\ J_3 & J_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta V \end{bmatrix} \quad (2.18)$$

En la ecuación (2.18) se hacen consideraciones prácticas para desacoplar las ecuaciones de los balances de potencia activa y reactiva; la ecuación (2.18) representa un modelo de las ecuaciones de potencia nodal en función de los ángulos y magnitudes de voltaje, donde los elementos del Jacobiano ($J_1 \dots J_4$) son coeficientes que relacionan las variables de control (P, Q) con las variables dependientes (θ, V). Debido a las características del sistema de potencia los elementos del Jacobiano J_2 y J_3 tienen valores muy pequeños, por lo que se puede considerar que J_2 y J_3 son matrices cero. Esto da lugar al modelo reactivo desacoplado, que involucra a la variable de control Q con el Jacobiano (J_4) así como la variable dependiente V . Al evaluar en detalle los elementos de J_4 , en función de elementos de la matriz nodal de admitancias (G_{km}, B_{km}) se obtiene:

$$\frac{\partial Q_k}{\partial V_m} = V_k V_m (G_{km} \sin \theta_{km} - B_{km} \cos \theta_{km}) \quad (2.19)$$

$$\frac{\partial Q_k}{\partial V_k} = Q_k - B_{kk} V_k^2 \quad (2.20)$$

donde k y m son nodos del sistema.

Las ecuaciones anteriores se simplifican si se hacen las siguientes consideraciones:
 $\theta_{km} \approx 0$ ($\text{sen } \theta_{km} \approx 0$, $\text{cos } \theta_{km} \approx 1$), y $Q_k \ll B_{kk}$. Entonces:

$$\frac{\partial Q_k}{\partial V'_m} = -V_k V_m B_{km} \quad (2.21)$$

$$\frac{\partial Q_k}{\partial V'_k} = -V_k^2 B_{kk} \quad (2.22)$$

Empleando las ecuaciones (2.21) y (2.22), el cambio de potencia reactiva en el nodo k se expresa mediante la ecuación:

$$\Delta Q_k = \sum_{\substack{m \\ m \neq k}} -V_k V_m B_{km} \Delta V'_m + (-V_k^2 B_{kk}) \Delta V'_k \quad (2.23)$$

considerando un perfil plano de voltaje, donde $V_k, V_m \approx 1$, se obtiene

$$\Delta Q_k = \sum_{\substack{m \\ m \neq k}} -B_{km} \Delta V'_m - B_{kk} \Delta V'_k \quad (2.24)$$

donde el modelo de potencia reactiva en forma matricial es:

$$[\Delta Q] = [B][\Delta V] \quad (2.25)$$

donde $B = I_m [Y]$, cuyos elementos son constantes e independientes de la condición de operación. Esto es estrictamente cierto para pequeños cambios, sin embargo este modelo incremental sólo indica el cambio de voltaje en nodos de carga al haber una inyección de

potencia reactiva de forma local, ya que la matriz B_Q se define sólo para nodos de voltaje no controlado (nodos de carga).

El interés de este proyecto se basa en un modelo que deba considerar tanto a los nodos de voltaje no controlado (P, Q), como a nodos de voltaje controlado (P, V), por lo cual se deben incluir al final las ecuaciones para los nodos de voltaje controlados; así, la ecuación (2.25) resulta modificada en la siguiente forma:

$$\begin{bmatrix} \Delta Q_c \\ \Delta Q_g \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} B_C & B_{CG} \\ B_{CG} & B_G \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta V_C \\ \Delta V_G \end{bmatrix} \quad (2.26)$$

donde $\Delta Q'$ representa el error de potencia reactiva nodal dividido entre el voltaje $\left[\frac{\Delta Q}{V} \right]$. La ecuación (2.26) permite ilustrar el cambio en las variables dependientes (ΔV_C) que ocurre al momento de variar las variables de control (ΔQ_G); en este caso, el error de potencia reactiva (ΔQ_G) depende del cambio en voltajes en generación.

De esta manera se puede controlar el voltaje en nodos de carga variando los voltajes de generación. El conjunto de matrices de la ecuación (2.26) depende de la topología de la red, así que para obtener los coeficientes de sensibilidad de las matrices es necesario formar la matriz de admitancias nodal (Y nodal) la cual también incluye al nodo compensador del sistema de potencia analizado.

2.5 Coeficientes de sensibilidad del modelo Q - V

En esta sección se presenta el cálculo de coeficientes de sensibilidad basados en el modelo reactivo de la ecuación (2.26). Existen diferentes estrategias de control con diferentes elementos del sistema de potencia para lograr el control de voltaje en nodos de carga, en los cuales algunos coeficientes de sensibilidad tiene un papel importante como son:

- Cambio en un voltaje nodal por inyección de potencia reactiva.
- Cambio en el voltaje en nodo de carga por variación del tap en un transformador.
- Cambio del voltaje en un nodo de carga al variar un voltaje en generación.

La estrategia de control que se eligió en este proyecto corresponde al cambio en el voltaje de un nodo de carga al variar un voltaje en generación, ya que esta estrategia de control tiene una estrecha relación con los conocimientos de los operadores, adquiridos en base a su experiencia en el control de voltaje. Este aspecto se describe con mayor detalle en la siguiente sección.

2.6 Cambio de voltaje en un nodo de carga al variar un voltaje en generación

Bajo esta estrategia de control, se hace la consideración de que no existe cambio en la potencia reactiva en nodos de carga ($\Delta Q_C = 0$), así que la ecuación (2.26) se desarrolla obteniendo:

$$[B_C][\Delta V_C] + [B_{CG}][\Delta V_G] = 0 \quad (2.27)$$

despejando $[\Delta V_C]$ se obtiene:

$$[\Delta V_C] = -[B_C]^{-1} [B_{CG}][\Delta V_G] \quad (2.28)$$

La matriz B_{CG} representa la matriz $[\partial f / \partial u]$ en la ecuación (2.15). El producto matricial en (2.28) es la matriz de sensibilidad que relaciona el cambio en los voltajes en los nodos de carga debido a cambios en voltajes de los nodos de generación. Es decir:

$$\Delta V_C = S_{\Delta V_G}^{\Delta V_C} \Delta V_G \quad (2.29)$$

Analizando (2.29) se puede observar que es posible determinar el cambio de voltaje en todos los nodos de carga al haber un cambio en un voltaje de generación. Para ilustrar la matriz de coeficientes de sensibilidad se utiliza un sistema de cinco nodos, mostrado en la Fig. 2.7. Así, para el sistema de cinco nodos, la ecuación (2.28) se expresa como:

$$\begin{bmatrix} \Delta V_1 \\ \Delta V_2 \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} \frac{\partial V_1}{\partial Q_1} & 0 \\ 0 & \frac{\partial V_2}{\partial Q_2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{\partial Q_2}{\partial V_3} & 0 & \frac{\partial Q_1}{\partial V_5} \\ 0 & \frac{\partial Q_1}{\partial V_4} & \frac{\partial Q_2}{\partial V_5} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta V_3 \\ \Delta V_4 \\ \Delta V_5 \end{bmatrix} \quad (2.30)$$

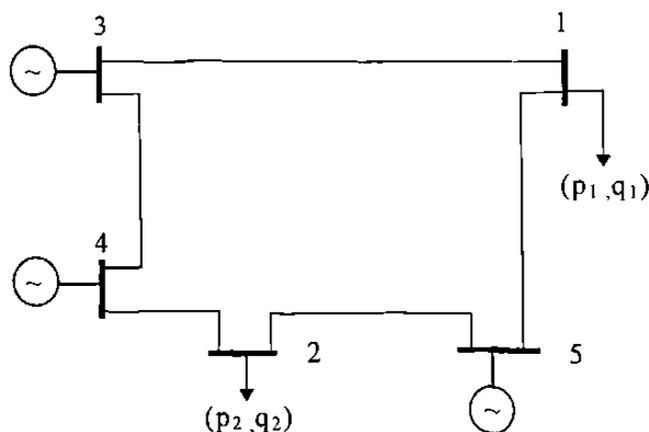


Fig. 2.7. Sistema de potencia de cinco nodos.

Para determinar el cambio en los nodos de carga 1 y 2, ante un cambio en el voltaje de generación del nodo 3, se utiliza la columna correspondiente de las matrices B_{CG} obteniéndose:

$$\begin{bmatrix} \Delta V_1 \\ \Delta V_3 \\ \Delta V_2 \\ \Delta V_3 \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} \frac{\partial V_1}{\partial Q_1} & 0 \\ \frac{\partial Q_1}{\partial V_3} & 0 \\ 0 & \frac{\partial V_2}{\partial Q_2} \\ 0 & \frac{\partial Q_2}{\partial V_3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{\partial Q_2}{\partial V_3} \\ \frac{\partial V_3}{\partial Q_2} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2.31)$$

En este caso, (2.31) se puede expresar también en función de las derivadas correspondientes como:

$$\Delta Q_n = \left(\frac{\partial Q_n}{\partial V_{Gi}} \right) \Delta V_{Gi} + \sum_{k=1}^n \left(\frac{\partial Q_n}{\partial V_{Gk}} \right) \Delta V_{Gk} + \left(\frac{\partial Q_n}{\partial V_n} \right) \Delta V_n \quad (2.32)$$

Si se considera que sólo hay un cambio en el voltaje V_{Gi} , la relación entre los voltajes V_n y V_{Gi} como está dada por:

$$\frac{\Delta V_n}{\Delta V_{Gi}} = - \left(\frac{\frac{\partial Q_n}{\partial V_{Gi}}}{\frac{\partial Q_n}{\partial V_n}} \right) \quad (2.33)$$

En la ecuación (2.33), la derivada $\left(\frac{\partial Q_n}{\partial V_n} \right)$ en el denominador, representa la matriz B_C^{-1} en la ecuación (2.28). En este caso se puede utilizar esta representación ya que sólo existe un nodo de carga (n), ya que el número de nodos restante se eliminan con el proceso de reducción. Reemplazando las derivadas por las expresiones en función de los parámetros del modelo reactivo utilizado, se obtiene:

$$\frac{\Delta V_n}{\Delta V_{Gi}} = - \frac{B_{in}}{B_{nn}} \quad (2.34)$$

La interpretación que tiene este coeficiente es que siempre tiene un valor positivo, lo cual indica la misma tendencia del cambio. Así, si el incremento de voltaje en generación es positivo, también el voltaje en nodos de carga se incrementa en forma positiva con cierta proporción. La proporción del cambio depende directamente del valor del coeficiente de sensibilidad. Expresando la ecuación (2.25) en función de susceptancias de elementos, se obtiene:

$$\frac{\Delta V_n}{\Delta V_{G_i}} = \frac{b_{in}}{\sum_r b_{ir}} \quad (2.35)$$

Nuevamente, la distancia eléctrica entre los nodos involucrados define la efectividad del cambio. Al tener un nodo de generación cercano eléctricamente a un nodo de carga se tendrá mayor influencia en el control de voltaje. Un caso extremo se presenta cuando todos los nodos de generación están alejados del nodo n ; en este caso cualquier cambio en el voltaje de generación i no tendrá ningún efecto en el voltaje del nodo de carga n . La conclusión es que el nodo n está fuera del área de influencia del generador i .

2.7 Conclusiones

La solución del problema de control de voltaje requiere un control eficiente de las fuentes de potencia reactiva (banco de capacitores y reactores, tap en transformadores y sistemas de excitación en generadores); para lograr este objetivo, es necesario determinar la aportación de potencia reactiva que debe realizar cada una de estas fuentes.

En este proyecto se resuelve el problema de control de voltaje en estado estable, utilizando como estrategia de control la variación de los voltajes en nodos de generación. Esta estrategia de control se realiza a través de un sistema de lógica difusa (SLD), el cual, a partir de la información de los voltajes violados en nodos de carga fuera de límites operativos, determina el cambio necesario en los voltajes de generación para mantener un mejor perfil de voltaje en el sistema de potencia.

CAPITULO 3

INTRODUCCION A LOS CONJUNTOS DIFUSOS Y LOGICA DIFUSA

3.1 Introducción

En las décadas de los ochenta, las personas que trabajaban en las áreas académicas y de investigación escucharon con frecuencia el concepto de IA. La definición que se da a inteligencia artificial (IA) es la de ciencia que estudia de manera sistemática el comportamiento inteligente, con el fin de emular las habilidades humanas mediante la creación y utilización de máquinas y computadoras. Estas habilidades humanas incluyen el aprendizaje, las capacidades mecánicas, las capacidades sensoriales, etc., [7,16].

Hay una gran diversidad de áreas asociadas a la IA, como la simulación sensorial, la robótica, los sistemas expertos, los lenguajes naturales, las redes de neuronas artificiales, la lógica difusa, etc. Esta última área de aplicación (lógica difusa) es la base del presente proyecto para el control de voltaje en estado estable, en un sistema eléctrico de potencia.

La lógica difusa proporciona las herramientas para realizar la aproximación al razonamiento (del control de voltaje en nuestro interés) y su base fundamental radica en la lógica booleana y la teoría de conjuntos difusos. Se presenta a continuación una introducción de los conceptos básicos de los conjuntos difusos y lógica difusa.

3.2 Conceptos básicos de conjuntos difusos

En esta sección se definirán conceptos básicos de los conjuntos difusos. Estos, al igual que la lógica difusa deben estar presentes en la descripción de un SLD [1,18,21,23].

3.2.1 Definiciones

Universo de Discurso: Sea U un conjunto cuyos elementos toman valores discretos o continuos. U es llamado universo del discurso y u representa elementos genéricos de U .

Conjunto Difuso: El conjunto teórico difuso F , definido dentro un universo de discurso U , es definido por una función $\mu_F(u)$, llamada función de membresía del conjunto F . La función de membresía $\mu_F(u)$, mapea cada elemento de F a un valor entre cero y uno. También puede ser una función matemática dando un número significativo a un conjunto difuso. Este mapea entradas exactas de un dominio especificado para asignar un grado de membresía entre cero y uno. En la Fig. 3.1 se puede apreciar la definición de este concepto en las cuales la forma de estas funciones membresías son triangulares.

Para u como un elemento de F , $\mu_F(u)$ es igual al grado con el cual u es elemento de F , es decir:

$$\mu_F(u): U \rightarrow [0,1] \quad (3.1)$$

donde:

$$\begin{aligned} \mu_F(u) &= 1, & \text{si } u \text{ pertenece totalmente a } F. \\ \mu_F(u) &= 0, & \text{si } u \text{ no pertenece en absoluto a } F. \\ 0 < \mu_F(u) < 1, & \text{si } u \text{ pertenece parcialmente a } F. \end{aligned}$$

Valores Exactos: Valores de entrada numéricos claros y precisos (no borrosos).

Dominio ó Espacio: Es la amplitud ó rango de la función de membresía, distribuida en el universo de discurso. La amplitud o rango usualmente emplea números reales mapeados por una función membresía sobre un espacio normado $[0,1]$.

$$\mu_{A \cup B}(u) = \max\{\mu_A(u), \mu_B(u)\} \quad (3.3)$$

El complemento \bar{A} del conjunto difuso A tiene la función de membresía $\mu_{\bar{A}}(u)$ definida para toda $u \in U$ por :

$$\mu_{\bar{A}}(u) = 1 - \mu_A(u) \quad (3.4)$$

generalmente los operadores intersección y unión son denotados en algunas literaturas como \wedge y \vee respectivamente, y para el operador complemento \bar{A} .

En los operadores anteriores se muestra sólo una posible selección de operadores unión intersección y complemento. La selección de los operadores corresponde a una interpretación del sentido de la lógica de operación, sea unión, intersección o complemento basado en diferentes interpretaciones sean estas de forma argumentación intuitiva o empírica o justificaciones axiomáticas. Existen otros operadores que se pueden sugerir, por ejemplo, las así llamadas normas-t y conormas-t propuestas para los operadores intersección y unión respectivamente. Las normas-t y conormas-t están íntimamente relacionadas con las implicaciones difusas modus ponens y modus tollens en la aproximación al razonamiento. En la siguiente sección se ve más en detalle las normas-t y conormas-t.

3.2.3 NORMAS-T y CONORMAS-T

Definición de Normas Triangulares (normas-t): Es una función que incluye intersección, producto algebraico, producto acotado y producto drástico. La norma triangular de mayor valor numérico es la intersección y la de menor valor numérico es el producto drástico. Las operaciones asociadas con normas triangulares están definidas para toda $(x, y) \in [0, 1]$ por:

$$\text{intersección difusa} \quad x \wedge y = \min \{x, y\} \quad (3.5)$$

$$\text{producto algebraico} \quad x \bullet y = xy \quad (3.6)$$

$$\text{producto acotado} \quad x \otimes y = \max \{0, x + y - 1\} \quad (3.7)$$

$$\text{producto drástico} \quad x \cap y = \begin{cases} x, & \text{si } y = 1 \\ y, & \text{si } x = 1 \\ 0, & \text{si } x, y < 1 \end{cases} \quad (3.8)$$

Definición Conormas Triangulares (conorma-t): La conorma triangular (+) es una función que incluye unión, suma algebraica, suma acotada, suma drástica, y suma disjunta. Las operaciones asociadas con conormas triangulares están definidas para toda $(x, y) \in [0,1]$, como:

$$\text{unión} \quad x \vee y = \max \{x, y\} \quad (3.9)$$

$$\text{suma algebraica} \quad x + y = x + y - x y \quad (3.10)$$

$$\text{suma acotada} \quad x \oplus y = \min \{1, x + y\} \quad (3.11)$$

$$\text{suma drástica} \quad x \cup y = \begin{cases} x, & \text{si } \rightarrow y = 0 \\ y, & \text{si } \rightarrow x = 0 \\ 0, & \text{si } \rightarrow x, y > 0 \end{cases} \quad (3.12)$$

$$\text{suma disjunta} \quad x \Delta y = \max \{ \min (x, 1-y), \min (1-x, y) \} \quad (3.13)$$

Las normas triangulares son empleadas para definir conjunciones en razonamiento aproximado, mientras la conormas triangulares sirven para las disyunciones.

3.2.4 Relaciones difusas y sus composiciones

Relación Difusa: Se permite nombrar U y V como dos universos de discurso para el concepto de relación difusa. Una relación difusa R es un conjunto difuso definido en el espacio de producto $U \times V$, esto es, R tiene una función membresía $\mu_R(u, v)$, donde $u \in U$ y $v \in V$.

En una forma general, un operador composicional puede ser expresado como la composición “sup – star,” donde “star” denota una operación, como por ejemplo mínimo, producto, etc., y el término “sup” significa el máximo.

Composición “sup - star”: Si R y S son relaciones difusas en $U \times V \times W$, respectivamente. La composición “sup – star” de R y S es una relación difusa denotada por $R \circ S$ y definido por:

$$\mu_{R \circ S} = \sup_{v \in V} [\mu_R(u, v) * \mu_S(v, w)] \quad (3.14)$$

donde $u \in U, w \in W$, y $*$ puede ser algún operador en la clase de norma-t definido en las ecuaciones de (3.5 a 3.8). Claramente, la relación R y S es un conjunto difuso en $U \times W$. Esto hace posible que S sea solo un conjunto difuso en V ; en este caso, la función membresía $\mu_S(v, w)$ en la ecuación (3.14) llega a ser $\mu_S(v)$, la $\mu_{R \circ S}(u, w)$ puede llegar a ser $\mu_{R \circ S}(u)$, y así otros resultados semejantes. Las composiciones más comúnmente utilizadas son la “sup – min” y “sup – product,” que reemplazan el operador $*$ en (3.14) por min y producto algebraico, respectivamente

3.3 Conceptos básicos de lógica difusa

La lógica difusa, que es una extensión de la lógica booleana, ofrece una metodología para representar e implementar el conocimiento de la mejor forma de controlar un proceso. La lógica es una base para el razonamiento y trata con *proposiciones* que se representan como:

(x) es (p)		:proposición A en forma canónica.
(el voltaje de 0.987 p.u.) es (voltaje normal)		:ejemplo de proposición.

donde (x) es el símbolo del sujeto y (p)designa el predicado que caracteriza una propiedad del sujeto. Cada proposición A tiene un opuesto llamado negación de la proposición y se denota por $\sim A$. La lógica booleana requiere que las proposiciones tomen valores de binarios {1,0}. Los aspectos más importantes de la lógica son: las operaciones lógicas y el razonamiento lógico.

Las operaciones lógicas son funciones de dos proposiciones; si consideramos dos proposiciones lógicas A y B, que pueden ser falsas (0) o verdaderas (1), las cuatro operaciones lógicas básicas son:

conjunción	$A \wedge B$	“A y B”
disjunción	$A \vee B$	“A o B”
implicación	$A \Rightarrow B$	“SI (A) ENTONCES (B)”
equivalencia	$A \Leftrightarrow B$	“(A) “SI Y SOLO SI (B)”

El procedimiento para un razonamiento lógico se realiza a través de reglas de inferencia. La regla *modus ponens* $(A) \wedge (A \Rightarrow B) \Rightarrow (B)$ está íntimamente relacionada con los mecanismos de inferencia de direccionamiento de la información hacia adelante, que cuando se extiende a lógica difusa, es útil para el control. Por el contrario, la regla *modus tollens*, $(\sim B) \wedge (A \Rightarrow B) \Rightarrow (\sim A)$ está íntimamente relacionada con los mecanismos de inferencia de direccionamiento hacia atrás, utilizado en los sistemas expertos. El objetivo de la lógica difusa es proporcionar, mediante la teoría de conjuntos difusos, las bases necesarias para obtener la aproximación del razonamiento cuando se tienen proposiciones imprecisas. La aplicación de lógica difusa al control de procesos nos conduce al diseño de controladores difusos o sistemas de lógica difusa.

La relación que existe entre conjunto difusos y lógica difusa, es que los conjuntos difusos se utilizan para manejar información del sistema y la lógica difusa se utiliza para el procesamiento de esta información.

3.3.1 Variables lingüísticas

Existen dos interpretaciones para el concepto de variable lingüística definido formalmente e intuitivamente.

Formal: Una variable lingüística puede ser caracterizada por $(x, T(x), U)$, donde :

- x : es el nombre de la variable.
- $T(x)$: es el conjunto calificativo de x .
- U : es el universo de discurso.

La definición de variable lingüística puede darse como un concepto complejo, sin embargo, el objetivo es introducir este concepto de variable lingüística para presentar un camino formal para la inclusión, como variables, de palabras del lenguaje común. En esta tesis, por conveniencia, se utilizan palabras del lenguaje técnico como *voltaje*; si *voltaje* es una variable lingüística x , entonces su conjunto calificativo $T(\text{voltaje})$ puede ser $T(\text{voltaje}) = \{\text{muy bajo, bajo, normal, alto, muy alto}\}$ que corresponde a las variables lingüísticas V_{mb} , V_b , V_n , V_a y V_{ma} , respectivamente como se muestra en la Fig. 3.2. Esto no significa que la variable *voltaje* no pueda tomar valores reales. Cada término en $T(\text{voltaje})$ está determinado por un conjunto difuso definido en un universo de discurso U . Si el universo de discurso está definido de 0.9 a 1.1 p.u., se puede interpretar “voltaje muy bajo” (V_{mb}) del rango de 0.9 a 0.95, “ voltaje bajo” (V_b) dentro del rango de 0.935 a 0.985, “voltaje normal” (V_n) entre 0.98 a 1.025, “Voltaje alto” (V_a) entre 1.015 a 1.06 y “Voltaje muy alto” del rango 1.05 a 1.1. Estos términos pueden ser caracterizados por conjuntos difusos con funciones de membresía como se muestran en la Fig. 3.2.

Intuitivo: Si una variable (*voltaje*) toma palabras del lenguaje común (*voltaje bajo*, *voltaje alto*, etc.) como sus valores, esta variable se considera una variable lingüística. Estas palabras normalmente nombra a los conjuntos difusos. Una variable lingüística puede tomar como sus valores cualquiera de las palabras descriptivas o números reales.

Por ejemplo, la variable lingüística *voltaje* puede tomar valores como *voltaje muy bajo*, *voltaje bajo*, *voltaje nominal*, etc.; como se define en la Fig. 3.2. Por el contrario estos valores (funciones de membresía), mencionados anteriormente toman un rango de valores numéricos reales en el intervalo [0.9 a 1.1 *voltaje p.u.*]. Nuevamente la Fig. 3.2 ilustra estos rangos. La variable lingüística es un concepto importante que da un camino formal a cuantificar descripciones lingüísticas sobre las variables.

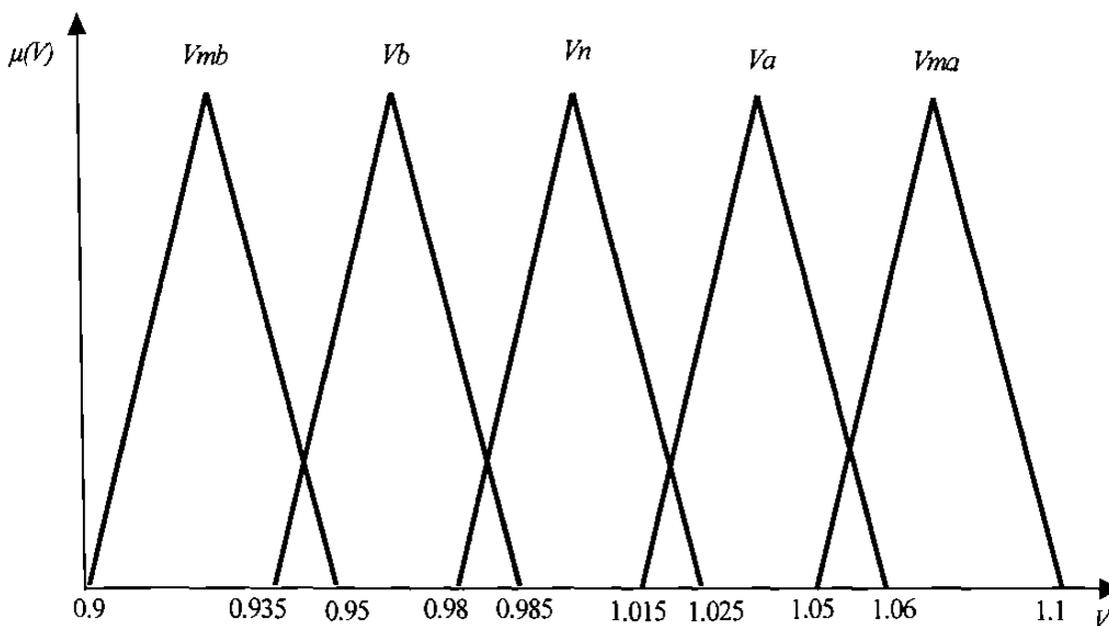


Fig. 3.2. Funciones membresía de un conjunto calificativo de la variable lingüística *voltaje*.

3.3.2 Modus ponens generalizado

Teniendo los conceptos utilizados en lógica difusa, se procede al razonamiento que se emplea en el sistema de inferencia.

En lógica difusa y razonamiento aproximado, existen dos reglas de inferencia importante, normalmente generalizadas modus ponens (mp) y modus tollendo (mt) [21]. En esta tesis se utiliza el sistema de inferencia modus ponens, por lo que es el que se describirá a continuación

En general, una regla de inferencia modus ponens es una relación que es expresada como

premisa 1 : x es A'
 premisa 2 : **SI** x es A **ENTONCES** y es B
 consecuencia : y es B'

donde A' , A , B y B' son conjuntos difusos, x y y son variables lingüísticas. La interpretación de la regla es si premisa 1 es (x es A') entonces la consecuencia de la premisa dos es (y es B'). Existen otros criterios los cuales pueden ser analizados más detalladamente en [23,25].

3.3.3 Implicaciones difusas

Sean A y B conjuntos difusos en U y V respectivamente, para definir una implicación difusa.

Definición Implicación Difusa: Una implicación difusa denotada por $A \rightarrow B$, es un género especial de una relación difusa en $U \times V$ con las siguientes funciones de membresía:

Conjunción difusa:

$$\mu_{A \rightarrow B}(u, v) = \mu_A(u) * \mu_B(v) \quad (3.15)$$

Disjunción difusa:

$$\mu_{A \rightarrow B}(u, v) = \mu_A(u) + \mu_B(v) \quad (3.16)$$

Implicación material:

$$\mu_{A \rightarrow B}(u, v) = \mu_A(u) + \mu_B(v) \quad (3.17)$$

Cálculo proposicional:

$$\mu_{A \rightarrow B}(u, v) = \mu_A(u) + \mu_{A * B}(v) \quad (3.18)$$

Generalización de “modus ponens”:

$$\mu_{A \rightarrow B}(u, v) = \sup\{c \in [0,1] \mid \mu_A(u) * c \leq \mu_B(v)\} \quad (3.19)$$

Generalización de “modus tollens”:

$$\mu_{A \rightarrow B}(u, v) = \inf\{c \in [0,1] \mid \mu_A(u) + c \leq \mu_B(v)\} \quad (3.20)$$

Una implicación difusa $A \rightarrow B$ se puede entender como una regla difusa SI – ENTONCES: SI x es A , ENTONCES y es B , donde $x \in U$ y $y \in V$ son variables lingüísticas (2.15 – 2.20), que corresponden a seis interpretaciones de reglas difusas SI – ENTONCES basadas en un criterio intuitivo o generalizaciones de lógica clásica.

3.4 Operación del SLD

En esta sección se presentará una descripción general de la estructura de un **SLD**, el cual consiste de tres etapas: fusificación, base de reglas difusas y defusificación. A continuación se desarrollan de una forma general cada uno de las etapas.

Una forma de almacenar el conocimiento es a través de bases de conocimientos consistente en un conjunto de reglas difusas SI- ENTONCES de forma:

SI x es A ENTONCES y es B

donde x y y son variables lingüísticas de los conjuntos difusos de A y B , respectivamente. La base de reglas difusas es la parte principal de un **SLD** en el sentido que las otras etapas sean utilizadas para interpretar estas reglas y hacer uso de ellas para problemas específicos. Existen dos formas de construir una base de reglas difusas: primero extraídas del conocimiento de un experto y segundo, entrenando algoritmos basados en datos de medición.

En aplicaciones del **SLD**, una acción es determinada por las entradas y reglas de control; la consecuencia de una regla no se convierte en antecedente de otra.

Generalmente se consideran a un sistema de lógica difusa con múltiples entradas y salidas, para la evaluación de las reglas existen diferentes razonamientos de inferencia, para este proyecto se utilizó el de operación min de implicación difusa (Mamdani).

Regla de operación mínimo de Mamdani como implicación difusa:

Este razonamiento está asociado con el uso de la regla de operación mínimo de Mamdani (R_c) para el cálculo de la función de implicación difusa:

$$R_c = A \times B$$

$$R_c = \int_{UV} (\mu_A(u) \wedge \mu_B(v)) / (u, v) \quad (3.21)$$

En este modo de razonamiento, la i -ésima regla lleva a la decisión de control como el conjunto borroso en el grado de pertenencia siguiente:

$$\mu_{C_i}(w) = \alpha_i \wedge \mu_{C_i}(w) \quad (3.22)$$

lo cual implica que la función de pertenencia μ_C de la consecuencia total inferida de C está dada por:

$$\mu_C(w) = \mu_{C_1} \vee \mu_{C_2} \quad (3.23)$$

$$= [\alpha_1 \wedge \mu_{C_1}(w)] \vee [\alpha_2 \wedge \mu_{C_2}(w)] \quad (3.24)$$

Este proceso de razonamiento se ilustra en la Fig. 3.3.

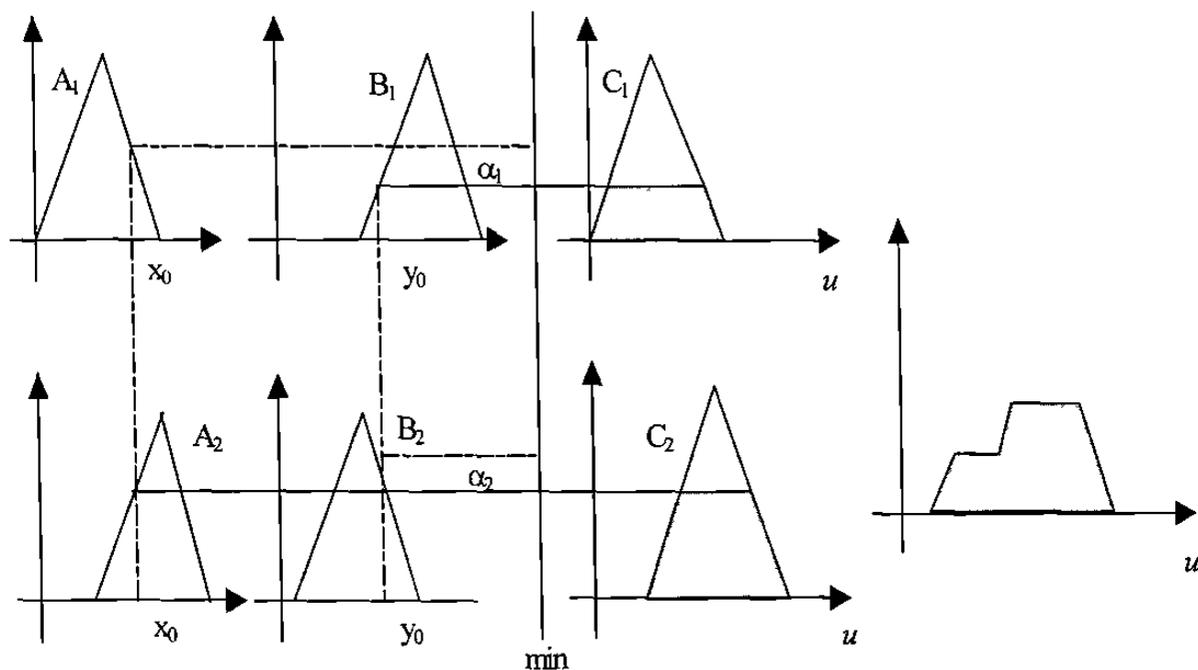


Fig. 3.3. Representación esquemática del razonamiento Mamdani.

Fusificación:

En la mayoría de las literaturas de ingeniería relacionan al control difuso y sistemas difusos, representando sus cantidades difusas por cualesquiera de las formas de las funciones membresía [6]. En las aplicaciones prácticas, las formas campanas y triangulares simétricas son las más populares para representar entradas y salidas con números difusos. Las expresiones matemáticas para las formas campana y triangular simétrica son:

$$u(x) = e^{-\frac{(x-x_0)^2}{\sigma^2}}, x_0 \in R, \sigma > 0 \quad (3.25)$$

$$u(x) = \begin{cases} \frac{1}{\sigma} (x - x_0 + \sigma), & x_0 - \sigma \leq x \leq x_0 \\ \frac{1}{\sigma} (x_0 + \sigma - x), & x_0 \leq x \leq x_0 + \sigma \\ 0, & \text{de otra forma} \end{cases} \quad (3.26)$$

Generalmente [31], la forma campana se identifica por $B[x_0, \rho]$ y la forma triangular simétrica por $S[x_0, \rho]$.

Desfusificación:

Básicamente, la desfusificación es una transformación de las acciones de control difusa, definidos sobre un universo de discurso, a acciones de control numéricas exactas. Desafortunadamente no hay ningún procedimiento sistemático para la elección de una estrategia de desfusificación. Las estrategias comúnmente empleadas son el criterio *max*, la *media de máximo*, el *centro de área*, y el de *centro promediado*. El método empleado en esta tesis fue el de centro de área debido a que aporta mejores resultados [24], además que es más sencillo de implementar computacionalmente.

Método del centro de área (CDA):

Esta estrategia CDA es usada ampliamente, y consiste en calcular la acción de control (u_0) como el centro de gravedad del conjunto difuso resultante de la acción de control difusa. En el caso de un universo de discurso continuo, la acción de control se representa como:

$$u_0 = \frac{\int u \cdot \mu_U(u) du}{\int \mu_U(u) du} \quad (3.26)$$

donde \int representa un proceso de integración, $\mu_U(\bullet)$ función de pertenencia de los elementos del subconjunto de salida y u elementos del subconjunto de salida. El resultado de éste método se presenta en la Fig. 3.4.

En el siguiente capítulo se dará una explicación más en detalle de las etapas que estructuran a un **SLD**.

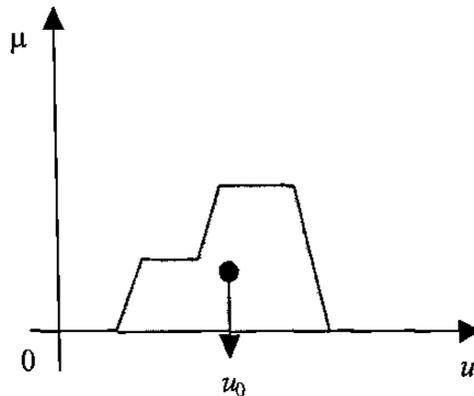


Fig. 3.4. Método de defusificación del centro del área.

3.5 Conclusiones

Se han presentado los conceptos utilizados por conjuntos difusos, así también, posibles selección de los operadores con los que trabajan y nos muestran el sentido de la lógica de operación. Teniendo los conceptos de lógica difusa, se procede al sistema de inferencia que se utilizó y una breve descripción de la forma de operación de lógica difusa.

CAPITULO 4

SISTEMA DE LOGICA DIFUSA APLICACION AL CONTROL DE VOLTAJE DEL SEP

4.1 Introducción

En los capítulos dos y tres de esta tesis se describen el problema de control de voltaje en un SEP y las características generales de la aplicación de conjuntos difusos y lógica difusa respectivamente. El problema de control de voltaje es muy complejo, y las soluciones propuestas hasta el momento son completamente satisfactorias, aunque requieren el uso de modelos matemáticos complejos. En el presente capítulo se describe la estructura del **SLD** y su aplicación al control de voltaje considerando un problema simplificado para analizar la nueva alternativa de solución al problema. Se describen los procesos de fusificación, evaluación de reglas y defusificación, así como la definición de las funciones membresía de las variables de entrada y de salida utilizadas por el **SLD**.

4.2 Estructura de un sistema de lógica difusa (SLD)

En la Fig. 4.1 se muestra la estructura de un sistema de lógica difusa (**SLD**) conformado por las siguientes etapas: fusificación, evaluación de reglas, y defusificación.

1) Fusificación:

Convierte una entrada exacta en un valor de entrada difusa, utilizando las funciones membresía de las variables de entrada al sistema. Cada entrada difusa se compone de un conjunto de grados parciales de membresía, correspondientes al grado de pertenencia de la entrada exacta en cada uno de los conjuntos difusos definidos en el universo de discurso de cada variable. Este proceso se realiza para el conjunto calificativo de los antecedentes de las reglas.

2) Evaluación de reglas:

En la base de conocimientos constituidas por reglas de producción **SI-ENTONCES**, se fundamenta las técnicas de control heurísticas extraídas de los expertos y codificadas como reglas lingüísticas.

En está etapa se realiza el proceso de inferencia del **SLD**. El resultado de la evaluación de reglas es una salida difusa que describe la acción de control correspondiente.

3) Desfusificación:

En está etapa del proceso, la salida difusa del sistema se convierte en un valor exacto utilizando los conjuntos difusos contenidos en el universo de discurso de las variables de salida.

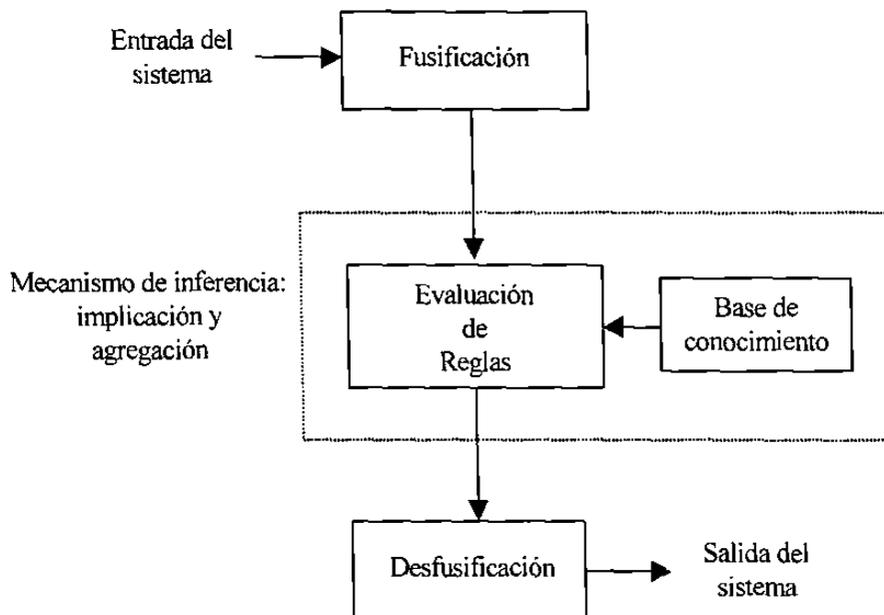


Fig. 4.1. Diagrama de bloques de un **SLD**.

4.2.1 Parámetros de un SLD

En un sistema de lógica difusa, el comportamiento está caracterizado por un conjunto de reglas lingüísticas basadas en conocimiento heurístico, usualmente de la forma:

SI (un conjunto de condiciones son satisfechas) **ENTONCES** (un conjunto de consecuencias son inferidas)

En las reglas **SI-ENTONCES** frecuentemente llamados *declaraciones condicionales difusas*, los antecedentes y los consecuentes son relacionados con conceptos difusos (términos lingüísticos). Una regla de control difusa es una declaración condicional en la que el antecedente es una condición en el dominio de la aplicación y el consecuente es una acción de control, ambas expresadas en variables lingüísticas. Además, varias variables lingüísticas pueden ser involucradas en los antecedentes y en los consecuentes de estas reglas (Sistemas multi-entradas, multi-salidas, MIMO).

Los principales parámetros de un **SLD** son los siguientes: Estrategias de fusificación, base de regla, Lógica de decisión y Estrategias de defusificación. En las siguientes sección se desarrolla en detalle cada uno de estos parámetros.

4.2.2 Estrategias de fusificación

La fusificación transforma una medición precisa en un concepto subjetivo; se definen como un mapeo desde un espacio de entrada de mediciones a conjuntos difusos definidos en los universos de los discursos de entrada. En aplicaciones de control los datos medidos son numéricos.

Los conceptos asociados (variables lingüísticas) con la base de conocimientos son utilizados para caracterizar las reglas de sistema difuso y el manejo de la información difusa en el sistema de lógica difusa. Estos conceptos se definen subjetivamente y se basan en

conocimientos heurísticos. A continuación se presentan las características relacionadas con la construcción de la base de conocimientos en un sistema de lógica difusa.

a) Partición difusa de espacios de entrada y salida

Una variable lingüística en el antecedente de una regla de un sistema difuso, es una entrada difusa definida en un universo de discurso, mientras que en el consecuente de la regla es una salida difusa. En general, a una variable lingüística se le asocia un conjunto calificativo. Una partición difusa determina cuantos calificativos existirán. No existe una regla para la sintaxis de los conjuntos difusos; generalmente, se usan calificativos como los mencionados anteriormente. Mientras más conjuntos difusos se agreguen, se tendrá una semántica más exacta y por lo tanto una acción de control más exacta. En nuestro caso se utiliza en el antecedente de la variable lingüística asociada a los voltajes de los nodos de la carga, con los siguientes calificativos o granularidad: Vmb (voltaje muy bajo), Vb (voltaje bajo), Vn (Voltaje normal), Va (voltaje alto) y Vma (voltaje muy alto). Para el consecuente, la variable lingüística esta asociada al voltaje de los nodos de generación con los siguientes calificativos: $Davg$ (decremento alto de voltaje), Dvg (decremento), Ivg (Incremento), $Iavg$ (Incremento alto).

El número de conjuntos calificativos de las entradas difusas determina el número máximo de reglas de sistema difuso que se pueden construir. Por ejemplo, para un sistema de dos entradas (x) y (y) con conjuntos calificativos de 7 y 9 elementos respectivamente, el número máximo de reglas es de 63.

b) Completud

La completud significa que los universos de los discursos de entrada y de salida deben de estar cubiertos por los dominios de los conjuntos difusos, de manera que para todos los valores numéricos, pertenecientes al universo de discurso, exista una acción de control inferida por el **SLD**. La completud de un sistema lógico difuso está relacionado con

su base de conocimientos. La propiedad de completud se incorpora a las reglas del sistema a través de la experiencia y conocimiento heurístico. Si una condición no está incluida en la base de conocimientos, se requiere agregar una regla adicional para incorporarla.

c) *Función de pertenencia de un conjunto difuso*

Existen dos métodos para definir conjuntos difusos: funcional o numérico. La definición funcional es la que expresa la función de pertenencia de un conjunto difuso por una función predeterminada, la cual puede ser gaussiana, triangular, trapezoidal, etc.; en la Fig. 4.2 se muestran algunos tipos de funciones de membresía.

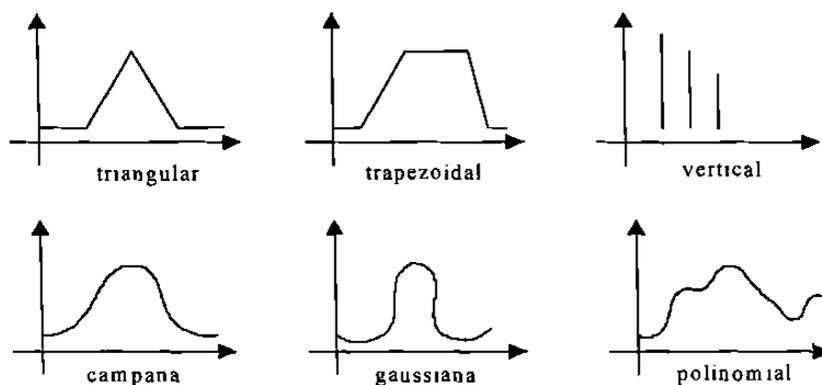


Fig. 4.2. Tipos de funciones membresía.

La definición numérica, expresa la función de grado de membresía de un conjunto difuso como un vector de números cuya dimensión depende del grado de cuantización. Por ejemplo SI $a = [0.3, 0.7, 1.0, 0.7, 0.3]$ y $u = [1, 2, 3, 4, 5]$ ENTONCES:

$$\mu_f(u) = \sum_{i=1}^5 \frac{a_i}{u_i} \quad (4.1)$$

o bien

$$\mu_f(u) = \frac{0.3}{1} + \frac{0.7}{2} + \frac{1}{3} + \frac{0.7}{4} + \frac{0.3}{5}$$

Este trabajo se utilizó la definición funcional tipo triangular para los conjuntos difusos de las variables lingüísticas del antecedente y del consecuente. En el apéndice, bajo la identificación de [INPUT i] ó [OUTPUT i] se encuentra información de la variable lingüística, dominio de discurso, granularidad ó calificativos y su definición funcional triangular parametrizada, para cada uno de los nodos de carga y de generación respectivamente.

4.2.3 Base de conocimientos como reglas

Un **SLD** es caracterizado por un conjunto de declaraciones lingüísticas basadas en el conocimiento heurístico, usualmente en las formas “**SI-ENTONCES**”. Estas son fácilmente implementadas por declaraciones condicionales difusas. La colección de reglas difusas expresadas como declaraciones condicionales forman la base de conocimientos del sistema. En este trabajo se utilizaron los voltajes de los nodos de carga como entradas, y las variaciones cuantitativas de los voltajes de generación como salidas.

a) Variables de entrada y de salida

La elección apropiada de las variables del proceso y de las acciones de control es esencial en la caracterización de la operación de un sistema difuso. Como fue establecido anteriormente, la experiencia y el conocimiento heurístico juegan un papel muy importante durante la etapa de selección. Normalmente, las variables lingüísticas en un sistema lógico difuso son el error, derivada del error, la integral del error, etc.

b) Derivación de reglas de sistema difuso

No existe un procedimiento general para decidir un número óptimo de reglas. Sin embargo, existe un número máximo de reglas que está dado por la cantidad de conjuntos

difusos de entrada. Si la derivación de reglas del sistema difuso está basada en la experiencia del operador humano, éstas podrían estar sujetas a diferentes criterios de desempeño. En la práctica, es importante verificar la consistencia de las reglas a fin de minimizar la posibilidad de contradicción. Por ejemplo, se puede tener un mismo proceso controlado satisfactoriamente por dos operadores; cada uno reacciona de forma diferente ante una circunstancia específica, y por lo tanto, se tiene dos criterios distintos que analizar para crear las reglas que rijan al proceso. Se necesita seleccionar una forma única de hacerlo.

Existen cuatro técnicas para derivar las reglas de sistema difuso, que no son exclusivas o excluyentes, y en ocasiones es necesario hacer una combinación con algunas de ellas. Estas son:

Experiencia del experto. Las reglas de producción proveen de una manera conveniente y formal para expresar el conocimiento del experto. La mayoría de los controles lógicos difusos están basados en el conocimiento heurístico expresados en reglas “**SI-ENTONCES**”. La formulación de reglas de sistema difuso pueden lograrse por medio de dos metodologías: la verbalización de la pericia humana, un ejemplo un manual de operación, y la interrogación de un operador experimentado usando un cuestionario organizado. De esta manera, se puede formar un prototipo de reglas de sistema difuso para una aplicación particular.

Basado en acciones de control del operador. En varios sistemas de control, la relación entrada - salida no son conocidas con suficiente precisión para hacer posible el empleo de la teoría de control clásico para modelado y simulación; aún así, operadores humanos experimentados, pueden controlar estos procesos sin tener en mente ningún modelo cuantitativo. En efecto, el operador humano emplea un conjunto de reglas “**SI-ENTONCES**” para controlar el proceso. Así, para automatizar un proceso, es conveniente expresar las reglas de control del operador como reglas “**SI-ENTONCES**” empleando

variables lingüísticas. En la práctica, tales reglas pueden ser deducidas de la observación de las acciones de control del operador en función de las condiciones del proceso.

Basado en el modelo difuso del proceso. En la caracterización lingüística, la descripción de la dinámica del proceso controlado, puede ser vista como un modelo difuso del proceso. Basándose en el modelo difuso, se puede generar un conjunto de reglas para alcanzar el desempeño del sistema dinámico.

Basado en el aprendizaje. Diversos controles de lógica difusa han sido contruidos para emular el comportamiento humano, pero pocos se basan en el comportamiento humano, refiriéndose a la habilidad para crear reglas de sistema difuso y modificarlas basándose en las experiencias. Esto se puede lograr si se utilizan dos bases de reglas. La primera sería la base de reglas general del sistema lógico difuso y la segunda estaría constituida por meta - reglas, con la habilidad del aprendizaje del humano para crear y modificar la base de reglas general basándose en el desempeño global del sistema.

En este trabajo se utilizó el de la “Experiencia del Experto” para determinar las reglas de control de la base de datos, basándose en pruebas de simulación con el sistema de 9 nodos del IEEE.

4.3 Aplicación de lógica de operación del SLD

Se ha dado el concepto básico del problema de control de voltaje y de la estructura de un SLD; teniendo presente estos conceptos, se realiza la aplicación de la metodología propuesta donde se desarrolla cada paso de la estructura del sistema de lógica difusa. En las siguientes secciones, se da una explicación del proceso de la metodología aplicada. De acuerdo a la metodología descrita, el número de entradas y salidas del SLD corresponde al número de nodos de carga y al número de nodos de generación (nodos de voltaje controlado) respectivamente, que existen en el sistema de potencia. En la Fig. 4.3 se muestra la estructura general del SLD.

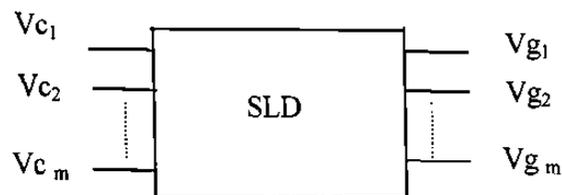


Fig. 4.3. Estructura general del SLD.

La información de entrada al **SLD** son los voltajes en los nodos de carga para una cierta condición de operación inicial en el sistema de potencia, que en nuestro caso se obtienen a través de un estudio de flujo.

Si existen nodos de carga con voltajes fuera de los límites de operación ($\pm 5\%$), los voltajes de los nodos de carga son fusificados utilizando las funciones membresía correspondientes. Posteriormente se realiza el proceso de evaluación de reglas (inducción y agregación) para determinar posteriormente los nuevos cambios en los voltajes finales de los nodos de generación para solucionar el problema de voltaje; como la evaluación de las reglas produce un conjunto difuso de las variables lingüísticas de las salidas, estas se defusifican para determinar los cambios de voltajes requeridos en los nodos de generación.

Si la solución propuesta por el **SLD** no elimina por completo el problema de voltaje en los nodos de carga, será necesario repetir el proceso antes descrito. Esta situación puede presentarse en condiciones críticas del sistema de potencia donde un gran número de nodos de carga presenten voltajes en defecto al nominal por debajo del 5%. En la Fig. 4.4 se indica el diagrama de flujo de información para el control de voltaje mediante el **SLD**. A continuación se describe en detalle cada una de las etapas del **SLD** propuesto en esta tesis.

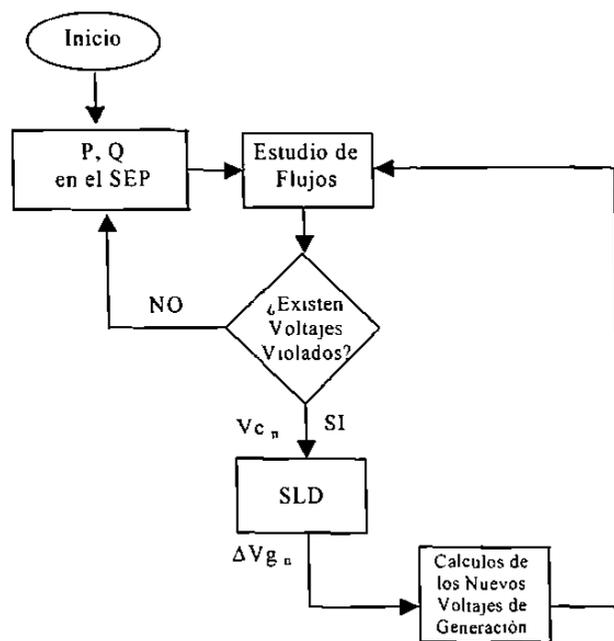


Fig. 4.4. Diagrama de flujo de información para el control de voltaje propuesto.

4.4 Determinación del perfil de voltaje del SEP

Para determinar si existen problemas de voltaje en los nodos de carga del SEP, es necesario determinar el perfil de voltaje del sistema en base a las condiciones de carga y generación; en nuestro caso, este proceso se realiza mediante un estudio de flujos, que determina los voltajes en todos los nodos del sistema de potencia. Los datos requeridos para estudio de flujos son parámetros de líneas, transformadores y cargas, así como los datos de los nodos de generación, como límites de generación (potencia activa y reactiva).

Una vez que se determina el perfil de voltaje del SEP, éste se analiza para detectar si existen nodos de carga con voltajes fuera de los límites de operación permitidos. El **SLD** no entra en operación cuando los voltajes de todos los nodos del SEP son normales.

4.5 Etapas del SLD

Una vez identificados los nodos de carga que tienen problemas de voltaje, se inicia la operación del **SLD**. Este consta de tres etapas que son: fusificación de datos de entrada,

evaluación de las reglas de control, y finalmente la defusificación de la salida. La etapa de fusificación convierte los datos de voltajes violados en valores difusos correspondientes a grados de pertenencia (entre 0 y 1) de una función de membresía (voltaje bajo, voltaje alto, etc.); estos valores difusos de entrada se utilizan para evaluar un conjunto de reglas control, las cuales determinan una salida difusa con grado de pertenencia en las funciones de membresía de las variables de salida (cambio de voltaje en nodos de generación). Por último la salida se defusifica para determinar numéricamente los valores que toman y que corresponde a los cambios de voltaje de generación. En las siguientes secciones de este capítulo se describe en detalle las tres etapas de este proceso.

4.5.1 Fusificación de los voltajes de los nodos de carga

La fusificación transforma los voltajes de los nodos de carga, que son valores numéricos, en valores difusos con grado de pertenencia en una función de membresía (voltaje bajo, voltaje alto, etc.). Para ilustrar el proceso, se utiliza como ejemplo un valor de voltaje ($V = 0.94$) que se encuentra sobre un universo de discurso con límites de 0.9 a 1.1, como se ilustra en la Fig. 4.5.

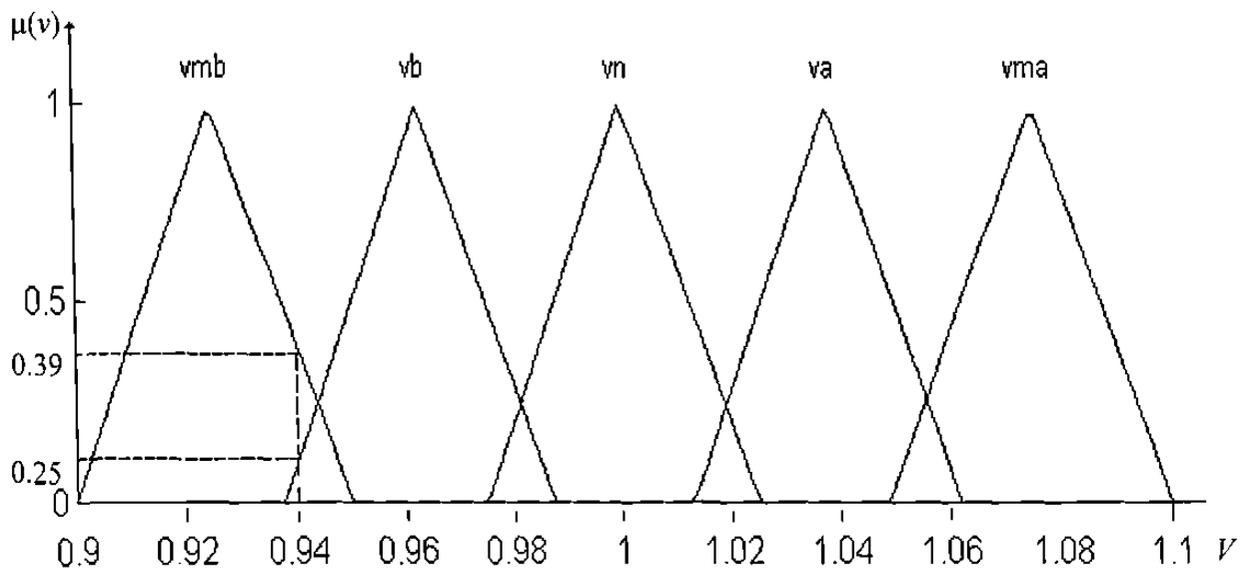


Fig. 4.5. Fusificación de los voltajes de los nodos de carga.

El valor del voltaje de 0.94 p.u. sufre una fusificación, con diferentes grados de pertenencia, entre 0 y 1, en diferentes funciones de membresía; para este caso a $\mu(v)$ le corresponden a los grados de pertenencia (valores fusificados) de 0.39, 0.25, 0.0, 0.0, y 0.0 de las variables granulares de voltaje muy bajo *vmb*, voltaje bajo *vb*, voltaje nominal *vn*, voltaje alto *va* y voltaje muy alto *vma*, respectivamente. Los valores numéricos ya convertidos en valores difusos se utilizan para evaluar las reglas de la base de conocimientos.

En esta tesis se utilizaron las funciones membresía triangulares, ya que éstas son las que mejor se adaptan para la solución del problema de control de voltaje debido a su forma simétrica y a la simplicidad de representación en forma paramétrica. Estas características dan mayor eficiencia computacional y un uso eficiente de la memoria, lo que permite un mejor análisis cualitativo y un análisis cuantitativo en forma continua [24]. El dominio para cada una de las funciones membresía se define de tal forma que se capture a la incertidumbre inherente en cada una de las variables granulares (*Vmb*, *Vb*, *Vn*, *Va* y *Vma*) en un universo de discurso que incluya en su interior los límites de voltaje de operación del SEP en estado estable (0.9 a 1.1 voltaje p.u.). El número de funciones de membresía utilizadas influye en el desempeño del SLD; esto quiere decir que al contar con un mayor número de funciones de membresía, se tendrá una mayor sensibilidad para las estrategias de control del SLD.

4.5.2 Evaluación de reglas

Las reglas de la base de conocimientos son las que describen las estrategias de control del SLD propuesto sobre el sistema de potencia bajo estudio; éstas se basan en un conjunto de reglas, las cuales son extraídas del conocimiento de un experto, donde la experiencia es adquirida de la operación del sistema de potencia. En general, una regla está formada por un par de declaraciones condicionales, donde la parte condicional **SI** se conoce como antecedente y a la parte de **ENTONCES** como consecuencia. De esta forma los

antecedentes describen los estados anormales del sistema y las consecuencias las acciones de control a ser aplicadas.

La evaluación de este conjunto de reglas se realiza en paralelo y el orden de ejecución no es importante. Las reglas por si mismas son útiles ya que ellas son referidas a los valores lingüísticos asociados a las variables de entrada y salida del SLD, como son voltaje muy bajo (Vmb), voltaje bajo (Vb), voltaje nominal (Vn), voltaje alto (Va) y voltaje muy alto (Vma) para las variables de entrada, y decremento alto de voltaje en generación ($Davg$), decremento de voltaje en generación (Dvg), incremento medio de generación ($Imvg$), incremento de voltaje en generación (Ivg) y incremento alto de voltaje de generación ($Iavg$) para las variables de salida, que se definen en rangos o dominios sobre el universo de discurso de cada variable.

Así, una regla describe una determinada estrategia de control, la cual se indica para una cierta condición del sistema (SI), y las acciones de control que se debe ejecutar (ENTONCES) para ese caso. Por lo tanto, un conjunto de reglas es definido para ejecutar diferentes acciones de control dependiendo de la condición de operación del sistema de potencia. A continuación se observa la estructura de una regla en forma general:

$$\begin{aligned} \text{SI } V_i = V_b \\ \text{ENTONCES } V_j = IV_{G_j} \end{aligned}$$

donde V_i es el voltaje en el nodo de carga i , que tiene voltaje bajo (V_b), y V_j es el incremento de voltaje en generación j (IV_{G_j}). Existen diferentes tipos de sistemas de inferencia como son el Mamdani, el Sugeno, el Takagi, etc. El que se utilizó para la realización de este SLD, fue el de Mamdani [21], ya que el proceso del sistema de inferencia que presentaba se adapta mejor a la solución del problema. En la regla anterior se observa una relación entre los conjuntos difusos V_b y IV_{G_j} pertenecientes a las variables difusas V_i y V_j .

El proceso de evaluación de reglas requiere, primero la evaluación a los antecedentes, que encierra la fusificación de las entradas y la aplicación de un operador difuso, y segundo, aplicar el proceso de implicación para determinar la salida difusa de cada regla.

El proceso de evaluación de las reglas **SI - ENTONCES** contenidas en la base de conocimientos del **SLD** se compone en tres partes:

1. Entradas Difusas:

Se determinan todas las declaraciones difusas (variables lingüísticas o granulares) en los antecedentes de cada regla para un grado de pertenencia entre 0 y 1.

2. Aplicación de operadores difusos:

Si una regla cuenta con múltiples antecedentes, se aplican operadores lógicos difusos y se determina un grado de pertenencia único para el antecedente total de la regla.

3. Aplicación del método de implicación:

Se determina un valor difuso para la conclusión de cada regla, en dependencia del valor difuso que se tiene en el antecedente y de la ponderación que se tiene en la regla.

La función que preserva estos resultados depende de los operadores **AND**, **OR** y **NOT**, para que se asignen los valores difusos entre 0 y 1. El operador lógico difuso **AND** es también conocido como la función de operación *min*, está solución a las declaraciones de los antecedentes ($A \text{ and } B$), donde A y B son limitados a un rango entre 0 y 1, utilizando la función de operación $\min(A,B)$, así también para el operador **OR** ($A \text{ or } B$), equivale la función $\max(A,B)$ y finalmente la operación **NOT** que viene a ser igual $1-A$. La Fig. 4.6, muestra las gráficas que indican el empleo de estos operadores difusos.

De esta forma se puede resolver declaraciones del tipo **SI - ENTONCES** empleando conjuntos difusos y los operadores difusos *min*, *max* y $1-A$. Por lo tanto existe una

correspondencia entre dos valores y multivalores lógicos para operaciones de AND, OR y NOT, pero esta correspondencia no es única, ya que existen otros operadores difusos adicionales difusos, anteriormente mencionados en el capítulo tres [21,24]. En el caso de lógica binaria, la evaluación de reglas **SI - ENTONCES** no presenta dificultad, ya que si para la premisa (antecedentes) es verdadera la conclusión es verdadera.

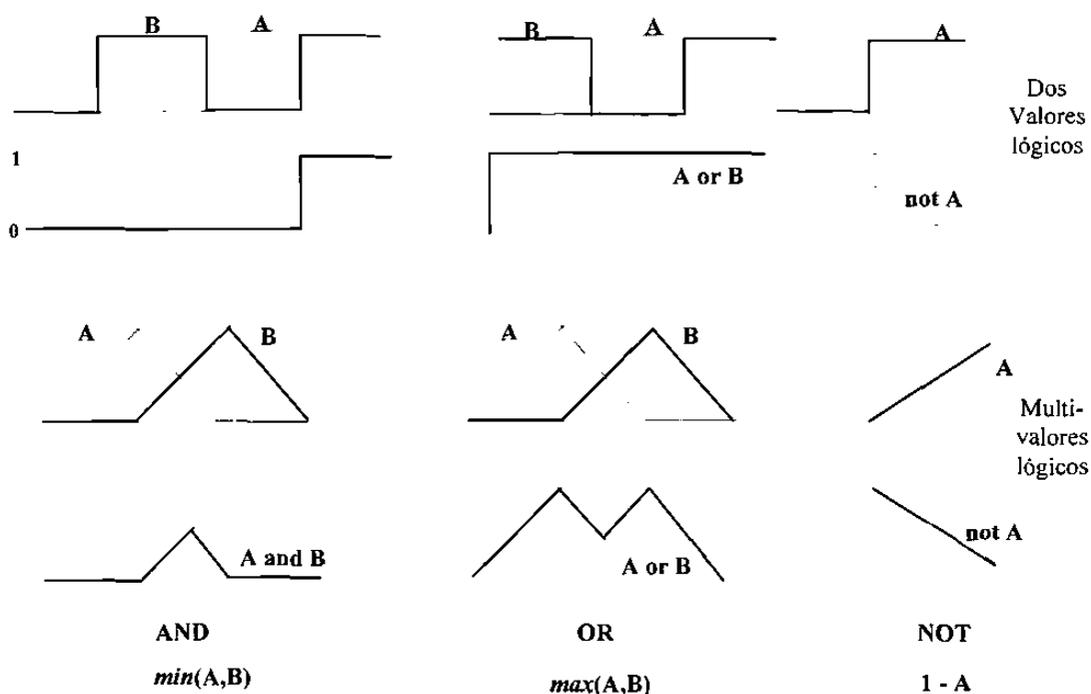


Fig. 4.6. Operadores difusos.

Sin embargo, si no existen restricciones en los dos valores en lógica binaria y donde los antecedentes corresponden a una declaración difusa, la consecuencia de la regla será verdadera al mismo grado de membresía que el antecedente, siempre y cuando éste también sea verdadero. El siguiente ejemplo muestra esta evaluación:

En lógica binaria: $p \longrightarrow q$ (p y q pueden ser falsos ó verdaderos).

En lógica Difusa: $0.5p \longrightarrow 0.5q$ (si los antecedentes son parcialmente verdaderos o falsos, las conclusiones también son parcialmente verdaderas o falsas).

En este proyecto las reglas son sencillas, ya que solo existe un sólo antecedente para una sola conclusión, pero una regla se puede componer de múltiples antecedentes ó conclusiones. Para el caso de múltiples antecedentes, el cálculo se realiza mediante la utilización de operadores lógicos difusos; de igual forma en la consecuencia de una regla, si ésta cuenta con múltiples partes, todas se ven afectadas por el resultado de los antecedentes. La forma en que afecta el resultado de un antecedente a múltiples conclusiones, es a través del conjunto difuso asignado a la variable de salida, el cual es modificado por el proceso de implicación de acuerdo al grado de pertenencia de los antecedentes.

A continuación se describe un ejemplo del proceso de evaluación de reglas utilizando operadores lógicos. Consideremos las siguientes reglas:

$$\begin{aligned} \text{SI } V_i = V_b \text{ AND } V_j = V_n \text{ ENTONCES } V_k = Ivg \\ \text{SI } V_i = V_a \text{ AND } V_j = V_n \text{ ENTONCES } V_k = Dvg \end{aligned}$$

donde V_i y V_j son las variables de entrada, V_k es la variable de salida, V_b , V_n , V_a (voltaje bajo, voltaje nominal y voltaje alto), Ivg y Dvg (incremento en voltaje de generación y decremento en voltaje de generación) son las variables lingüísticas asignadas como funciones membresía de entrada y salida respectivamente.

Para los siguientes valores de las variables de entrada. $V_i = 0.94$ y $V_j = 0.99$, se obtienen los grados de membresía, correspondientes a la etapa de fusificación (Fig.4.7):

$$\begin{aligned} V_i &= (V_b, V_n, V_a) = (0.5, 0, 0) \\ V_j &= (V_b, V_n, V_a) = (0, 0.7, 0) \end{aligned}$$

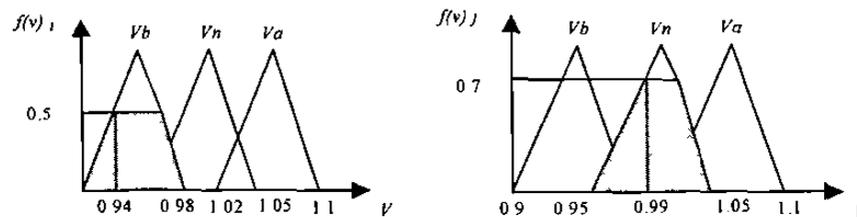


Fig. 4.7. Grados de membresía obtenidos en la etapa de fusificación.

En la Fig. 4.8 se muestra el proceso de evaluación de las reglas aplicando el operador lógico **AND** para los valores indicados en el ejemplo; se puede observar en los que en los antecedentes de la primer regla, el valor difuso con el menor grado de membresía, determina el conjunto de salida asociado a la variable *Ivg* correspondiente a la conclusión de la regla.

Así, de igual forma en la segunda regla, se puede apreciar que el conjunto de salida de la variable *Dvg* es truncado un 100%, es decir la conclusión tiene un valor difuso nulo, ya que uno de los antecedentes de la regla tiene un grado de pertenencia cero.

En el caso del operador lógico **OR** [24], se tienen otras funciones para implementar el proceso de evaluación de reglas, como son el *max* (máximo) y el *probor* (valor probable). En este ejemplo, el resultado del proceso de evaluación de reglas se puede expresar como:

$$Vk = (Dvg, Ivg) = (0, 0.5)$$

El **SLD** debe proporcionar a la salida un valor exacto, que puede ser implementado físicamente como una acción de control. En el caso del problema de control de voltaje, estos valores exactos de salida representan los cambios finales en los voltajes de los nodos de generación. Este proceso se lleva a cabo en la etapa de defusificación del **SLD**.

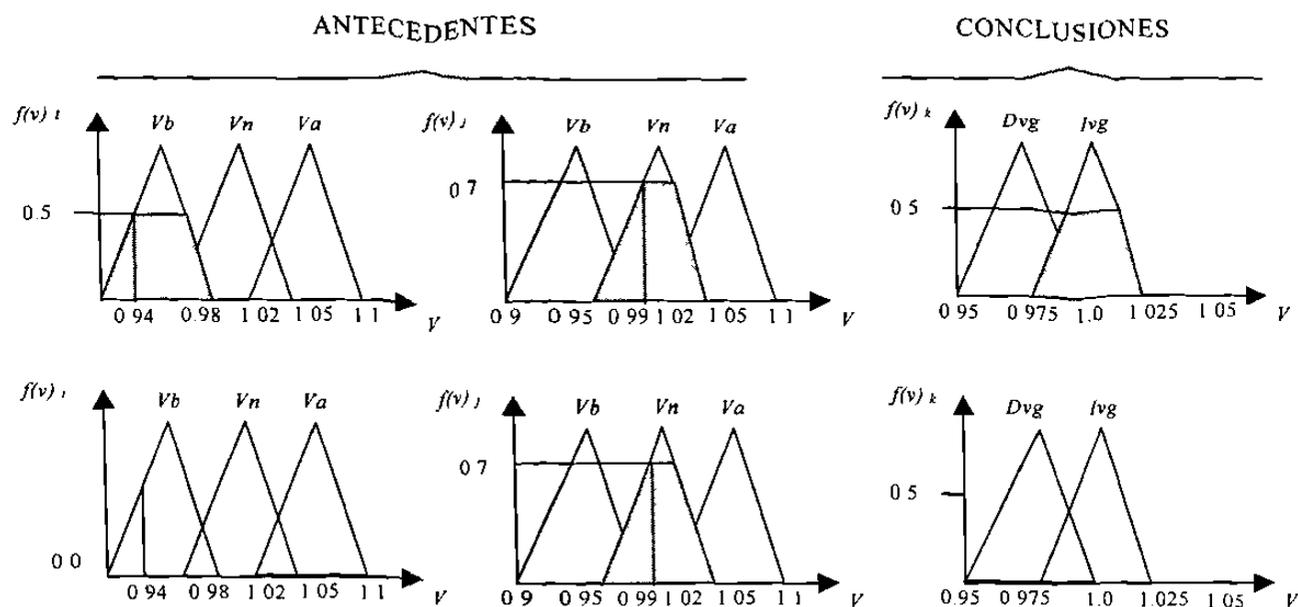


Fig. 4.8. Proceso de evaluación de una regla.

4.5.3 Desfusificación de salida

La desfusificación de los conjuntos difusos obtenidos del proceso de evaluación de reglas determinan los valores exactos de salida del SLD. El método más comúnmente utilizado es el cálculo de los Centroides, que determina el centro del área resultante de la intersección de los conjuntos difusos de salida. Existen más métodos como bisectores, medio del máximo (es el promedio de los valores máximos de la salida del conjunto), el más grande del máximo y el más pequeño del mínimo, etc.. El resultado de la evaluación de las reglas es una salida difusa, de las cuales se especifica el conjunto de los grados de membresía de los cambios de voltaje en los nodos de generación.

El proceso de desfusificación mediante el método del centroide se describe en la Fig. 4.9, utilizando el resultado obtenido en el ejemplo de dos reglas de la sección 4.4.2, en el cual se realiza la agregación de los conjuntos difusos truncados de salida en el proceso de evaluación de reglas.

En este caso, el valor exacto (no difuso) de incremento del voltaje de generación de la variable de salida (Vgk) es de 1.015 p.u., con lo cual se estima corregir el problema en los nodos de carga V_i . Cabe hacer mención que las salidas desfusificadas indican un cambio final en el voltaje de generación, es decir, este voltaje final es el nuevo voltaje en generación ($Vg_{i+1} = Vg_i + \Delta Vg_{SLD}$).

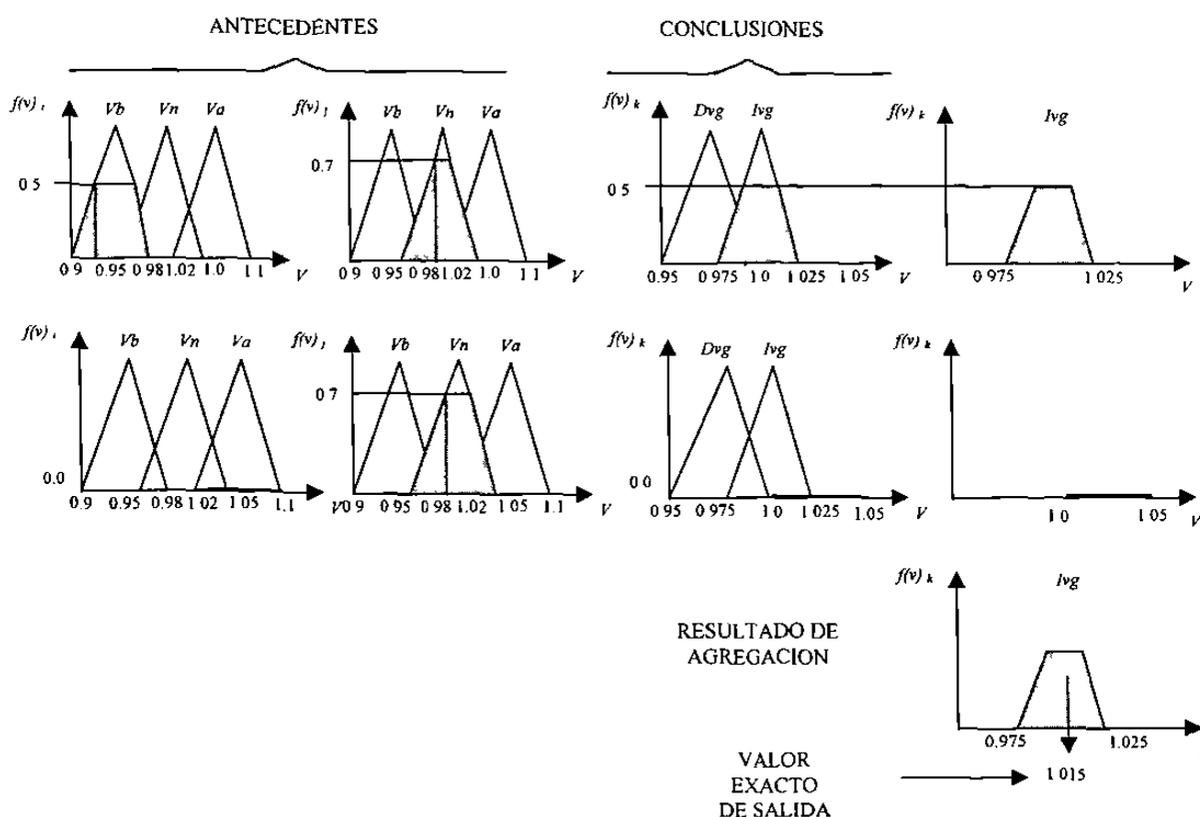


Fig. 4.9. Proceso de desfusificación mediante el método de centroide.

4.6 Evaluación de la solución

El **SLD** determina los cambios de voltaje en los nodos de generación del sistema eléctrico de potencia para solucionar los problemas de voltaje (bajo, alto) en los nodos de

carga. Con esta información disponible se calcula los nuevos voltajes de generación ($V_{g_{i+1}} = V_{g_i} + \Delta V_{g_{SLD}}$) y se realiza un nuevo estudio de flujo (ver Fig. 4.2).

Si los resultados del nuevo estudio indican que todos los nodos tienen un voltaje dentro de límites operativo del sistema eléctrico de potencia ($\pm 5\%$), significa que los cambios propuestos por el SLD son apropiados para resolver el problema; el SLD se pone nuevamente en operación cuando se detecta un nuevo problema de voltaje en el sistema eléctrico de potencia. Si por el contrario, los resultados del segundo estudio de flujos arrojan evidencia de que aún existen nodos con problemas de voltaje, el SLD vuelve a ejecutarse para determinar un nuevo cambio en los voltajes de generación para resolver el problema.

4.7 Conclusiones

En este capítulo se ha presentado la estructura en forma general y específica para un sistema de lógica difusa (SLD). Tal estructura la forman tres etapas fusificación, evaluación de reglas y defusificación, donde cada una fue desarrollada explícitamente. También se da la relación de los parámetros que se caracterizan en la base de conocimientos, así también, los conceptos utilizados para cada una de las etapas.

Dado el concepto básico del problema del control de voltaje y la estructura de un SLD, se realiza la aplicación de la metodología propuesta, donde se da una explicación en forma detallada, utilizando ejemplos en cada etapa, mostrando así su simplicidad.

CAPITULO 5

RESULTADOS DE LA APLICACION DEL SLD EN EL CONTROL DE VOLTAJE EN SISTEMAS ELECTRICOS DE POTENCIA

5.1 Introducción

Existen diferentes alternativas de solución al problema de control de voltaje en un sistema eléctrico de potencia, así como distintas estrategias de solución, como son el maximizar la reserva de potencia reactiva en el sistema, minimizar el número de acciones de control necesarias o mantener los voltajes del sistema cerca del perfil plano (1.0 p.u.). En esta tesis se planteó la solución del problema mediante el desarrollo de un **SLD**, que utiliza la experiencia de los operadores más que de un modelo matemático basado en la estructura de la red eléctrica. En este capítulo se presentan los resultados obtenidos por el **SLD** y un programa de flujos óptimos que minimiza pérdidas (**FOMP**) ante distintos eventos ó condiciones simuladas en el sistema de prueba de 9 nodos del IEEE. Al final se establecen las principales diferencias entre ambas alternativas, así como sus ventajas y desventajas en la solución del problema de control de voltaje.

5.2 Metodología de análisis de resultados

El comportamiento del **SLD** propuesto en esta tesis para resolver el problema de control de voltaje en un sistema de potencia en estado estable se analizó a través de la simulación de un conjunto de condiciones operativas (variaciones de carga y cambios de topología) en el sistema de 9 nodos del IEEE. A partir de un caso base, donde todos los voltajes de los nodos de carga están dentro del margen de operación del sistema de ($\pm 5\%$), se simularon tres tipos de eventos: a) el aumento de carga en uno o varios nodos, b) la disminución de carga en uno o varios nodos y c) la desconexión de líneas de transmisión; de esta forma se obtuvo una nueva condición de operación del sistema donde el voltaje en uno o

más nodos de carga violaba los límites de operación. El objetivo de desconectar una línea de transmisión del sistema fue comprobar que el control de voltaje realizado por el **SLD** fuera capaz de mantener los voltajes en todos los nodos dentro de límites operativos, cumpliendo con las restricciones operativas (análisis de seguridad), después de la desconexión de la línea. Cada uno de estos casos fue resuelto por separado por el **SLD** y por un programa de flujos óptimos con minimización de pérdidas (**FOMP**); ambos métodos resuelven el problema de control de voltaje, ya que llevan el voltaje de todos los nodos de carga dentro de límites operativos establecidos. En este capítulo se presentan algunos de los casos analizados.

Debido a que los dos métodos resuelven el problema mediante técnicas distintas (experiencia humana en el caso del **SLD**, y un modelo matemático para el **FOMP**), ambas soluciones son analizadas tomando como referencia las pérdidas registradas y el perfil de voltaje final en el sistema de potencia. El objetivo es establecer algunas de las principales diferencias entre ambos métodos y definir en forma clara las ventajas y desventajas de cada uno en la solución del problema de control de voltaje. Los resultados obtenidos de este análisis demuestran que la aplicación de lógica difusa es factible, y que debe continuarse investigando en esta área.

5.3 Sistema de 9 nodos del IEEE

El sistema de potencia que se utilizó para validar los resultados del **SLD** fue el de 9 nodos del IEEE, que se muestra en la Fig. 5.1. El análisis que se realizó en este sistema de potencia fue con el objetivo de adquirir experiencia sobre su comportamiento ante diferentes condiciones operativas que se puedan presentar, de manera de definir el conjunto de reglas que rigen las acciones de control que se deben de realizar (ver apéndice A.2). La formación de esta base de conocimientos se comprobó mediante estudios de flujo utilizando un análisis de sensibilidad. En las Tablas 5.1 y 5.2 se muestran los parámetros de líneas y cargas en los nodos del sistema respectivamente.

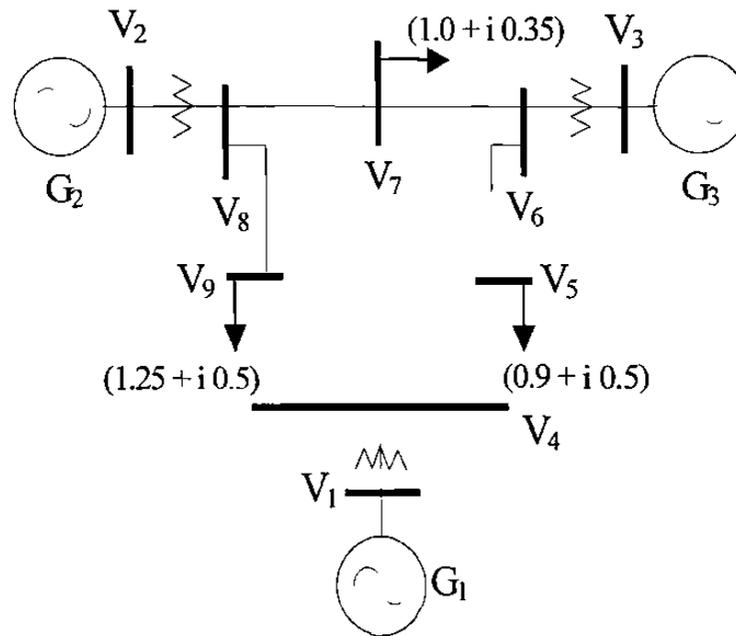


Fig. 5.1. Sistema de 9 nodos del IEEE.

TABLA 5.1. PARAMETROS DEL SISTEMA (P.U.).

Línea	Nodo	R	X	B	Tap
1	1-4	0.0	0.0576	0.0	1.0
2	3-6	0.0	0.0586	0.0	1.0
3	4-5	0.017	0.092	0.158	1.0
4	5-6	0.039	0.17	0.358	1.0
5	6-7	0.0119	0.1008	0.209	1.0
6	7-8	0.0085	0.072	0.149	1.0
7	8-2	0.0	0.0625	0.0	1.0
8	8-9	0.032	0.161	0.306	1.0
9	9-4	0.01	0.085	0.176	1.0

TABLA 5.2. DATOS INICIALES DE NODOS (P U)

Nodo	Tipo de Nodo	Generación		Carga		V	Angulo
		P	Q	P	Q		
1	SLK	0.0	0.0	0.0	0.0	1.0	0
2	P-V	1.0	1.63	0.0	0.0	1.0	0
3	P-V	1.0	0.85	0.0	0.0	1.0	0
4	P-Q	--	--	0.0	0.0	1.0	0
5	P-Q	--	--	0.9	0.3	1.0	0
6	P-Q	--	--	0.0	0.0	1.0	0
7	P-Q	--	--	1.00	0.35	1.0	0
8	P-Q	--	--	0.0	0.0	1.0	0
9	P-Q	--	--	1.25	0.50	1.0	0

5.4 Caso 1: Aumento de carga en un nodo del sistema

Una de las contingencias aplicadas al sistema de prueba para mostrar que la metodología propuesta es factible y adaptable es el aumento de carga en uno de los nodos del sistema de prueba. Se simularon diferentes escenarios de un aumento de carga en distintos nodos, obteniendo resultados satisfactorios. Se describe a continuación el caso de un incremento de carga de un 90 % en el nodo 7. En la Tabla 5.3 se muestran los resultados obtenidos mediante el **SLD** y la aplicación de flujos óptimos de pérdidas mínimas (**FOMP**). En la segunda y tercera columna de la Tabla 5.3 se indican los voltajes de los nodos del sistema en el caso base y los posteriores a la contingencia respectivamente, obtenidas por un estudio de flujo. En la cuarta y quinta columna se indican los voltajes de generación propuestos por **SLD** y **FOMP** para resolver el problema de control de voltaje y pérdidas mínimas respectivamente. La sexta y séptima columnas indican, los voltajes en generación propuestos y los voltajes finales en los nodos de carga obtenidos por estudios de flujos a partir de los cambios de voltajes en generación especificados por **SLD** y **FOMP** respectivamente.

TABLA 5.3. RESULTADOS PARA EL CASO 1.

Nodo	Estudio de flujo (V_{i_0})		Voltajes de generación (V_{g_i})		Estudio de flujo (V_{i_f})	
	Caso base	Caso 1	SLD	FOMP	SLD	FOMP
1	1.0	1.0	1.0226	1.05	1.0226	1.05
2	1.0	1.0	1.0274	1.05	1.0274	1.05
3	1.0	1.0	1.0226	1.05	1.0226	1.05
4	0.99	0.9841	--	--	1.0101	1.041
5	0.9788	0.9696	--	--	0.9969	1.029
6	1.0043	0.9888	--	--	1.0144	1.045
7	0.9871	0.9474	--	--	0.9767	1.008
8	0.9978	0.9797	--	--	1.0081	1.036
9	0.9633	0.9536	--	--	0.9823	1.014

Se observa que el **SLD** eleva los voltajes de nodos generadores 1, 2 y 3 a 1.0226, 1.0274 y 1.0226 p.u. respectivamente. Con esta combinación de cambios en los voltajes de generación se logra el objetivo de mantener el voltaje en el nodo de carga 7 dentro de límites operativos ($\pm 5\%$). Analizando los resultados del **SLD**, se observa que el nodo generador 2 es el que tiene mayor participación, lo cual se comprobó mediante un análisis de sensibilidad. Este aumento del 90% en la carga fue el máximo que pudo controlar el **SLD** en los nodos de carga del sistema.

Si se analiza la solución de **FOMP**, los voltajes resultantes tienen una característica especial, la cual cumple con el objetivo de minimizar pérdidas y mantener el nivel de voltaje en los nodos del sistema dentro del rango de operación establecido ($\pm 5\%$).

Para el algoritmo de **FOMP**, el voltaje de los nodos de generación están operando en los límites superiores, para minimizar pérdidas. Para este evento **FOMP** corrige de forma satisfactoria el problema de voltaje en el nodo 7, ajustándolo a un valor muy cercano al nominal. Evaluando en forma global los voltajes en los nodos de carga, la solución propuesta

por el **SLD** aproxima estos voltajes (carga), al voltaje nominal. En la solución del **SLD**, se propone una combinación en los voltajes de generación, obteniendo resultados satisfactorios dentro de los límites operativos en los voltajes de los nodos de carga.

El perfil de los voltajes se muestra en la Fig. 5.2, considerando la solución del problema por ambos métodos (**SLD**, **FOMP**). Puede apreciarse que el **SLD** logra un perfil de voltaje uniforme más cercano al nominal, con las consiguientes ventajas para el SEP. La Tabla 5.4 nos muestra los resultados de las pérdidas de potencia activa y consumo de potencia reactiva por ambos métodos. El resultado por **FOMP** cumple su función objetivo minimizando pérdidas en la potencia activa menores que el **SLD**, y el consumo de potencia reactiva en el resultado por **SLD** indica que se está recibiendo menos potencia reactiva del sistema que el de **FOMP**.

TABLA 5.4. RESULTADOS PARA EL CASO 1 EN LAS POTENCIAS P Y Q.

	Pérdidas P	Consumo Q
SLD	0.0497908	-0.6003510
FOMP	0.0400815	-0.82251658

Una forma de visualizar la aproximación del perfil de voltaje, es calcular el error medio cuadrático entre el voltaje nominal ($V_N = 1.0$ p.u.) y los voltajes obtenidos por ambos métodos sólo para los nodos de carga:

$$E = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n (1.0 - V_i)^2 \quad (5.1)$$

donde E es la suma del error medio cuadrático y n es el número de nodos de carga. Así, la solución por **SLD** tiene un error de $0.6203e^{-3}$ y la solución por **FOMP** tiene un error de $3.052e^{-3}$.

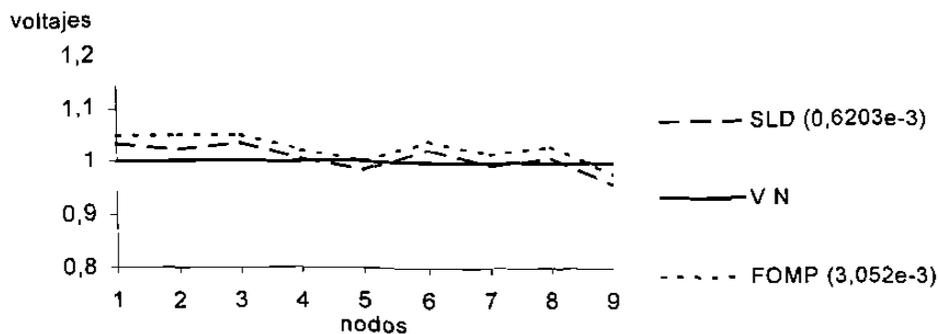


Fig. 5.2. Perfil de voltajes obtenidos en el caso 1.

Un aspecto importante a resaltar es el hecho de la solución por el **SLD** se alcanza en una sola iteración, es decir, que a partir de la información del estudio de flujo inicial que indica los nodos con problemas de voltaje, el **SLD** calcula los nuevos voltajes en los nodos de generación para resolver el problema, lo que se verifica con un segundo estudio de flujo.

5.5 Caso 2: Aumento de carga en todos los nodos de carga del sistema

Para llegar a la violación de voltaje en diversos nodos de carga se realizó un aumento de carga paulatino hasta llegar a un aumento del 45 % en todos los nodos de carga, provocando la violación del límite mínimo de operación del voltaje en los nodos 5 y 9 de 0.95 p.u. En la Tabla 5.5 se presentan los resultados obtenidos por el **SLD** y por **FOMP** en la sexta y séptima columna respectivamente. Los resultados obtenidos por el **SLD** muestran una mayor participación de los generadores 1 y 3 para solucionar el problema de voltaje en los nodos de carga 5 y 9. También puede apreciarse que el perfil de voltaje del sistema completo es bastante uniforme.

Analizando los resultados obtenidos por **FOMP** se pueden apreciar los siguientes aspectos: primero, el generador 1 llegó al límite máximo de voltaje. El segundo aspecto a observar es el perfil de voltaje que se obtiene, el cual es elevado pero uniforme; como se

puede apreciar en la Tabla 5.5 séptima columna; también se observa que se logra corregir el problema de voltaje para los nodos 7 y 9 de forma satisfactoria. La Fig. 5.3. presenta las gráficas de los voltajes para ambos métodos. Para este caso los errores para **SLD** y **FOMP** fueron de $1.346e^{-3}$ y $2.0935e^{-3}$ respectivamente.

TABLA 5.5 RESULTADOS PARA EL CASO 2.

Nodo	Estudio de flujo (V_{i_0})		Voltajes en generación (V_{g_i})		Estudio de flujo (V_{i_f})	
	Caso base	Caso 2	SLD	FOMP	SLD	FOMP
1	1.0	1.0	1.0348	1.05	1.0348	1.05
2	1.0	1.0	1.0227	1.05	1.0227	1.05
3	1.0	1.0	1.0355	1.05	1.0355	1.05
4	0.99	0.9661	--	--	1.0043	1.022
5	0.9788	0.9431	--	--	0.9834	1.000
6	1.0043	0.9891	--	--	1.0253	1.043
7	0.9871	0.9604	--	--	0.9944	1.016
8	0.9978	0.9798	--	--	1.0098	1.034
9	0.9633	0.9208	--	--	0.9596	0.979

Nuevamente el algoritmo **FOMP** cumple con la función objetivo de minimizar pérdidas, para lo cual eleva los voltajes de generación al límite máximo. En la Tabla 5.6 se muestra el consumo de la potencia reactiva que indica que el sistema esta aportando menos reactivos en la solución por **SLD**.

TABLA 5.6. RESULTADOS PARA EL CASO 2 EN LAS POTENCIAS P Y Q.

	Pérdidas P	Consumo Q
SLD	0.0676559	-0.3381620
FOMP	0.0605626	-0.5401657

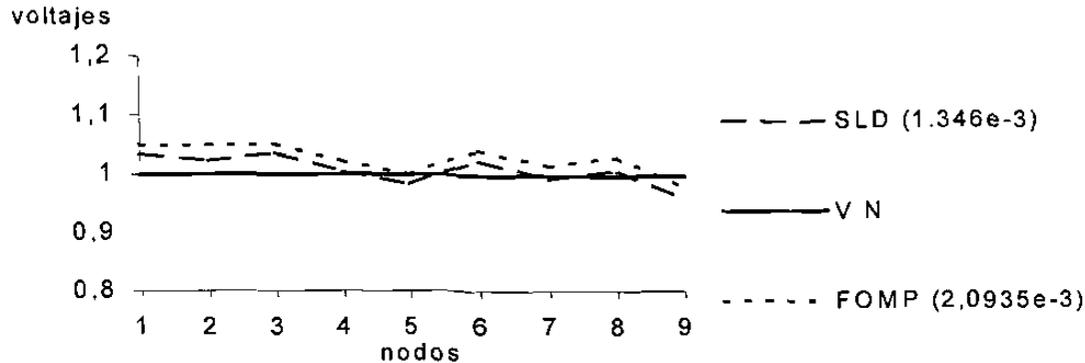


Fig. 5.3. Perfil de voltajes obtenidos para el caso 2.

5.6 Caso 3: Desconexión de una línea

Otro de los casos analizados fue el análisis en estado estable de la desconexión de una línea; este cambio de topología de la red de transmisión modifica la sensibilidad que existe entre nodos, además de aumentar la carga en las otras líneas del sistema. Para este caso se simuló la desconexión de la línea 6-7.

Los resultados obtenidos para este caso se muestran en la Tabla 5.7; se puede apreciar que la desconexión de la línea 6-7 no tuvo un gran impacto en el sistema, ya que el único nodo que se encuentra con problemas de voltaje es el 7 lo que significa que la línea no estaba muy cargada. En este caso, el nodo generador 2 es el que presenta un mayor incremento en su voltaje de generación.

Es importante resaltar el hecho de que la solución establecida por el SLD es satisfactoria, sin la necesidad de obtener un modelo completo del sistema de potencia, donde se refleje el cambio de topología, lo que significa que las reglas de la base de conocimientos son consistentes ante cambios moderados en la topología de la red. Este aspecto representa una buena característica de la metodología propuesta en esta tesis, ya que el SLD es capaz de tolerar cambios en la topología del sistema sin necesidad de modificar su base de conocimientos. Cabe resaltar que esta base de conocimientos es específica para el sistema de

9 nodos del IEEE. En el caso de cambios muy grandes de la topología del sistema será necesario modificar las reglas de la base de conocimientos.

TABLA 5.7. RESULTADOS PARA EL CASO 3.

Nodo	Estudio de flujo (V_{i_0})		Voltajes en generación (V_{g_i})		Estudio de flujo (V_{i_f})	
	Caso base	Caso 3	SLD	FOMP	SLD	FOMP
1	1.0	1.0	1.0226	1.05	1.0226	1.05
2	1.0	1.0	1.0319	1.05	1.0319	1.05
3	1.0	1.0	1.0226	1.042	1.0226	1.042
4	0.99	0.9816	--	--	1.0081	1.041
5	0.9788	0.9679	--	--	0.9952	1.031
6	1.0043	1.0046	--	--	1.0287	1.05
7	0.9871	0.9443	--	--	0.9791	1.005
8	0.9978	0.9777	--	--	1.0108	1.035
9	0.9633	0.9510	--	--	0.9817	1.014

En la Fig. 5.4 se muestran en forma gráfica los perfiles de voltaje obtenidos por ambos métodos; nuevamente se puede apreciar que el **SLD** modifica los voltajes de los nodos de generación para solucionar el problema en el nodo 7, y mantiene un perfil de voltaje uniforme; esto se puede apreciar en el error medio cuadrático asociado a la solución de ambos métodos que para este caso los errores son $0.9002e^{-3}$ y $3.294e^{-3}$ para las soluciones obtenidas por **SLD** y **FOMP** respectivamente. En lo que respecta a la solución obtenida por el método de **FOMP**, lo hace elevando sus voltajes en generación debido que la función objetivo es minimizar pérdidas, por lo que los resultados en el perfil de voltaje del sistema son elevados, pero su perfil de voltaje es uniforme con lo cual corrige el problema de voltaje.

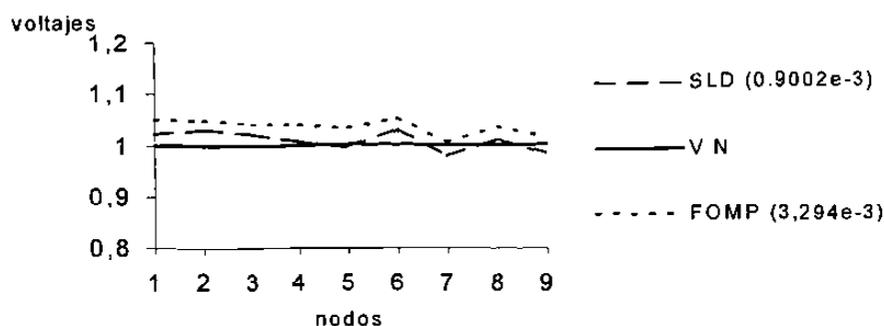


Fig. 5.4. Perfil de voltajes obtenidos en el Caso 3.

La Tabla 5.8 muestra los resultados por ambos métodos para pérdidas de potencias activas y el consumo de potencia reactiva. De nuevo se observa que FOMP minimiza pérdidas de potencia activa y el resultado para este caso por SLD indica de nuevo que el sistema esta aportando menos reactivos con respecto a la solución propuesta por FOMP.

TABLA 5.8. RESULTADOS PARA EL CASO 3 EN LAS POTENCIAS P Y Q.

	Pérdidas P	Consumo Q
SLD	0.0646157	-0.5503380
FOMP	0.0302148	-0.7627291

5.7 Caso 4: Desconexión de carga

Por lo general, los problemas de voltaje en un sistema eléctrico de potencia son de voltajes bajos, que en condiciones críticas pueden causar un colapso de voltaje. En los casos antes analizados, el SLD resolvió los problemas de bajos voltajes en nodos de carga originados por diversas contingencias. Para condiciones de voltajes altos en el sistema de potencia se simuló una pérdida total de carga en el sistema, con los generadores operando en su límite superior de voltaje de generación, para analizar el desempeño del SLD. La Tabla 5.9 muestra los resultados obtenidos por el SLD para esta contingencia. Esto demuestra que el SLD modifica los voltajes de los nodos de generación en forma apropiada, independientemente si se trata de problemas de alto o bajo voltaje.

TABLA 5.9. RESULTADOS PARA EL CASO 4 (SOLUCION POR SLD).

Nodo	Estudio de flujo (V_{i_0})		Voltaje en generación (V_{g_i})	Estudio de flujo (V_{i_f})
	Caso base	Caso 4		
1	1.0	1.04	0.9785	0.9785
2	1.0	1.022	0.9746	0.9746
3	1.0	1.022	0.9787	0.9787
4	0.99	1.0246		0.9603
5	0.9788	1.0364		0.9746
6	1.0043	1.0455		0.9956
7	0.9871	1.0517		0.9997
8	0.9978	1.0431		0.9902
9	0.9633	1.0274		0.9639

5.8 Conclusiones del capítulo

En este capítulo se presentaron diversos casos de condiciones operativas en el sistema de prueba de 9 nodos del IEEE para validar los resultados del **SLD** para el control de voltaje en estado estable en un sistema eléctrico de potencia. Los resultados obtenidos fueron comparados con el método de flujos óptimos de minimización de pérdidas de potencias, demostrando las características del **SLD**.

Un aspecto importante a resaltar es el hecho de que la solución por el **SLD** se alcanza en una sola iteración; es decir, que a partir de la información del estudio de flujo inicial que indica los nodos con problemas de voltaje, el **SLD** calcula los nuevos voltajes en los nodos de generación para resolver el problema, que se verifican con un segundo estudio de flujo. Así, la estrategia de solución utilizada en el **SLD** consiste en determinar la mejor combinación de los voltajes en nodos de generación para solucionar el problema de voltaje; esta estrategia es basada en las reglas de la base de conocimientos del **SLD**, las cuales modelan el comportamiento de los voltajes de los nodos de carga ante cambios en voltajes en

los nodos de generación. Lo anterior representa una buena alternativa para control de voltaje en estado estable, además de que en algunos casos es una buena aproximación para pérdidas mínimas.

El análisis de los resultados indica que ambas alternativas (**SLD** y **FOMP**) resuelven el problema de control de voltaje durante contingencias (seguridad operativa), ya que mantienen los voltajes en todos los nodos del sistema dentro de límites operativos, cumpliendo con las restricciones operativas de la red. En ambos casos se obtienen perfiles de voltaje uniformes con la diferencia que el **SLD** obtiene un perfil con un valor promedio más cercano al nominal, mientras que el perfil de voltaje obtenido por **FOMP** tiene un valor promedio más elevado. Esto se debe a que la solución de **FOMP** tiene como función minimizar las pérdidas de potencia activa en el sistema.

Una característica importante del **SLD** es la capacidad de tolerar cambios en la topología del sistema sin necesidad de modificar su base de conocimientos. Cabe resaltar que esta base de conocimientos es específica para el sistema de 9 nodos del IEEE. En el caso de cambios muy grandes de la topología del sistema será necesario modificar las reglas de la base de conocimientos.

En todos los casos simulados se puede concluir que el **SLD** propone una modificación de los voltajes de los nodos de generación en forma apropiada, independientemente si se trata de problemas de alto o bajo voltaje y del número de nodos involucrados en el problema.

CAPITULO 6

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1 Introducción

Un objetivo de este proyecto fue determinar las características relevantes de la solución del problema de control de voltaje por medio de lógica difusa.

El método **SLD** propuesto en esta tesis determina el cambio necesario en los voltajes de generación para solucionar el problema de violación de voltaje en los nodos de carga, manteniendo los voltajes en los nodos del sistema lo más próximo a un perfil de voltaje nominal. De los resultados obtenidos en simulaciones ante diferentes condiciones operativas, se puede afirmar que el método propuesto cumple con el objetivo de controlar los voltajes de los nodos de carga dentro de los límites operativos manipulando adecuadamente los voltajes de los nodos de generación, cumpliendo con las restricciones operativas del sistema tanto en estado estable como después de haber ocurrido una contingencia

En este capítulo se presentan las conclusiones acerca de los resultados obtenidos por el capítulo 5, detallando la comparación que presenta con respecto al método de **FOMP**. También se presentan las limitaciones de la aplicación de esta metodología y las principales aportaciones de esta investigación. Finalmente se resume un conjunto de recomendaciones sobre investigaciones futuras de la operación y control de sistemas eléctricos de potencia utilizando técnicas de Inteligencia Artificial.

6.2 Conclusiones

Una característica del **SLD** presentado en esta tesis estriba en la representación formal del conocimiento, mediante la relación causa – efecto, que asocia las estrategias de solución de un problema que requiere la experiencia de un experto; este tipo de información se representa de una manera formal a través de un conjunto de reglas heurísticas. Esta metodología se aplica en la solución del problema de control de voltaje en sistemas eléctricos de potencia en estado estable.

El análisis de los resultados indica que ambas alternativas (**SLD** y **FOMP**) resuelven el problema de control de voltaje durante contingencias (seguridad operativa), ya que mantienen los voltajes en todos los nodos del sistema dentro de límites operativos, cumpliendo con las restricciones operativas de la red. En ambos casos se obtienen perfiles de voltaje uniformes con la diferencia que el **SLD** obtiene un perfil con un valor promedio más cercano al nominal, mientras que el perfil de voltaje obtenido por **FOMP** tiene un valor promedio más elevado. Esto se debe a que la solución de **FOMP** tiene como función minimizar las pérdidas de potencia activa en el sistema.

Una característica importante del **SLD** es la capacidad de tolerar cambios en la topología del sistema sin necesidad de modificar su base de conocimientos. Cabe resaltar que esta base de conocimientos es específica para el sistema de 9 nodos del IEEE. En el caso de cambios muy grandes de la topología del sistema será necesario modificar las reglas de la base de conocimientos.

Otra ventaja es que la combinación de voltajes de generación propuesta por el **SLD** se obtiene en la primera iteración, indicando la efectividad computacional respecto al método **FOMP**.

Una ventaja de la alternativa propuesta es la mayor flexibilidad en la formulación del problema, la eficiencia computacional, y una estructuración sencilla del sistema. Cabe

hacer mención que el sistema de lógica difusa propone los voltajes en los nodos de generación para llevar los voltajes de los nodos de carga dentro de los límites de operación del SEP ante contingencias como variaciones de carga y cambios de topología de la red.

La principal limitación del **SLD** propuesto en esta tesis está en el conjunto de reglas de la base de conocimientos. Estas reglas sólo son válidas para el sistema analizado, por lo cual es necesario desarrollar un grupo de reglas diferentes en caso que se desee aplicar el **SLD** en otro SEP. Esto se debe a que las reglas reflejan el comportamiento de las variables de la red, el cual depende de la topología y las características de cada elemento.

Otra limitación del **SLD** es el software para su implementación. Para este trabajo se utilizó el Toolbox Fuzzy Logic de Matlab, el cual tiene una capacidad limitada en el número de variables de entrada que se pueden considerar.

6.3 Aportaciones

Las principales aportaciones de este proyecto de investigación son:

- Demostrar la factibilidad de utilizar un sistema de lógica difusa para solucionar el problema de control de voltaje en nodos de carga en un sistema eléctrico de potencia en estado estable.
- Desarrollo e implementación de un sistema de lógica difusa (**SLD**) para mantener el voltaje en los nodos de carga dentro de límites operativos ($\pm 5\%$ del voltaje nominal) ante diferentes cambios operativos en el SEP, controlando los voltajes en los nodos de generación. Las principales características del **SLD** desarrollado son su capacidad de solucionar problemas de alto o bajo voltaje manipulando adecuadamente los voltajes de los nodos de generación en el SEP, independientemente del número de nodos con problemas, y una base de conocimientos con un conjunto de reglas consistentes que toleran cambios moderados de topología en la red derivados de una contingencia.

6.4 Recomendaciones para investigaciones futuras

Las recomendaciones para la realización de investigaciones futuras están encaminadas a comprobar la efectividad de la metodología propuesta y aumentar el desempeño del **SLD** desarrollado. Las áreas de investigación en las que se recomienda seguir el trabajo son:

- Diseñar un método de generación de reglas difusas utilizando las variaciones en los voltajes de generación como entrada a este sistema, y la respuesta en las variaciones en los voltajes de nodos de carga como salidas. De esta forma, sería posible desarrollar un **SLD** para control de voltaje en un SEP, sin importar su configuración, y resolviendo el problema de adquisición de experiencia de un experto en la operación del sistema de potencia.
- Establecer un método de sintonización de las funciones membresía del **SLD** que permita capturar en forma precisa el comportamiento de las variables eléctricas involucradas en el control de voltaje, mejorando así el desempeño del **SLD**.
- Incluir otros tipos de controles que existan en un SEP para el control de voltaje en estado estable, como son la conexión/desconexión de reactores y bancos de capacitores, cambios de tap en transformadores, compensadores estáticos de VAR, entre otros. Para esto, es necesario modelar su comportamiento mediante conjuntos difusos antes de incluirlos en las estrategias de control del **SLD**.
- Incluir objetivos adicionales en la formulación del problema, tales como el mantener una reserva alta de potencia reactiva, minimizar el número de acciones de control, etc.
- Evaluar el efecto de otras formas de funciones de membresía y operaciones de agregación en la eficiencia del **SLD**.
- Enfocar el desarrollo del **SLD** de control de voltaje como una herramienta computacional de apoyo a la toma de decisiones para los operadores en centros de control.
- Formular el problema de **FOMP** modelando las funciones objetivo mediante conjunto difusos.

REFERENCIAS

- [1] A. Kaufman, *Introducción a la Teoría de los Subconjuntos Borrosos*, Universidad de Lovania, Enero 1982.
- [2] K.R.C. Mamandur, "Emergency adjustments to VAR control variables to alleviate over-voltages, under-voltages, and generator VAR limit violations," *IEEE Trans. on Power System*, Vol. PAS-101, no. 5, May 1982.
- [3] H. J. Zimmermann, *Fuzzy Set Theory and Its Applications*, Boston MA: Kluwer, 1985.
- [4] Chen-Ching Liu and Kevin Tomosovic, "An expert system assisting decision-making of reactive power/voltage control," *IEEE Trans. on Power Systems*, vol. PWRS-1, no. 3, August 1986, pp. 195-201.
- [5] F. Aboytes, *Análisis de Sensitividad para el Control de Voltaje y Potencia reactiva*, *SIEEEEM-87*, Monterrey N.L., Septiembre de 1987.
- [6] S. J. Cheng, O.P. Malik and G. S. Hope, "An expert system for voltage and reactive power control of a power system," *IEEE/PES winter meeting*, 1988, pp. 153-159.
- [7] Gerge F. Luger, William A. Stubblefield, *Artifial Intelligence and Design of Exper5t Systems*, University of New Mexico, Albuquerque, 1989.
- [8] F. Aboytes, *Análisis de Sistemas de Potencia*, CFE, México, 1990.
- [9] Tharams Dillon and Michael A. Laughton, *Expert system applications in power sytems*, *Prentice Hall International Series in Power Sytems computation*, 1990.
- [10] Vladimiro Miranda, Manuel A.C.C. Matos and J. Tome. Saraiva, "Fuzzy load flow new algorithms incorporating uncertain generation and load representation," *Tenth Power Systems Computation Conference*, 19 -24 August 1990, pp. 621-627.
- [11] Carlos Pérez Rojas, *Sensitividad (newton raphson polar)*, *Programa Doctoral en Ingeniería Eléctrica FIME-UANL*, Monterrey N.L., 13 Diciembre 1990, pp. 1-8.
- [12] F. Aboytes, *Control de Voltaje en Sistemas Eléctricos de Potencia*, *Programa Doctoral en Ingeniería Eléctrica FIME-UANL*, Mayo 1991.

- [13] Thierry F. Godart and Hans B. Puttgen, "A reactive path concept applied within a voltage expert systems," *IEEE Trans. on Power Systems*, vol. 6, no. 2, May 1991, pp. 787-793.
- [14] M. Huneault, F.D. Galiana, "A survey of the optimal power flow literature," *IEEE Trans. on Power Systems*, vol. 6 no. 2, May 1991.
- [15] V. Miranda and J. T. Saraiva, "Fuzzy modeling of power systems optimal load flow," *IEEE Trans. on Power System*, vol. 7, no. 2, May 1992, pp. 843-849.
- [16] Patrick Henry Winston, *Artificial Intelligence*, Massachusetts, Institute of Technology, June 1992.
- [17] Hamid R. Berenji and Pratap Khedkar, Learning and tuning fuzzy logic controllers through reinforcements, *IEEE Trans. on Neuronal Networks*, vol. 3, no. 5, September 1992, pp. 724-740.
- [18] D. Driankov, H. Hellendoorn and M. Renfran, *An Introduction to Fuzzy Control*, Springer – Verlay
- [19] K. H. Abdul-Rahman and S. M. Shahidehpor, "A fuzzy-based optimal reactive power control," *IEEE Trans. on Power Systems*, vol. 8, no. 2, May 1993 pp. 662-670.
- [20] J. Tomé Saraiva and Vladimiro Miranda, "Impacts in power systems modeling from including fuzzy concepts in models," *IEEE- NTUA Athena PowerTech*, vol. 1, 5-8 September 1993, pp. 417-422.
- [21] Li – Xin Wang, *Adaptative Fuzzy Systems and Control*, Universidad de California at Berkley, PTR 1994.
- [22] K. H. Abdul-Rahman and S. M. Shahidehpor, "Reactive power optimization using fuzzy load representation," *IEEE Trans. On Power Systems*, vol. 9, no. 2, May 1994, pp. 898-905.
- [23] Chin – Teng Lin and C.S. George Lee, *Neural Fuzzy Systems*, University Hinschy Taiwan, Purdue University Indiana, 1995.
- [24] Ned Gulley and J.-S. Roger Jang, *Fuzzy Logic Toolbox, The MathWorks, Inc.*, January 1995.
- [25] Victor V. Domínguez, *Controlador Neuronal Difuso*, Programa Doctoral en Ingeniería Eléctrica FIME-UANL, Monterrey N.L., Marzo 1995.

- [26] J.A. Momoh and K. Tomosovic, "Overview and literature survey of fuzzy set theory in power systems," *IEEE Trans. on Power Systems*, vol. 10, no. 3, August 1995, pp 1676-1690.
- [27] Ching-Tzong Su and Chien-Tung Lin, "A new fuzzy control approach to voltage enhancement for power systems," *IEEE Trans. on Power Systems*, vol. 11, no. 3, August 1996, pp. 1654-1659.
- [28] Iraj Dabbaghchi and Chair, "Fuzzy set applications in power systems," *IEEE PICA 97 Tutorial Committee*, Columbus, Ohio USA, May 15 1997.
- [29] S. Chávez N., *Flujos Optimos en Coordenadas Rectangulares Resuelto por el Método de Newton: Comparación con la Forma Polar*, Tesis de Licenciatura, Instituto Tecnológico de Morelia, Agosto 1997.
- [30] S.K. Starrett, W. R. Anis Ibrahim, B.P. Rust and A.L. Turner, "An on line fuzzy logic system for voltage/var control and alarm processing," *IEEE Winter Meeting*, Vol 1, New York USA, February 1998, pp. 766-771.
- [31] Ming Mo, Abraham Kandel and Menahem Friedman, "Representing and comparing two kinds of fuzzy numbers," *IEEE Trans. on Systems, Man, and Cybernetics*, Vol. 28, No. 4, November 1998.
- [32] Ming Mo, Abraham Kandel and Menahem Friedman, "Representing and comparing two kinds of fuzzy numbers," *IEEE Trans. on Systems, Man, and Cybernetics*, Vol. 28, No. 4, November 1998.

APENDICE

SISTEMA DE LOGICA DIFUSA

% En este apéndice se muestra el **SLD** implementado con la herramienta de lógica difusa
 % de MATLAB. Se indica el tipo de sistema de inferencia que se utilizó (*mamdani*), así la
 % definición de entradas y salidas del sistema, las funciones membresía que se utilizaron,
 % que son triangulares (*trimf*), y el rango de cada una de ellas en el universo de discurso,
 % tanto para las variables de entrada como de salida. En la segunda parte de éste apéndice
 % se muestran las reglas de la base de conocimientos del **SLD** expresados en forma verbal.

A.1 Implementación del SLD en MATLAB

[System]

Name='DA3M9B'

Type='mamdani'

NumInputs=6

NumOutputs=3

NumRules=24

% Método utilizado para la operación AND de conjuntos difusos X, Y,

% $\min\{x, y\}, x \in X, y \in Y$.

AndMethod='min'

% Método utilizado para la operación OR de conjuntos difusos X, Y,

% $\max\{x, y\}, x \in X, y \in Y$.

OrMethod='max'

% Método de agregación difusa del mecanismo de inferencia, como implicación y

% agregación determina la regla composicional de inferencia sup – star.

ImpMethod='min'

% Método de implicación difusa del mecanismo de inferencia, capítulo 3, sección 3.8.

AggMethod='max'

% Método de defusificación.

DefuzzMethod='centroid'

[Input1]

% Nombre de la variable: Voltaje en el nodo 4.

Name='v4'

% Rango del universo de discurso p.u.

Range=[0.9 1.1]

% Cardinalidad del conjunto calificativo de V4.

NumMFs=5

% Función de membresía triangular (trimf) para el primer elemento “voltaje muy bajo” del
% conjunto calificativo de la variable de entrada V4.

MF1='voltaje muy bajo':trimf,[0.9 0.9249 0.9499]

MF2='voltaje bajo':trimf,[0.9376 0.9624 0.9874]

MF3='vn':trimf,[0.9751 1 1.025]

MF4='voltaje alto':trimf,[1.013 1.038 1.062]

MF5='voltaje muy alto':trimf,[1.049 1.075 1.1]

[Input2]

Name='voltaje en nodo 5'

Range=[0.9 1.1]

NumMFs=5

MF1='voltaje muy bajo':trimf,[0.9 0.9249 0.9499]

MF2='voltaje bajo':trimf,[0.9376 0.9624 0.9874]

MF3='vn':trimf,[0.9751 1 1.025]

MF4='voltaje alto':trimf,[1.013 1.038 1.062]

MF5='voltaje muy alto':trimf,[1.049 1.075 1.1]

[Input3]

Name='v6'

Range=[0.9 1.1]

NumMFs=5

MF1='voltaje muy bajo':trimf,[0.9 0.9249 0.9499]

MF2='voltaje bajo':trimf,[0.9376 0.9624 0.9874]

MF3='vn':trimf,[0.9751 1 1.025]

MF4='voltaje alto':trimf,[1.013 1.038 1.062]

MF5='voltaje muy alto':trimf,[1.049 1.075 1.1]

[Input4]

Name='v7'

Range=[0.9 1.1]

NumMFs=5

MF1='voltaje muy bajo':trimf,[0.9 0.9249 0.9499]

MF2='voltaje bajo':trimf,[0.9376 0.9624 0.9874]

MF3='vn':trimf,[0.9751 1 1.025]

MF4='voltaje alto':trimf,[1.013 1.038 1.062]

MF5='voltaje muy alto':trimf,[1.049 1.075 1.1]

[Input5]

Name='v8'

Range=[0.9 1.1]

NumMFs=5

MF1='voltaje muy bajo':trimf,[0.9 0.9249 0.9499]

MF2='voltaje bajo':trimf,[0.9376 0.9624 0.9874]

MF3='vn':trimf,[0.9751 1 1.025]

MF4='voltaje alto':trimf,[1.013 1.038 1.062]

MF5='voltaje muy alto':trimf,[1.049 1.075 1.1]

[Input6]

Name='v9'

Range=[0.9 1.1]

NumMFs=5

MF1='voltaje muy bajo':trimf,[0.9 0.9249 0.9499]

MF2='voltaje bajo':trimf,[0.9376 0.9624 0.9874]

MF3='vn':trimf,[0.9751 1 1.025]

MF4='voltaje alto':trimf,[1.013 1.038 1.062]

MF5='voltaje muy alto':trimf,[1.049 1.075 1.1]

[Output1]

Name='voltaje en generación nodo 1'

Range=[0.94 1.06]

NumMFs=5

MF1='decremento alto de voltaje en generación ':trimf,[0.94 0.958 0.97]

MF2='decremento de voltaje en generación ':trimf,[0.964 0.98 0.992]

MF3='imvg':trimf,[0.988 1 1.012]

MF4='incremento de voltaje en generación ':trimf,[1.009 1.023 1.036]

MF5='incremento alto de voltaje en generación ':trimf,[1.029 1.047 1.06]

[Output2]

Name='voltaje en generación nodo 2'

Range=[0.94 1.06]

NumMFs=5

MF1='decremento alto de voltaje en generación ':'trimf',[0.94 0.958 0.97]

MF2='decremento de voltaje en generación ':'trimf',[0.964 0.98 0.992]

MF3='imvg':'trimf',[0.988 1 1.012]

MF4='incremento de voltaje en generación ':'trimf',[1.009 1.023 1.036]

MF5='incremento alto de voltaje en generación ':'trimf',[1.029 1.047 1.06]

[Output3]

Name='voltaje en generación nodo 3'

Range=[0.94 1.06]

NumMFs=5

MF1='decremento alto de voltaje en generación ':'trimf',[0.94 0.958 0.97]

MF2='decremento de voltaje en generación ':'trimf',[0.964 0.98 0.992]

MF3='imvg':'trimf',[0.988 1 1.012]

MF4='incremento de voltaje en generación ':'trimf',[1.009 1.023 1.036]

MF5='incremento alto de voltaje en generación ':'trimf',[1.029 1.047 1.06]

[Rules]

% El siguiente conjunto de reglas se presenta en forma indexada, donde la primer columna
 % indica la primer variable de entrada (V4), la segunda columna indica la variable de
 entrada
 % (V5), así, sucesivamente cada columna indica cada variable de entrada. La separación de
 % la coma indica el término de variables de entrada para dar comienzo a las variables de
 % salidas del **SLD**, las cuales son tres, indicando la séptima, octava y novena columnas las
 % variables de salida uno, dos y tres respectivamente. La última columna indica el tipo de
 % operación difusa que se está utilizando para cada regla, así el 1 indica el método de
 % operación AND. Si el operador utilizado fuera OR se indica con el número 2 está última
 % columna.

```

1 0 0 0 0 0, 5 0 0 (1) : 1
2 0 0 0 0 0, 4 0 0 (1) : 1
4 0 0 0 0 0, 2 0 0 (1) : 1
5 0 0 0 0 0, 1 0 0 (1) : 1
0 1 0 0 0 0, 0 0 5 (1) : 1
0 2 0 0 0 0, 0 0 4 (1) : 1
0 4 0 0 0 0, 0 0 2 (1) : 1
0 5 0 0 0 0, 0 0 1 (1) : 1
0 0 1 0 0 0, 0 0 5 (1) : 1
0 0 2 0 0 0, 0 0 4 (1) : 1
0 0 4 0 0 0, 0 0 2 (1) : 1
0 0 5 0 0 0, 0 0 1 (1) : 1
0 0 0 1 0 0, 0 5 0 (1) : 1
0 0 0 2 0 0, 0 4 0 (1) : 1
0 0 0 4 0 0, 0 2 0 (1) : 1
0 0 0 5 0 0, 0 1 0 (1) : 1
0 0 0 0 1 0, 0 5 0 (1) : 1

```

000020,040(1):1

000040,020(1):1

000050,010(1):1

000001,500(1):1

000002,400(1):1

000004,200(1):1

000005,100(1):1

A.2 Base de conocimientos del SLD

% En la sección anterior se presentaron el conjunto de reglas en forma indexada, para mayor
% claridad de ellas se representan en la forma verbal.

1. *If*(voltaje en nodo 4 *is* voltaje muy bajo)
then (voltaje en generación nodo 1 *is* incremento alto de voltaje en generación) (1)
2. *If*(voltaje en nodo 4 *is* voltaje bajo)
then (voltaje en generación nodo 1 *is* incremento de voltaje en generación) (1)
3. *If*(voltaje en nodo 4 *is* voltaje alto)
then (voltaje en generación nodo 1 *is* decremento de voltaje en generación) (1)
4. *If*(voltaje en nodo 4 *is* voltaje muy alto)
then (voltaje en generación nodo 1 *is* decremento alto de voltaje en generación) (1)
5. *If*(voltaje en nodo 5 *is* voltaje muy bajo)
then (voltaje en generación nodo 3 *is* incremento alto de voltaje en generación) (1)
6. *If*(voltaje en nodo 5 *is* voltaje bajo)
then (voltaje en generación nodo 3 *is* incremento de voltaje en generación) (1)
7. *If*(voltaje en nodo 5 *is* voltaje alto)
then (voltaje en generación nodo 3 *is* decremento de voltaje en generación) (1)
8. *If*(voltaje en nodo 5 *is* voltaje muy alto)
then (voltaje en generación nodo 3 *is* decremento alto de voltaje en generación) (1)
9. *If*(voltaje en nodo 6 *is* voltaje muy bajo)
then (voltaje en generación nodo 3 *is* incremento alto de voltaje en generación) (1)
10. *If*(voltaje en nodo 6 *is* voltaje bajo)
then (voltaje en generación nodo 3 *is* incremento de voltaje en generación) (1)
11. *If*(voltaje en nodo 6 *is* voltaje alto)
then (voltaje en generación nodo 3 *is* decremento de voltaje en generación) (1)
12. *If*(voltaje en nodo 6 *is* voltaje muy alto)
then (voltaje en generación nodo 3 *is* decremento alto de voltaje en generación) (1)
13. *If*(voltaje en nodo 7 *is* voltaje muy bajo)
then (voltaje en generación nodo 2 *is* incremento alto de voltaje en generación) (1)

14. *If*(voltaje en nodo 7 *is* voltaje bajo)
then (voltaje en generación nodo 2 *is* incremento de voltaje en generación) (1)
15. *If*(voltaje en nodo 7 *is* voltaje alto)
then (voltaje en generación nodo 2 *is* decremento de voltaje en generación) (1)
16. *If*(voltaje en nodo 7 *is* voltaje muy alto)
then (voltaje en generación nodo 2 *is* decremento alto de voltaje en generación) (1)
17. *If*(voltaje en nodo 8 *is* voltaje muy bajo)
then (voltaje en generación nodo 2 *is* incremento alto de voltaje en generación) (1)
18. *If*(voltaje en nodo 8 *is* voltaje bajo)
then (voltaje en generación nodo 2 *is* incremento de voltaje en generación) (1)
19. *If*(voltaje en nodo 8 *is* voltaje alto)
then (voltaje en generación nodo 2 *is* decremento de voltaje en generación) (1)
20. *If*(voltaje en nodo 8 *is* voltaje muy alto)
then (voltaje en generación nodo 2 *is* decremento alto de voltaje en generación) (1)
21. *If*(voltaje en nodo 9 *is* voltaje muy bajo)
then (voltaje en generación nodo 1 *is* incremento alto de voltaje en generación) (1)
22. *If*(voltaje en nodo 9 *is* voltaje bajo)
then (voltaje en generación nodo 1 *is* incremento de voltaje en generación) (1)
23. *If*(voltaje en nodo 9 *is* voltaje alto)
then (voltaje en generación nodo 1 *is* decremento de voltaje en generación) (1)
24. *If*(voltaje en nodo 9 *is* voltaje muy alto)
then (voltaje en generación nodo 1 *is* decremento alto de voltaje en generación) (1)

