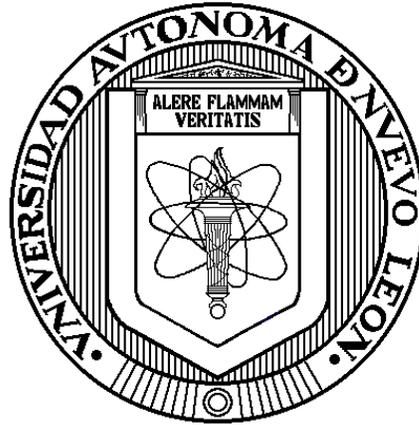


UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA



ESTUDIOS DE FLUJOS DIFUSOS EN SISTEMAS ELÉCTRICOS
DE POTENCIA

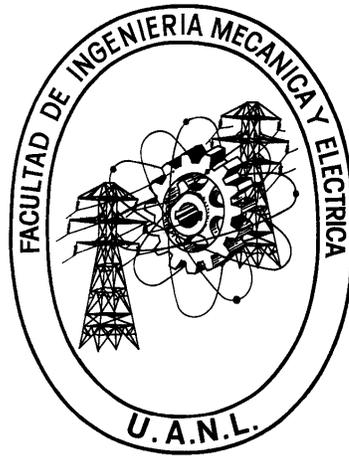
Por

LUIS ALBERTO ZATARAIN MORÚA

Como requisito parcial para obtener el Grado de MAESTRÍA EN
CIENCIAS DE LA INGENIERÍA ELÉCTRICA CON ESPECIALIDAD
EN POTENCIA

SEPTIEMBRE, 2014

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA



ESTUDIOS DE FLUJOS DIFUSOS EN SISTEMAS ELÉCTRICOS
DE POTENCIA

Por

LUIS ALBERTO ZATARAIN MORÚA

Como requisito parcial para obtener el Grado de MAESTRÍA EN
CIENCIAS DE LA INGENIERÍA ELÉCTRICA CON ESPECIALIDAD
EN POTENCIA

SEPTIEMBRE, 2014

Universidad Autónoma de Nuevo León
Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica
Subdirección de Estudios de Posgrado

Los miembros de comité de tesis recomendamos que la tesis **ESTUDIOS DE FLUJOS DIFUSOS EN SISTEMAS ELÉCTRICOS DE POTENCIA**, realizada por el alumno Luis Alberto Zatarain Morúa, matrícula 1069070 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. Ernesto Vázquez Martínez

Revisor
Dr. Manuel Antonio Andrade Soto



Revisor
M.C. Juan José Guerrero Garza

Vo. Bo.
Subdirector de Posgrado
Dr. Simón Martínez Martínez

DEDICADO

A mis padres **Guadalupe Susana** y **Andrés Ignacio**,
Gracias por su ejemplo, por su amor y comprensión.

A mi esposa **Alejandra** y a mi hijos **Luis Alejandro** y **José Zaid**,
Por ser mi motivación y mi alegría.

RESUMEN

ESTUDIOS DE FLUJOS DIFUSOS EN SISTEMAS ELÉCTRICOS DE POTENCIA

Luis Alberto Zatarain Morúa, M. C. en Ing. Eléctrica

Universidad Autónoma de Nuevo León

Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica

Septiembre 2014

La incertidumbre es un aspecto importante a considerar en el análisis, la operación y planificación en los sistemas eléctricos de potencia. La variabilidad en los datos y parámetros produce cambios en flujos de potencia y voltajes del sistema eléctrico. La incertidumbre existe por errores de medición, pronóstico o de estimación de datos y parámetros. En general, la variabilidad de la información será menor al estar más cerca de la condición operativa real, y será mayor en estudios de planificación.

Desde hace algunos años se han desarrollado técnicas que modelan probabilísticamente la incertidumbre en los datos de entrada para estudios de flujos de potencia (flujos probabilísticos), pero su uso ha sido limitado debido a la complejidad en la interpretación y aplicación de resultados.

En este trabajo se analiza la aplicación de funciones de distribución de posibilidad representadas por variables difusas para modelar la incertidumbre en la carga y generación en estudios de flujos de potencia. El método que se presenta tiene el atractivo de la simplicidad en la interpretación de resultados, con una descripción gráfica de la variabilidad y posibilidad de ocurrencia de los flujos de potencia, voltajes y ángulos nodales.

El trabajo presenta formulaciones para modelar la incertidumbre mediante variables difusas en un estudio de flujo lineal (estudio difuso lineal), en estudio de flujo de corriente alterna utilizando el método de Newton-Raphson (estudio difuso de CA) y en estudios lineales de flujos óptimos. Se presentan además pruebas y la comparación de resultados con simulaciones de flujos con la técnica de Montecarlo.

Finalmente, se presentan las conclusiones del trabajo y se hacen recomendaciones para trabajos futuros en este tema de investigación.

ÍNDICE

Dedicatoria	
Agradecimientos	
Resumen	
Índice de figuras	
Índice de tablas	
	Página
1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. Problemática de la incertidumbre en los SEP's	1
1.2. Alternativas de solución	2
1.3. Metodología analizada	2
1.4. Estructura de la Tesis	3
2. CONCEPTOS BÁSICOS DE CONJUNTOS DIFUSOS	5
2.1. Introducción	5
2.2. Conjuntos difusos	6
2.2.1. Funciones de membresía	6
2.2.2. Operaciones básicas con conjuntos difusos	8
2.2.3. Cortes α	11
2.3. Variables difusas	11
2.3.1. Definición de variable difusa	11
2.3.2. Aritmética de intervalos	12
2.3.3. Extensión de aritmética de intervalos	14
2.3.4. Solución de una ecuación sencilla con variables difusas	16

ÍNDICE (continuación)

	Página
3. ESTUDIO DE FLUJO DIFUSO LINEAL	18
3.1. Introducción	18
3.2. Representación de incertidumbre en cargas y generación	19
3.3. Metodología analizada	20
3.3.1. Flujo lineal determinístico	20
3.3.2. Extensión de flujo lineal determinístico a flujo difuso lineal	21
3.3.3. Diagrama de flujo	24
3.4. Aplicaciones	25
4. ESTUDIO DE FLUJO DIFUSO DE C.A.	31
4.1. Introducción	31
4.2. Representación de incertidumbre en carga y generación	31
4.3. Flujos determinísticos de C.A. por el método Newton – Raphson	32
4.4. Extensión a flujo difuso de C.A.	35
4.4.1. Evaluación de incertidumbre en voltajes y ángulos	35
4.4.2. Coeficientes de sensibilidad.	38
4.4.3. Evaluación de incertidumbre en flujos de potencia activa y reactiva	41
4.4.4. Diagrama de flujo	42
4.5. Casos de prueba	43

ÍNDICE (continuación)

	Página
4.6. Expansión de la herramienta de flujos difusos de C.A.	50
4.6.1. Modelado de incertidumbre en la dependencia del voltaje de las cargas	50
4.6.2. Modelado de incertidumbre en los parámetros del sistema	51
5. COMPARACIÓN ENTRE ESTUDIOS DE FLUJOS PROBABILÍSTICOS Y ESTUDIOS DE FLUJOS DIFUSOS	53
5.1. Introducción	53
5.2. Comparación con simulación de Montecarlo	55
5.3. Validación de flujos de potencia de CA con Montecarlo	60
5.3.1. Comparación modelando la incertidumbre mediante un intervalo	60
5.3.2. Comparación modelando la incertidumbre mediante una función de distribución de probabilidad normal	66
6. FLUJOS ÓPTIMOS DIFUSOS DE CD	79
6.1. Introducción	79
6.2. Metodología analizada	80
6.2.1. Modelado de generadores	80
6.2.2. Función objetivo	80
6.2.3. Restricciones operacionales	81
6.2.4. Restricciones de seguridad	82
6.2.5. Solución del problema de despacho económico	82
6.2.6. Resultados	83

ÍNDICE (continuación)

	Página
6.3. Índices de robustez y exposición	84
6.3.1. Calculo de índices de robustez y exposición	85
6.3.2. Incremento de la robustez en un sistema	86
6.4. Ejemplo ilustrativo	87
6.5. Expansión de la herramienta flujos óptimos difusos de C.D.	92
7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	94
7.1. Conclusiones	94
7.1.1. Conjuntos difusos	94
7.1.2. Flujos de potencia difusos	95
7.1.3. Flujos de potencia difusos de CA	95
7.1.4. Flujos óptimos difusos de CD	96
7.2. Aportaciones de la tesis	96
7.3. Recomendaciones para trabajos futuros	97
REFERENCIAS	98
APÉNDICE A	101
APÉNDICE B	104

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura	Página
2.1 Conjunto clásico a) y conjunto difuso b)	7
2.2 Intersección de conjuntos difusos	8
2.3 Unión de conjuntos difusos	9
2.4 Diferentes formas de variables difusas	11
2.5 Conjunto difuso con varios niveles o cortes α	12
2.6 Niveles de variables difusas \tilde{A} y \tilde{B}	14
3.1 Variable difusa representando una predicción de carga lingüística	19
3.2 Diagrama de flujo del algoritmo de flujo difuso lineal	24
3.3 Sistema de prueba I	25
3.4 Funciones de distribución de posibilidad de carga en nodos 2 y 3	26
3.5 Funciones de distribución de posibilidad de ángulos nodales	26
3.6 Funciones de distribución de posibilidad de flujo en líneas	27
3.7 Función de distribución de posibilidad de carga en nodo 2	28
3.8 Sistema de prueba II	28
3.9 Funciones de distribución de posibilidad de las inyecciones de potencia	29
3.10 Flujo en línea 3-4	30
4.1 Variables difusas representando una inyección de potencia (P y Q)	32
4.2 Valor central de una variable difusa	36
4.3 Conversión de variable difusa a desviación difusa	36
4.4 Conversión de desviación difusa a función de distribución de posibilidad	38
4.5 Diagrama de flujo del algoritmo utilizado en flujos de CA	42
4.6 Sistema de prueba	43
4.7 Función de distribución de posibilidad de generación en nodo 4	45
4.8 Funciones de distribución de posibilidad de voltaje y ángulo en nodo 2	47
4.9 Funciones de distribución de posibilidad de flujos de potencia activa y reactiva en línea 1-3	50
5.1 Sistema de prueba I	54

ÍNDICE DE FIGURAS (continuación)

Figura	Página
5.2 Sistema de prueba II	58
5.3 Intervalos de incertidumbre en la carga del nodo 2	58
5.4 Sistema de prueba III	60
5.5 Aproximación de variable difusa a campana de Gauss	66
5.6 Comparación de flujos probabilísticos con el estudio difuso para la potencia activa en el nodo 20	73
5.7 Comparación de flujos probabilísticos con el estudio difuso para la potencia reactiva en el nodo 20	73
5.8 Sistema de prueba IV	74
5.9 Aproximación a una distribución de probabilidad normal mediante una variable difusa con 3 cortes α	74
5.10 Comparación de resultados en voltajes y ángulos nodales	77
5.11 Comparación de resultados en flujos de potencia	78
6.1 Corte α de una variable difusa trapezoidal	85
6.2 Sistema de prueba	87
6.3 Distribución de posibilidad de flujo en línea 3-4	90
6.4 Distribución de posibilidad del costo	91
6.5 Corte α de la carga en el nodo 2	92
6.6 Variable difusa que integra dos parámetros	93

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla	Página
3.1 Parámetros del sistema	25
3.2 Inyecciones de potencia nodales	25
3.3 Ángulos difusos resultantes	26
3.4 Inyecciones de potencia nodales	27
3.5 Flujo en líneas	27
3.6 Funciones de distribución de posibilidad de ángulos	29
3.7 Funciones de distribución de posibilidad de flujos de potencia	29
4.1 Funciones de distribución de posibilidad de inyecciones de potencia	43
4.2 Variables difusas representando funciones de distribución de posibilidad	44
4.3 Valores centrales de flujos de potencia	45
4.4 Valores centrales de voltajes y ángulos	45
5.1 Valores máximos y mínimos de inyecciones de potencia nodales	54
5.2 Valores máximos y mínimos de flujos con 500 iteraciones de Montecarlo	55
5.3 Valores máximos y mínimos de ángulos con 500 iteraciones de Montecarlo	55
5.4 Valores máximos y mínimos de flujos de potencia difusos lineales	56
5.5 Valores máximos y mínimos de ángulos usando algoritmo difuso	56
5.6 Valores máximos y mínimos de flujos mediante Montecarlo utilizando valores extremos	57
5.7 Valores máximos y mínimos de ángulos mediante Montecarlo utilizando valores extremos	57
5.8 Datos de entrada para estudio de flujos difusos lineales y simulación de Montecarlo	59
5.9 Comparación de ángulos nodales	59
5.10 Comparación de flujos de potencia	59
5.11 Valores de entrada de inyecciones nodales (P y Q)	61
5.12 Comparación de resultados entre simulación de Montecarlo y estudio de flujos difusos de CA	62

ÍNDICE DE TABLAS (continuación)

Tabla	Página
5.13 Comparación de resultados entre simulación de Montecarlo y estudio de flujos difusos de CA	63
5.14 Comparación de flujos de potencia activa	64
5.15 Comparación de flujos de potencia reactiva	65
5.16 Datos de entrada para simulación de Montecarlo	67
5.17 Datos de entrada utilizados en el estudio difuso	68
5.18 Resultados de ángulos nodales	69
5.19 Resultados de voltajes nodales	70
5.20 Resultados de flujos de potencia activa	71
5.21 Resultados de flujos de potencia reactiva	72
5.22 Valores medios y desviación estándar de datos de entrada para Montecarlo	75
5.23 Variables difusas de entrada para el estudio de flujos difusos de CA	75
5.24 Valores medios y desviación estándar de voltajes y ángulos nodales	75
5.25 Flujos de potencia activa y reactiva (valor medio y desviación estándar)	76
5.26 Variables difusas de voltajes y ángulos nodales	76
5.27 Variables difusas de flujo de potencia activa	76
5.28 Variables difusas de flujo de potencia reactiva	77
6.1 Datos de generadores	87
6.2 Distribución de posibilidad trapezoidal de las cargas	88
6.3 Datos de ramas	88
6.4 Funciones de distribución de posibilidad para cada sección de generadores	89
A.1 Parámetros de sistema de prueba (capítulos III y V)	102
A.2 Parámetros de sistema de prueba (capítulo IV)	102
A.3 Parámetros de sistema de prueba II (capítulo V)	102
A.4 Parámetros de sistema de prueba III (capítulo V)	103
A.5 Parámetros de sistema de prueba IV (capítulo V)	103

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

1.1 Problemática de la incertidumbre en los SEP's

Para tomar decisiones en la operación y planeación de los Sistemas Eléctricos es necesario conocer el comportamiento del mismo ante diversos escenarios. Una de las principales herramientas utilizadas para estos análisis son los programas de flujos de potencia, que mediante alguna técnica iterativa [1,2,9,14] determinan magnitudes de voltaje y los ángulos nodales. El inconveniente de estos algoritmos es que solo manejan un escenario a la vez y, aunque es una técnica muy eficiente, sus resultados dependen de la calidad de la información de entrada (principalmente inyecciones nodales de potencia activa y reactiva), la cual siempre está sujeta a errores debido a que se obtiene de mediciones (operación), o de pronósticos (planeación), por esto es necesario desarrollar técnicas que modelen la incertidumbre en los datos de entrada y presentar resultados con una incertidumbre asociada, obteniendo así un mejor panorama de las condiciones esperadas de operación y permitiendo tomar decisiones adecuadas para operar un SEP con calidad y seguridad.

1.2 Alternativas de solución.

Con el fin de dar solución al problema de la incertidumbre en la información de entrada a un programa de flujos de potencia se han desarrollado metodologías estocásticas ó probabilísticas, donde las variables de entrada se modelan como funciones de distribución de probabilidad y como resultado se obtienen funciones de distribución de probabilidad de flujos de potencia, voltajes y ángulos nodales. Estas formulaciones demandan una gran carga computacional, debido a que utiliza convoluciones en su proceso de solución, además de presentar resultados que pueden ser difíciles de interpretar para personas que no estén familiarizadas con el manejo de funciones de densidad de probabilidad.

Otra alternativa utilizada es la técnica de Montecarlo [15,16], que consiste en hacer una gran cantidad de estudios de flujos de potencia, variando aleatoriamente los datos de entrada dentro de un nivel de incertidumbre con base en alguna función de distribución de probabilidad. Los resultados son un conjunto de soluciones que hay que analizar e interpretar; esta técnica ofrece buenos resultados pero su carga computacional y tiempo de solución es muy grande, además no garantiza que los resultados incluyan todas las posibles soluciones.

1.3 Metodología analizada.

En esta tesis se evalúa una forma de manejar la incertidumbre mediante variables difusas, que son representadas por funciones de distribución de posibilidad, su aplicación es recomendable en aquellos casos donde no se conoce una distribución probabilística para la incertidumbre en las variables de entrada. Tiene como ventajas la facilidad de interpretación de resultados (descripción gráfica), carga computacional moderada y tiempo de solución comparable con cualquier método determinístico de flujos de potencia [1,2,9,14]. Puede manejar varias distribuciones de posibilidad en un

mismo estudio, desde un valor fijo, un intervalo, una distribución trapezoidal, y formas más complejas que representen de manera adecuada las variables de entrada.

1.4 Estructura de la tesis

El trabajo se ha dividido en siete capítulos y dos apéndices. A continuación se describe en forma general la estructura de este trabajo, mencionando brevemente el contenido de cada capítulo.

- **Capítulo 1.** Se describe la problemática de la incertidumbre en los SEP's, las alternativas típicas de solución y la metodología propuesta en esta tesis.
- **Capítulo 2.** Se presentan conceptos básicos de conjuntos difusos, sus diferencias respecto a los conjuntos clásicos y su interpretación, dando particular énfasis a la definición de variable difusa.
- **Capítulo 3.** Se explica una metodología para extender la formulación de flujos de potencia lineales a flujos difusos lineales, en la cual la incertidumbre en los datos de entrada se modela mediante una función de distribución de posibilidad. Se presentan ejemplos.
- **Capítulo 4.** Se extiende la formulación de flujos de potencia de CA a flujos de potencia difusos de CA, obteniendo funciones de distribución de posibilidad para los resultados del estudio (flujos de potencia en ramas, ángulos y voltajes nodales). Se presenta un ejemplo de aplicación.
- **Capítulo 5.** Se presenta una formulación de flujos óptimos difusos de CD, donde se busca minimizar costos de generación sin violar restricciones

operacionales y de seguridad, considerando los datos de entrada como funciones de distribución de posibilidad, mostrando además grados de robustez y exposición del sistema. Se presenta un ejemplo de aplicación.

- **Capítulo 6.** Con el fin de validar los resultados obtenidos en los capítulos anteriores, se presenta una comparación entre flujos de potencia difusos de CD y CA y simulaciones con la técnica de Montecarlo utilizando como entrada intervalos y funciones de distribución de probabilidad uniformes y normales.
- **Capítulo 7.** En este capítulo se presentan las conclusiones de los resultados obtenidos, las aportaciones más importantes y las recomendaciones para trabajos futuros.
- **Apéndice A.** Se muestran parámetros de los sistemas de prueba utilizados.
- **Apéndice B.** Se detalla la manera de formar el Jacobiano en el problema de flujos de potencia. Se muestran también derivadas parciales utilizadas para obtener coeficientes de sensibilidad en flujos difusos de CA.

CAPÍTULO II

CONCEPTOS BÁSICOS DE CONJUNTOS DIFUSOS

2.1 Introducción

En 1965 Zadeh introdujo por primera vez el concepto de conjuntos difusos [11] como una herramienta matemática para describir la incertidumbre, la idea se puede considerar como una extensión de los conjuntos clásicos (binarios) con múltiples grados de membresía en los elementos que conforman dicho conjunto.

El principio de incompatibilidad de Zadeh justifica la necesidad de la teoría de sistemas. Este principio dice que conforme aumenta la complejidad de un sistema, nuestra capacidad para emitir juicios precisos sobre su comportamiento disminuye, esto sugiere que la complejidad y la ambigüedad (imprecisión) están correlacionados. Por esto, es necesario modelar la incertidumbre en las variables de entrada de cualquier sistema, lo que se puede realizar de manera eficiente utilizando conjuntos difusos.

2.2 Conjuntos difusos

La idea básica de los conjuntos difusos [3,5,10,11] es muy simple. Los conjuntos convencionales (no difusos) son binarios, es decir, un elemento del universo pertenece o no pertenece al conjunto, esto es, la membresía de un elemento es 1 si pertenece al conjunto y 0 si no pertenece.

Un conjunto difuso es una generalización de los conjuntos clásicos, donde es factible tener diferentes niveles de membresía en cada elemento que pertenece al conjunto dentro de un rango entre 0 y 1. Entonces, la función de membresía de un conjunto difuso mapea cada elemento del universo en este rango.

Otra gran diferencia entre conjuntos convencionales y difusos es que los conjuntos convencionales siempre tienen funciones de membresía únicas, mientras que los conjuntos difusos tienen un número infinito de funciones de membresía que los pueden representar, esto permite ajustar los sistemas difusos para obtener una mejor representación en una situación dada.

2.2.1 Funciones de membresía

Un conjunto clásico está definido de manera que separa los elementos de un universo (U) dado en dos grandes grupos: aquellos que pertenecen al conjunto (miembros) y aquellos que no pertenecen (no miembros). La transición de un elemento entre la membresía y la no membresía es abrupta y está bien definida. La función $\mu_A(x)$ de un conjunto clásico A en U toma valores $[0,1]$ y está definida tal que $\mu_A(x) = 1$ si x es miembro de A y 0 si no lo es; esto es:

$$\mu_A(x) = \begin{cases} 1 & \text{si } x \in A \\ 0 & \text{si } x \notin A \end{cases} \quad (2.1)$$

En los conjuntos difusos se extiende el concepto de membresía binaria para acomodar varios *grados de membresía* en el intervalo real $[0,1]$, donde los valores 0 y 1 indican la *no membresía* y la *membresía total* respectivamente. Entre estos dos puntos hay un número infinito de valores, por esto la transición entre *no membresía* y *membresía total* es gradual, lo que lleva a que los límites en los conjuntos difusos son ambiguos, a diferencia de los límites abruptos de los conjuntos clásicos.

Un conjunto difuso \tilde{A} en el universo U se define como un conjunto de pares ordenados

$$\tilde{A} = \{(x, \mu_{\tilde{A}}(x)) | x \in U\} \quad (2.2)$$

donde $\mu_{\tilde{A}}(x)$ es el grado o nivel de membresía de x en \tilde{A} .

Sea el U el universo de los números reales y A el conjunto con los números mayores que 2. En la figura 2.1 se muestra la función de membresía clásica y la difusa que describe el conjunto A .

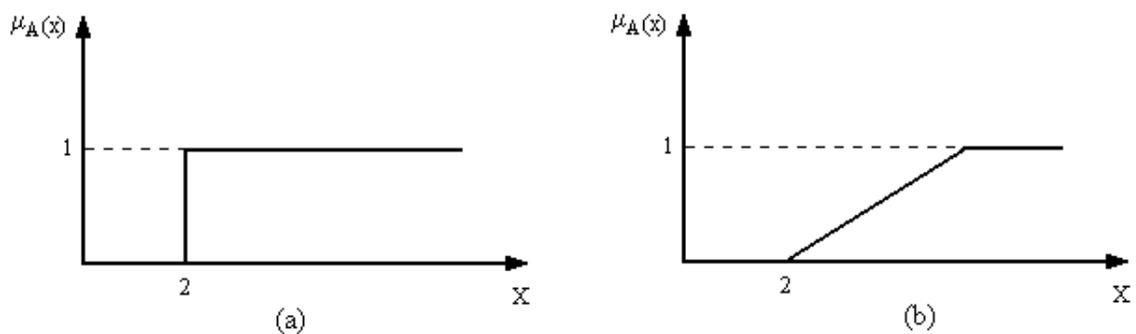


Figura 2.1 (a)-conjunto clásico y (b)-conjunto difuso.

2.2.2 Operaciones básicas con conjuntos difusos

En esta sección se presentan algunas definiciones básicas y operaciones con conjuntos difusos:

Intersección: Sea el conjunto difuso C la intersección de dos conjuntos difusos A y B :

$$C = A \cap B \quad (2.3)$$

La función de membresía de la intersección $\mu_C(x)$ se define como:

$$\mu_C(x) = \min\{\mu_A(x), \mu_B(x)\} \quad (2.4)$$

Se puede deducir que:

$$A \cap B \subseteq A \text{ y } A \cap B \subseteq B \quad (2.5)$$

donde \subseteq denota “está contenido en”.

En la figura 2.2 se muestra la función de membresía de la intersección de dos conjuntos difusos, A y B .

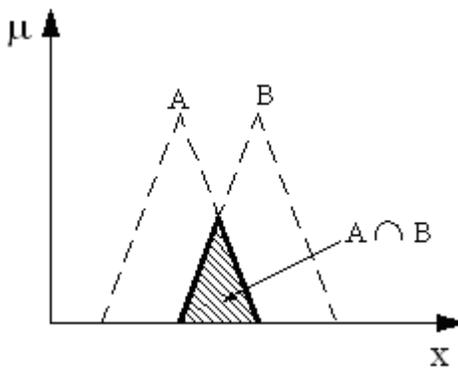


Figura 2.2 La intersección de los conjuntos difusos A y B

Unión: Sea el conjunto difuso C la unión de los dos conjuntos difusos A y B :

$$C = A \cup B \quad (2.6)$$

La función de membresía de la unión $\mu_C(x)$ se define como:

$$\mu_C(x) = \max\{\mu_A(x), \mu_B(x)\} \quad (2.7)$$

Es claro que:

$$A \subseteq A \cup B \text{ y } B \subseteq A \cup B \quad (2.8)$$

El área sombreada de la figura 2.3 muestra la función de membresía de la unión de los dos conjuntos A y B .

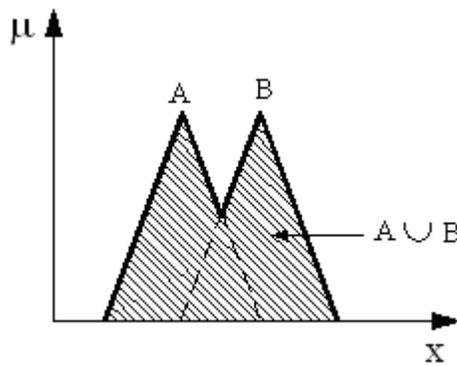


Figura 2.3 La unión de los conjuntos difusos A y B .

Complemento: Dado el conjunto difuso A , su complemento se denota por \bar{A} , y su función de membresía está dada por:

$$\mu_{\bar{A}}(x) = 1 - \mu_A(x) \quad (2.9)$$

Igualdad: Dos conjuntos difusos son iguales si y solo si sus funciones de membresía son iguales:

$$\mu_A(x) = \mu_B(x) \quad (2.10)$$

entonces, si $\mu_A(x) \neq \mu_B(x)$, para alguna $x \in U$, entonces $A \neq B$.

Suma algebraica de dos conjuntos difusos: La suma algebraica de dos conjuntos difusos A y B (denotada como $A+B$) se define como:

$$\mu_{A+B}(x) \equiv \mu_A(x) + \mu_B(x) - \mu_A(x) \cdot \mu_B(x) \quad (2.11)$$

Producto algebraico de dos conjuntos difusos: El producto algebraico de dos conjuntos difusos A y B (denotado como $A \cdot B$) se define como:

$$\mu_{A \cdot B}(x) = \mu_A(x) \cdot \mu_B(x) \quad (2.12)$$

Suma acotada de dos conjuntos difusos: La suma acotada de dos conjuntos difusos, $A \oplus B$, se define por:

$$\mu_{A \oplus B}(x) \equiv \min\{1, \mu_A(x) + \mu_B(x)\} \quad (2.13)$$

la suma $\mu_A(x) + \mu_B(x)$ puede exceder la unidad, y en este caso se elige 1 como el valor de la suma acotada.

Diferencia acotada de dos conjuntos difusos: La diferencia acotada de dos conjuntos difusos, $A - B$, se define por:

$$\mu_{A-B}(x) \equiv \min\{0, \mu_A(x) - \mu_B(x)\} \quad (2.14)$$

en este caso la diferencia $\mu_A(x) - \mu_B(x)$ puede resultar menor a cero, y por tanto se elige cero como el valor de la diferencia acotada.

2.2.3 Cortes α [3,10]

Un corte α de un conjunto difuso \tilde{A} es el conjunto clásico A que contiene los elementos del universo U que tienen un grado de membresía en \tilde{A} mayor o igual a α , esto es:

$$A_\alpha = \{x \in U \mid \mu_{\tilde{A}}(x) \geq \alpha\} \quad (2.15)$$

2.3 Variables difusas

2.3.1 Definición de variable difusa (Fuzzy Number) [3,10]

Una variable difusa \tilde{A} es un conjunto difuso definido en los números reales, su función de membresía $\mu_{\tilde{A}}(x)$ es continua por partes y se representa por sus puntos de quiebre. Puede tener diversas formas, las más comunes se muestran en la figura 2.4

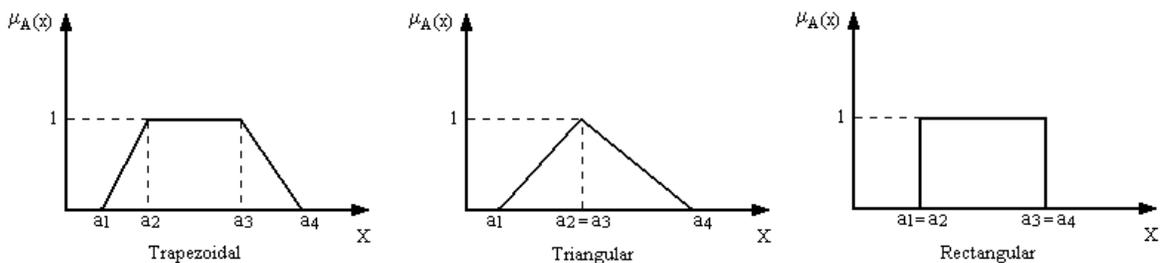


Figura 2.4 Diferentes formas de variables Difusas

Las variables difusas se pueden analizar como conjuntos difusos con varios niveles o cortes α (figura 2.5), lo que facilita la forma de manejarlos y de realizar operaciones algebraicas con ellos.

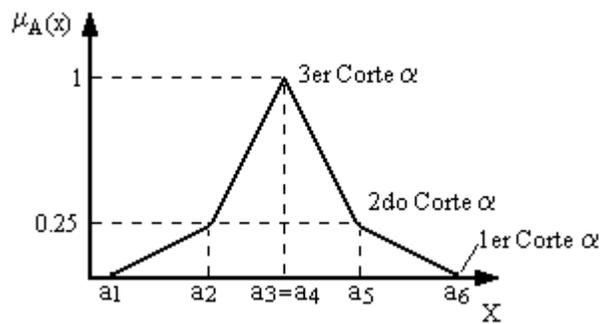


Figura 2.5 Conjunto Difuso con varios niveles o cortes α

2.3.2 Aritmética de intervalos [6]

Muchas áreas en la ingeniería manejan valores con incertidumbre o datos imprecisos obtenidos en aparatos de medición, los cuales usualmente se modelan en forma de intervalos. Para obtener un estimado confiable de estas mediciones se realizan operaciones matemáticas con estos intervalos

Debido a que el concepto de variables difusas incluye el intervalo como un caso especial (variable difusa rectangular), la aritmética con variables difusas es una generalización de la aritmética de intervalos. La aritmética de intervalos se utiliza generalmente para manejar la imprecisión de aparatos de medición, no utiliza funciones de distribución de posibilidad.

Así, una variable difusa es una extensión del concepto de intervalo. La aritmética con variables difusas tiene más poder que la aritmética de intervalos, ya que las variables difusas pueden tener varios niveles de membresía.

Las operaciones con intervalos se realizan de la siguiente manera:

$$\text{Sean } A = [a_1, a_2] \text{ y } B = [b_1, b_2]$$

Suma:

$$A + B = [a_1, a_2] + [b_1, b_2] = [a_1 + b_1, a_2 + b_2] \quad (2.16)$$

Resta:

$$A - B = [a_1, a_2] - [b_1, b_2] = [a_1 - b_2, a_2 - b_1] \quad (2.17)$$

Multiplicación:

$$A \cdot B = [\min(a_1 \cdot b_1, a_1 \cdot b_2, a_2 \cdot b_1, a_2 \cdot b_2), \max(a_1 \cdot b_1, a_1 \cdot b_2, a_2 \cdot b_1, a_2 \cdot b_2)] \quad (2.18)$$

División:

$$A : B = \left[\min\left(\frac{a_1}{b_1}, \frac{a_1}{b_2}, \frac{a_2}{b_1}, \frac{a_2}{b_2}\right), \max\left(\frac{a_1}{b_1}, \frac{a_1}{b_2}, \frac{a_2}{b_1}, \frac{a_2}{b_2}\right) \right] \quad (2.19)$$

Multiplicación por un Real:

$$\begin{aligned} \lambda \in \mathfrak{R}^+ \quad \lambda \cdot A &= [\lambda \cdot a_1, \lambda \cdot a_2] \\ \lambda \in \mathfrak{R}^- \quad \lambda \cdot A &= [\lambda \cdot a_2, \lambda \cdot a_1] \end{aligned} \quad (2.20)$$

La aritmética de intervalos se puede interpretar de la siguiente manera, cuando se suman o multiplican dos intervalos, se pueden llevar a cabo un número infinito de combinaciones de pares de números determinísticos; para obtener un intervalo, se toma el valor más bajo de todos los resultados, y ese será el límite inferior, y su valor más alto será el límite superior. Para simplificar estas operaciones se realizan combinaciones solamente con los límites de cada intervalo, y se obtienen los límites del intervalo resultante.

2.3.3 Extensión de la aritmética de intervalos

Una variable se puede describir con intervalos asociados a diferentes niveles de cortes α , esto es, cada corte α de la variable difusa \tilde{A} es un intervalo cerrado de \mathfrak{R} , y el valor más alto de la función de membresía es igual a la unidad. De esta forma, dadas dos variables difusas \tilde{A} y \tilde{B} , se obtendrán dos intervalos cerrados (uno para \tilde{A} y otro para \tilde{B}) por cada corte α . Para el primer nivel sería: $\tilde{A}_{\alpha 1} \equiv [a_1^{(\alpha 1)}, a_2^{(\alpha 1)}]$ de la variable difusa \tilde{A} y $\tilde{B}_{\alpha 1} \equiv [b_1^{(\alpha 1)}, b_2^{(\alpha 1)}]$ para la variable difusa \tilde{B} . Las reglas de aritmética de intervalos se pueden aplicar para estos dos intervalos cerrados; por ejemplo, si se van a multiplicar 2 variables difusas con 3 cortes α cada una, se realizarán en realidad 3 multiplicaciones de intervalos, cada una de las cuales requiere, a su vez, 8 multiplicaciones, lo que nos daría un total de 24 multiplicaciones.

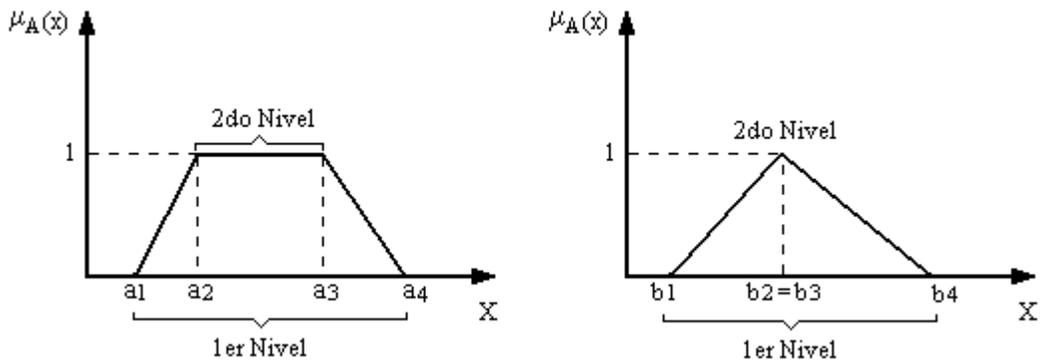


Figura 2.6 Niveles de las variables difusas \tilde{A} y \tilde{B}

Se puede observar en la figura 2.6 que para variables difusas trapezoidales el primer nivel lo conforman el primer y último quiebre de la función de membresía (1 y 4) y el segundo nivel está conformado por el segundo y tercer quiebre.

Extendiendo las operaciones de intervalos a dos variables difusas trapezoidales \tilde{A} y \tilde{B} se tiene:

Suma y resta:

$$\tilde{A} + \tilde{B} = [a_1 + b_1, a_2 + b_2, a_3 + b_3, a_4 + b_4] \quad (2.21)$$

$$\tilde{A} - \tilde{B} = [a_1 - b_4, a_2 - b_3, a_3 - b_2, a_4 - b_1] \quad (2.22)$$

Multipliación por un real:

$$\lambda \in \mathfrak{R}^+ \quad \lambda \cdot \tilde{A} = (\lambda \cdot a_1, \lambda \cdot a_2, \lambda \cdot a_3, \lambda \cdot a_4) \quad (2.23)$$

$$\lambda \in \mathfrak{R}^- \quad \lambda \cdot \tilde{A} = (\lambda \cdot a_4, \lambda \cdot a_3, \lambda \cdot a_2, \lambda \cdot a_1)$$

Las operaciones con variables difusas tienen las siguientes propiedades:

1. Si \tilde{A} y \tilde{B} son variables difusas en el eje real, entonces $\tilde{A} + \tilde{B}$ y $\tilde{A} - \tilde{B}$ son también variables difusas.
2. Si \tilde{A} y \tilde{B} son variables difusas en \mathfrak{R}^+ , entonces $\tilde{A} \cdot \tilde{B}$ y $\tilde{A} : \tilde{B}$ son también variables difusas.
3. No están definidas las variables difusas imagen e inversa $\bar{\tilde{A}}$ y \tilde{A}^{-1} , respectivamente, tal que:

$$\tilde{A} + \bar{\tilde{A}} = 0 \quad \text{y} \quad \tilde{A} \cdot \tilde{A}^{-1} = 1 \quad (2.24)$$

4. Se cumplen las siguientes desigualdades:

$$[\tilde{A} - \tilde{B}] + \tilde{B} \neq \tilde{A} \quad \text{y} \quad [\tilde{A} : \tilde{B}] \cdot \tilde{B} \neq \tilde{A} \quad (2.25)$$

sin embargo se cumple que:

$$[\tilde{A} - \tilde{B}] + \tilde{B} \supseteq \tilde{A} \quad \text{y} \quad [\tilde{A} : \tilde{B}] \cdot \tilde{B} \supseteq \tilde{A} \quad (2.26)$$

Las ecuaciones con variables difusas no se pueden resolver de la manera usual debido a que no es posible utilizar inversas aditivas y multiplicativas ya que; aunque la solución va a contener a la solución verdadera, también va a contener muchas no soluciones, lo que provocará que el intervalo se abra y el resultado obtenido no represente la solución verdadera. La solución exacta en (2.26) solamente se encontrara cuando se cumpla que b_1^α y b_2^α sean iguales

2.3.4 Solución de una ecuación sencilla con variables difusas

Considere la ecuación:

$$\tilde{A} + \tilde{N} = \tilde{S} \quad (2.27)$$

donde \tilde{A} y \tilde{S} son variables difusas trapezoidales representadas por sus puntos de quiebre:

$$\begin{aligned} \tilde{A} &= (a_1, a_2, a_3, a_4) \\ \tilde{S} &= (s_1, s_2, s_3, s_4) \end{aligned}$$

despejando \tilde{N} :

$$\tilde{N} = \tilde{S} - \tilde{A}$$

$$\begin{aligned} (n_1, n_2, n_3, n_4) &= (s_1, s_2, s_3, s_4) - (a_1, a_2, a_3, a_4) \\ (n_1, n_2, n_3, n_4) &= (s_1 - a_4, s_2 - a_3, s_3 - a_2, s_4 - a_1) \end{aligned} \quad (2.28)$$

sustituyendo (2.28) en (2.27):

$$\begin{aligned} (a_1, a_2, a_3, a_4) + (s_1 - a_4, s_2 - a_3, s_3 - a_2, s_4 - a_1) &= \\ = (s_1 + a_1 - a_4, s_2 + a_2 - a_3, s_3 + a_3 - a_2, s_4 + a_4 - a_1) & \end{aligned} \quad (2.29)$$

Esta solución no es igual a \tilde{S} , sin embargo contiene a \tilde{S} , lo que indica que es una solución conservadora que contiene a la solución exacta, pero también otras *no soluciones*. La solución exacta se encuentra cuando se cumple que $a_1 = a_4$ y $a_3 = a_2$. Esto es algo importante a considerar al trabajar con variables difusas.

CAPÍTULO III

ESTUDIO DE FLUJOS DIFUSO LINEAL

3.1 Introducción

El estudio de flujos de potencia convencional (determinístico) [1,9] se puede describir como un sistema de n ecuaciones con n incógnitas, donde existe una solución factible. En esta formulación la solución será tan confiable como lo sean sus datos de entrada, los cuales se pueden obtener mediante mediciones, pronósticos o estimación, por lo que están sujetos a errores.

Debido a la incertidumbre, en estudios de planeación se requiere un gran número de estudios de flujos para cubrir todas las posibles combinaciones de cargas y generaciones, y así tener un rango de la variabilidad de los flujos de potencia en el sistema. En la operación de sistemas eléctricos, aún cuando los datos se obtengan de mediciones, los errores ocasionan que la solución del problema de flujos no corresponda exactamente a la condición operativa real.

Una alternativa para resolver este problema sería mediante un estudio de flujos estocástico [7,8], donde la incertidumbre en las inyecciones de potencia se modela con una función de distribución de probabilidad. En este capítulo se presenta otra alternativa para la solución de este problema, donde la incertidumbre en los datos de entrada se modela con variables difusas.

3.2 Representación de incertidumbre en cargas y generación

La incertidumbre en las inyecciones de potencia nodales (cargas y generaciones) se representará como una variable difusa [3,4,10], con una función de membresía en el eje real. Como se indicó en el capítulo 2, las variables difusas pueden tener una gran variedad de formas, en este capítulo se utilizan variables difusas con representaciones trapezoidales, triangulares y rectangulares, sin embargo, no representaría ningún problema manejar variables difusas de formas más complejas.

Una declaración lingüística como: *"seguramente la carga no será menor a 8 MW ni mayor a 15 MW, pero el mejor estimado es que se encontrará entre 10 y 14 MW"* se puede traducir en la variable difusa trapezoidal de la figura 3.1

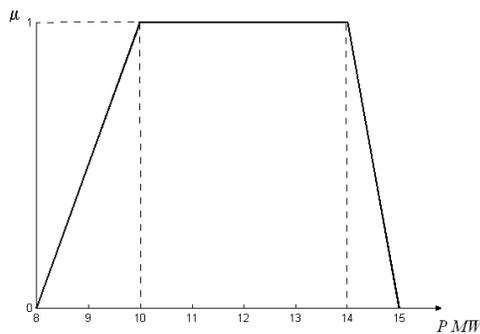


Figura 3.1 Variable difusa representando a una predicción de carga lingüística.

3.3 Metodología analizada

3.3.1 Flujo lineal determinístico [1,9,17]

El comportamiento de un sistema de potencia de alto voltaje, con líneas de transmisión con una relación $x/r > 5$, con magnitudes de voltaje constantes se puede describir con una buena aproximación para los flujos de potencia activa, utilizando el siguiente modelo lineal:

$$P = -B\theta \quad (3.1)$$

donde:

- P Vector de inyecciones nodales de potencia activa
- θ Vector de ángulos de fase nodales
- B Parte imaginaria de la matriz de admitancias del sistema

De la ecuación (3.1) se pueden despejar los ángulos nodales, los cuales son función de las inyecciones de potencia. Si se incluyen en P todas las inyecciones nodales la matriz B será singular, ya que al menos una inyección es dependiente. Para evitar esta singularidad se fija un ángulo de la red (nodo compensador) y se elimina la inyección correspondiente.

Dado que el vector P siempre tendrá una incertidumbre asociada, los flujos de potencia en el sistema tendrán también incertidumbre.

Una vez que se conocen todos los ángulos nodales, la manera como usualmente se calculan los flujos de potencia activa en las líneas es la siguiente:

$$F_{k-l} = \frac{\theta_k - \theta_l}{X_{k-l}} \quad (3.2)$$

donde:

- θ_k Angulo en el nodo de envío
- θ_l Angulo en el nodo de recepción
- X_{k-l} Reactancia de la línea $k-l$

3.3.2 Extensión de flujo de potencia lineal determinístico a flujo difuso lineal

En este caso la incertidumbre se representará con una función de distribución de posibilidad descrita mediante una variable difusa [3,4,5,10]. Como en esta formulación los ángulos dependen linealmente de las inyecciones de potencia, en vez de un valor determinístico de ángulos, se obtendrá una función de posibilidad que describa los valores que pueden tener estos ángulos y un nivel de posibilidad asociado a cada uno de estos valores.

La ecuación (3.1) quedará:

$$\tilde{P} = Y\tilde{\theta} \quad (3.3)$$

donde:

- \tilde{P} Vector de funciones de posibilidad de inyecciones de potencia
- $\tilde{\theta}$ Vector de funciones de posibilidad de ángulos nodales

despejando $\tilde{\theta}$:

$$\tilde{\theta} = Y^{-1} \tilde{P} \quad (3.4)$$

Aplicando las reglas de aritmética de variables difusas (2.21), (2.22) y (2.23) en la ecuación (3.4) se obtienen directamente las funciones de distribución de posibilidad de los ángulos.

No es apropiado obtener las funciones de distribución de posibilidad de los flujos de potencia directamente de la ecuación (3.2), como comúnmente se hace en la formulación determinística, debido a que los resultados tendrían una incertidumbre mucho mayor a la real; esto es porque existen valores de ángulos nodales que son excluyentes y al utilizar la ecuación (3.2) se considera que los ángulos pueden tomar cualquier valor (dentro de su función de distribución de posibilidad) sin importar los valores de los ángulos en otros nodos.

Para obtener la función de distribución de posibilidad exacta de los flujos de potencia es necesario tener los flujos de las líneas en función de las inyecciones de potencia nodales (ecuación 3.5), ya que estas son completamente independientes y pueden tomar cualquier valor sin importar las inyecciones en los otros nodos del sistema.

$$\tilde{F}_{k-l} = \sum_{n=2}^N \left(\frac{Z(k,n) - Z(l,n)}{X_{k-l}} \right) \tilde{P}_n \quad (3.5)$$

donde:

- \tilde{F}_{k-l} Función de distribución de posibilidad del flujo de potencia que va del nodo k al nodo l
- N Número de nodos del sistema

\tilde{P}_n Función de distribución de posibilidad de la inyección de potencia en el nodo n

la misma ecuación se puede escribir

$$\tilde{F}_{k-l} = \sum_{n=2}^N (C_{kl/n}) \tilde{P}_n \quad (3.6)$$

donde:

$C_{kl/n}$ Coeficiente de sensibilidad de la línea $k-l$ con respecto a la inyección de potencia en el nodo n .

En la ecuación (3.6) los flujos en la líneas dependen solamente de las funciones de distribución de posibilidad de las inyecciones de potencia, y se puede resolver utilizando (2.21), (2.22) y (2.23).

3.3.3 Diagrama de flujo

Se muestra en la figura 3.2 el diagrama de flujo del algoritmo utilizado:

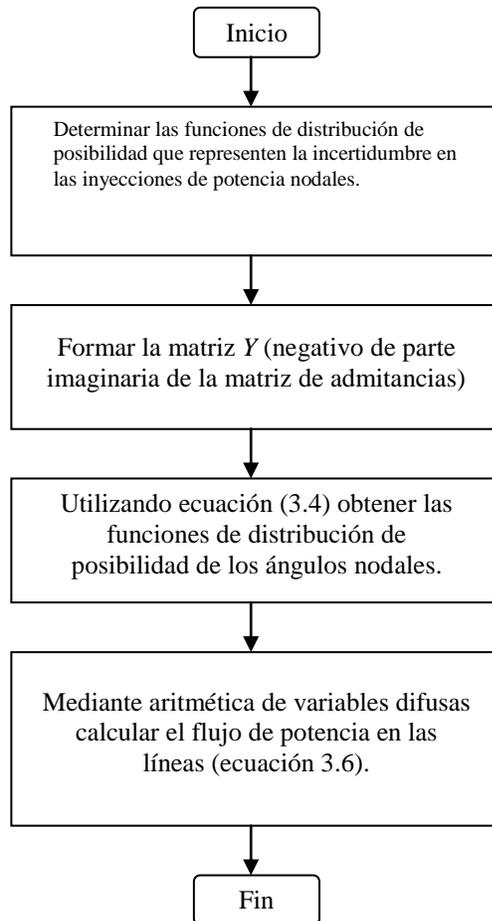


Figura 3.2 Diagrama de flujo del algoritmo de flujo difuso lineal.

3.4 Aplicaciones

Para ilustrar la aplicación se utilizó el sistema de prueba de la figura 3.3:

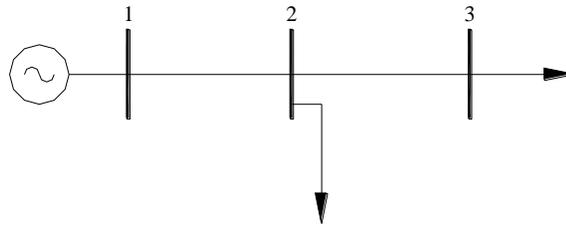


Figura 3.3 Sistema de prueba I.

Los parámetros del sistema se muestran en la tabla 3.1

Tabla 3.1 Parámetros del sistema.

<i>Parámetros de Líneas</i>	
Nodos	X
1-2	0.1
2-3	0.15

La carga en el nodo 2 se representará con una variable difusa trapezoidal, donde la carga varía entre 0.3 y 0.8 p.u., pero la mayor posibilidad es que se encuentre entre 0.5 y 0.7 p.u.; la carga en el nodo 3 no tiene incertidumbre, se asume igual a 1 p.u. La tabla 3.2 y la figura 3.4 ilustran la incertidumbre del caso de estudio.

Tabla 3.2 Inyecciones de potencia nodales.

NODOS	P
1	Compensador
2	(-0.8; -0.7; -0.5, -0.3)
3	(-1.0; -1.0; -1.0; -1.0)

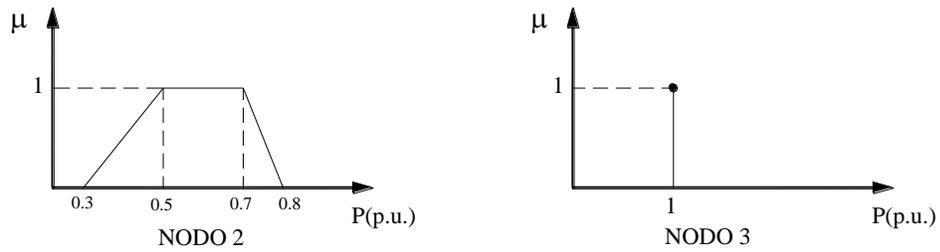


Figura 3.4 Funciones de distribución de posibilidad de la carga en nodos 2 y 3

Al aplicar la ecuación (3.4) se obtienen las funciones de distribución de posibilidad (variables difusas) de ángulos mostradas en la tabla 3.3:

Tabla 3.3 Ángulos difusos resultantes.

θ_1	(0; 0; 0; 0) (compensador)
θ_2	(-0.18; -0.17; -0.15; -0.13)
θ_3	(-0.33; -0.32; -0.30; -0.28)

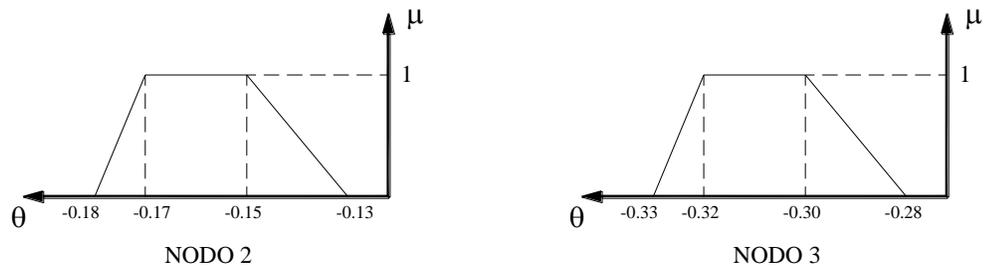


Figura 3.5 Funciones de distribución de posibilidad de los ángulos nodales.

Se puede observar en la figura 3.5 que las funciones de distribución de posibilidad de θ_2 y θ_3 son de forma trapezoidal, y el ángulo del nodo 3 se ajusta siempre al del nodo 2 para obtener un flujo de 1 p.u. en la línea 2-3.

Aplicando la ecuación (3.6) se obtienen los flujos mostrados en la figura 3.6:

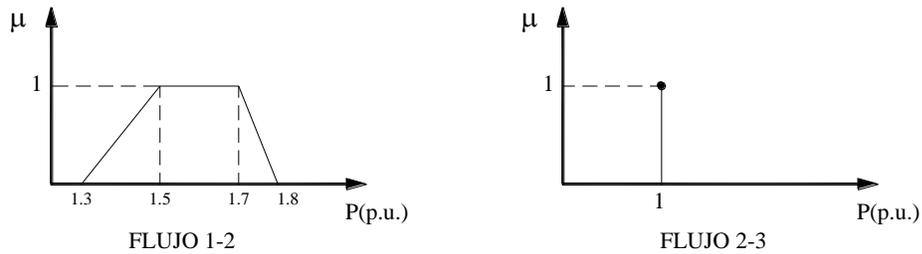


Figura 3.6 Funciones de distribución de posibilidad de los flujo en líneas

En este caso si a la variable difusa que representa al flujo 1-2 se le resta el flujo de la línea 2-3 se obtiene exactamente la carga del nodo 2, esto es debido a que el flujo 2-3 cumple la condición necesaria para obtener un resultado exacto (ecuación (2.26)).

Si se cambiara el valor de la carga en el nodo 3 como se muestra en la tabla 3.4:

Tabla 3.4 Inyecciones de potencia nodales.

Nodo	P
1	Compensador
2	(-0.8; -0.7; -0.5, -0.3)
3	(-0.9; -0.8; -0.4; -0.2)

Los flujos en las líneas resultantes son los que se muestran en la tabla 3.5:

Tabla 3.5 Flujo en líneas.

F_{1-2}	(0.5; 0.9; 1.5; 1.7)
F_{2-3}	(0.2; 0.4; 0.8; 0.9)

Es importante observar que si al flujo en la línea 1-2 se le resta el flujo que va del nodo 2 al nodo 3 no se obtiene la función de distribución de posibilidad de la carga en el nodo 2; lo que se obtiene es una función de distribución de posibilidad que incluye a la función que representa a la carga en el nodo 2, pero contiene además muchas *no soluciones*, lo que provoca una mayor incertidumbre. Esto se muestra en la figura 3.7, donde la línea continua representa el valor exacto de la carga, mientras que la línea punteada muestra la función de distribución de posibilidad que contiene al valor exacto de la carga.

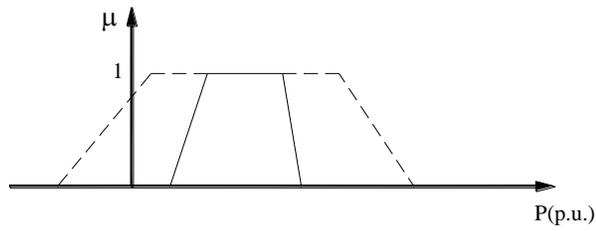


Figura 3.7 Función de distribución de posibilidad de la carga en nodo 2.

Considere ahora el sistema de prueba II, que se muestra en la figura 3.8:

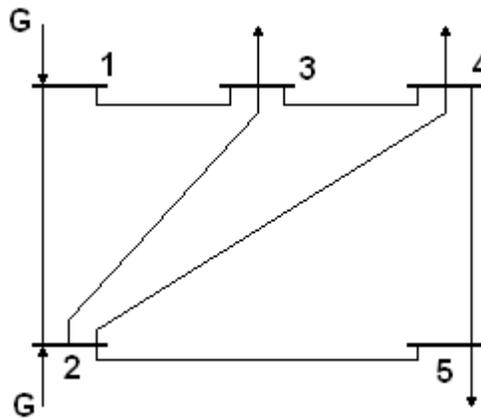


Figura 3.8 Sistema de prueba II.

Los parámetros del sistema se muestran en el apéndice A1. Las funciones de distribución de posibilidad son diferentes en cada nodo, figura 3.9.

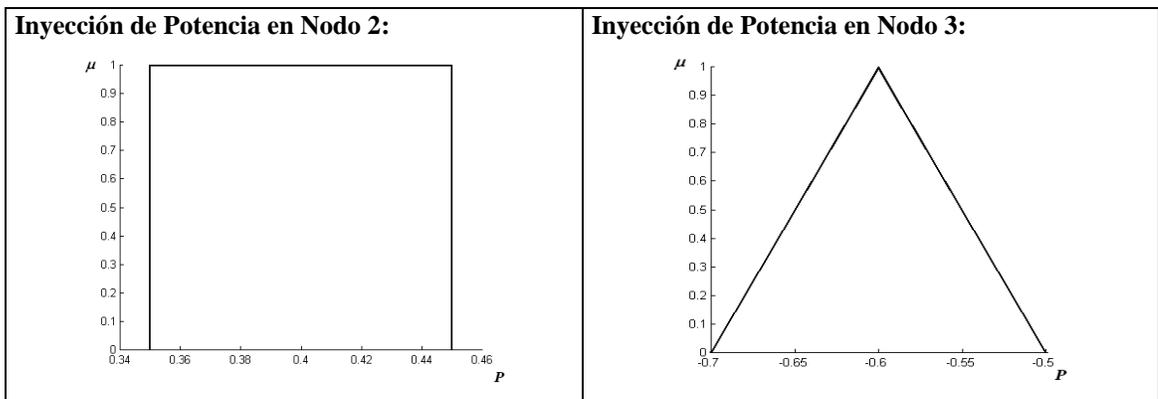


Figura 3.9 Funciones de distribución de posibilidad de las inyecciones de potencia.

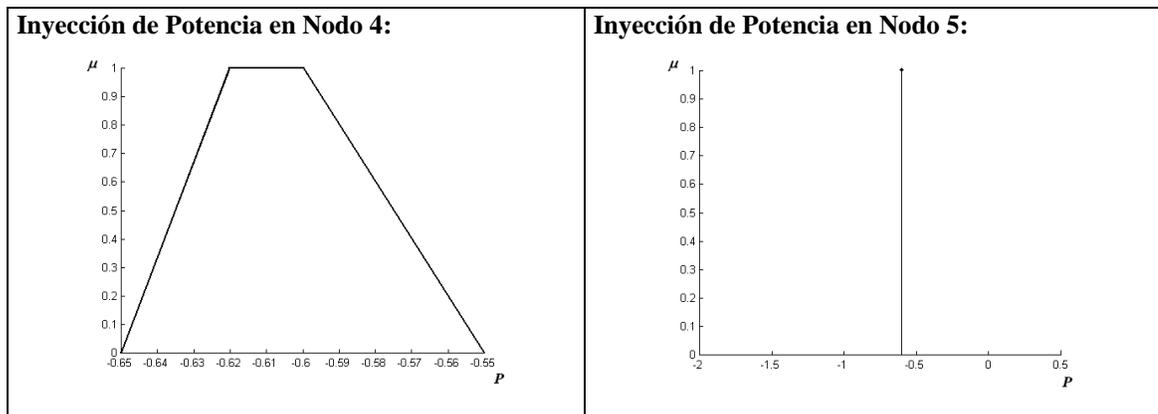


Figura 3.9 (continuación) Funciones de distribución de posibilidad de las inyecciones de potencia.

Mediante la ecuación (3.4) se obtienen las funciones de distribución de posibilidad de los ángulos (tabla 3.6):

Tabla 3.6 Funciones de distribución de posibilidad de ángulos.

$\tilde{\theta}_1$	(0 0 0 0) (compensador)
$\tilde{\theta}_2$	(-0.0632 -0.0582 -0.0523 -0.0465)
$\tilde{\theta}_3$	(-0.1313 -0.1200 -0.1147 -0.1018)
$\tilde{\theta}_4$	(-0.1381 -0.1273 -0.1214 -0.1088)
$\tilde{\theta}_5$	(-0.1361 -0.1292 -0.1234 -0.1153)

Y fácilmente con la ecuación (3.6) se encuentra la función de distribución de posibilidad de los flujos de potencia (tabla 3.7).

Tabla 3.7 Funciones de distribución de posibilidad de flujos de potencia.

\tilde{F}_{1-2}	(0.7757 0.8721 0.9699 1.0529)
\tilde{F}_{1-3}	(0.4243 0.4779 0.5001 0.5471)
\tilde{F}_{2-3}	(0.3000 0.3393 0.3507 0.3857)
\tilde{F}_{2-4}	(0.3400 0.3781 0.3899 0.4219)
\tilde{F}_{2-5}	(0.5700 0.5890 0.5950 0.6110)
\tilde{F}_{3-4}	(0.1629 0.2243 0.2437 0.2943)
\tilde{F}_{4-5}	(-0.0110 0.0050 0.0110 0.0300)

Es interesante observar lo que ocurre en el flujo \tilde{F}_{4-5} donde la función de distribución de posibilidad va de un valor negativo a uno positivo, esto es debido a que para ciertas combinaciones de valores de cargas el flujo de potencia en la línea se invertirá. Esto se ilustra en la figura 3.9.

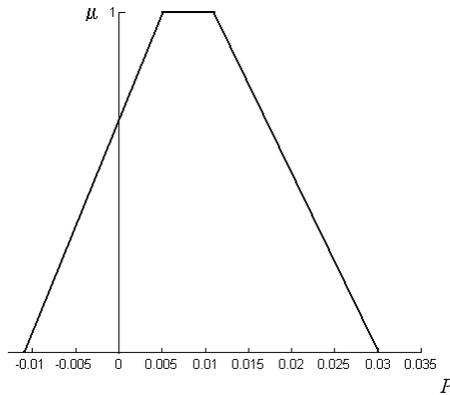


Figura 3.9 Flujo en la línea 3-4.

CAPÍTULO IV

ESTUDIO DE FLUJOS DIFUSOS DE C.A.

4.1 Introducción

En este capítulo se presenta una formulación para manejar la incertidumbre en estudios de flujos de potencia de C.A., modelando esta incertidumbre mediante variables difusas, las cuales se pueden asociar a funciones de distribución de posibilidad. En el estudio se utilizó el método Newton-Raphson, pero no representa ningún problema extender la formulación a cualquier otro método (desacoplado, desacoplado rápido, etc) [1,2,9,14].

4.2 Representación de incertidumbre en carga y generación

La incertidumbre en las inyecciones de potencia (tanto real como reactiva) se modelará con funciones de distribución de posibilidad, donde el nivel o grado de membresía de un elemento en el conjunto representará el nivel de posibilidad de dicho elemento; pueden existir funciones de distribución de posibilidad de varias formas, en la

figura 4.1 se muestran las funciones de distribución de posibilidad trapezoidales de potencia real y reactiva para la inyecciones de potencia en un nodo determinado.

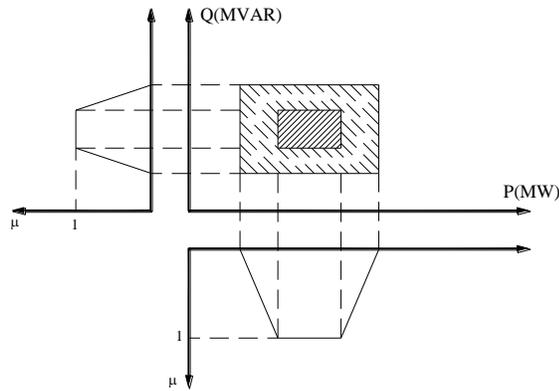


Figura 4.1 Variables difusas representando una inyección de potencia (P y Q)

4.3 Flujos determinísticos de C.A. por el método Newton – Raphson

Uno de los métodos iterativos más utilizados para resolver el problema de flujos de potencia no lineales es el método Newton-Raphson [1,2,9], el cual muestra una buena convergencia para la mayoría de los sistemas eléctricos de potencia.

Para aplicar el método Newton – Raphson a la solución de las ecuaciones de balance de potencia nodal, los voltajes nodales y las admitancias se expresarán en forma polar.

Con las ecuaciones (4.1) y (4.2) se pueden calcular las inyecciones de potencia nodales:

$$P_{i,calc} = |V_i|^2 G_{ii} + \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^n |V_i V_k Y_{ik}| \cos(\theta_{ik} + \delta_k - \delta_i) \quad (4.1)$$

$$Q_{i,calc} = -|V_i|^2 B_{ii} - \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^n |V_i V_k Y_{ik}| \sin(\theta_{ik} + \delta_k - \delta_i) \quad (4.2)$$

donde:

P_i Inyección de potencia activa en el nodo i

Q_i	Inyección de potencia reactiva en el nodo i
$ V_k $	Magnitud de voltaje en el nodo k
δ_k	Ángulo en el nodo k
G_{ik}	Parte real del elemento (i,k) de la matriz de admitancias "Y".
B_{ik}	Parte imaginaria del elemento (i,k) de la matriz de admitancias "Y".
θ_{ik}	Ángulo del elemento (i,k) de la matriz de admitancias "Y"
n	Número de nodos

Las ecuaciones (4.1) y (4.2) son función de magnitudes de voltaje y ángulos de fase. Se tendrán $n-1$ variables desconocidas de ángulo, debido a que un ángulo se fija como referencia (nodo compensador) y $n-nvc$ variables desconocidas de voltaje, donde nvc es el número de nodos de voltaje controlado.

$$[\delta] = \begin{bmatrix} \delta_1 \\ \delta_2 \\ \vdots \\ \delta_{n-1} \end{bmatrix} \quad [V] = \begin{bmatrix} |V_1| \\ |V_2| \\ \vdots \\ |V_{n-nvc}| \end{bmatrix} \quad (4.3)$$

Acomodando las variables en un solo vector de incógnitas:

$$[X] = \begin{bmatrix} \delta \\ |V| \end{bmatrix} \quad (4.4)$$

Las inyecciones de potencia $P_{i,prog}$ y $Q_{i,prog}$ son conocidas en los nodos de carga, y se pueden comparar con las inyecciones calculadas $P_{i,calc}$ y $Q_{i,calc}$ para obtener los vectores de desbalance nodal:

$$\Delta P = \begin{bmatrix} P_{1,prog} - P_{1,calc} \\ \vdots \\ P_{n-1,prog} - P_{n-1,calc} \end{bmatrix} \quad \Delta Q = \begin{bmatrix} Q_{1,prog} - Q_{1,calc} \\ \vdots \\ Q_{n-1-nvc,prog} - Q_{n-1-nvc,calc} \end{bmatrix} \quad (4.5)$$

Integrando todos los desbalances en un solo vector:

$$\Delta F = \begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} \quad (4.6)$$

La relación entre el vector de incógnitas (4.4) y el vector de desbalances (4.6) es la matriz de derivadas parciales o Jacobiano:

$$J = \begin{bmatrix} H & N \\ J & L \end{bmatrix} \quad (4.7)$$

$$[J] \begin{bmatrix} \Delta \delta \\ \frac{\Delta |V|}{|V|} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} \quad (4.8)$$

La manera de formar el Jacobiano se puede ver a detalle en el apéndice B1.

Despejando de (4.8) se calculan las correcciones en magnitudes de voltaje y ángulos de fase:

$$\begin{bmatrix} \Delta \delta^V \\ \frac{\Delta |V|^V}{|V|} \end{bmatrix} = [J^V]^{-1} \begin{bmatrix} \Delta P^V \\ \Delta Q^V \end{bmatrix} \quad (4.9)$$

El superíndice V indica el número de iteración, con estas correcciones se obtienen los nuevos voltajes y ángulos mediante la ecuación (4.10):

$$\begin{bmatrix} \delta^{v+1} \\ |V|^{v+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \delta^v \\ |V|^v \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Delta\delta^v \\ \Delta|V|^v \end{bmatrix} \quad (4.10)$$

Con los nuevos valores de voltajes y ángulos se continúa iterando hasta que la diferencia entre las potencias calculadas y las especificadas (vector de desbalances ΔF) es menor a una tolerancia preestablecida.

Una vez obtenidos los voltajes y ángulos finales se pueden calcular los flujos de potencia en las líneas con las ecuaciones (4.11) y (4.12).

$$P_{e-r} = G_{e,r} V_e^2 - G_{e,r} V_e V_r \cos(\delta_e - \delta_r) - B_{e,r} V_e V_r \sin(\delta_e - \delta_r) \quad (4.11)$$

$$Q_{e-r} = -(Y_C)_{e-r} V_e^2 - B_{e-r} V_e^2 - G_{e-r} V_e V_r \sin(\delta_e - \delta_r) + B_{e-r} V_e V_r \cos(\delta_e - \delta_r) \quad (4.12)$$

4.4 Extensión a flujos difusos de C.A.

En esta sección se presentará el procedimiento para introducir la incertidumbre a las formulaciones de flujos de C.A.[3,4].

4.4.1 Evaluación de incertidumbre en voltajes y ángulos (V y δ)

Para evaluar la incertidumbre primeramente se debe realizar una corrida con los valores centrales de las funciones de distribución de posibilidad, estos valores son el centro del corte $\alpha = 1$, como se muestra en la figura 4.2. Con esta corrida obtenemos valores centrales de voltajes, ángulos y flujos de potencia (activa y reactiva).

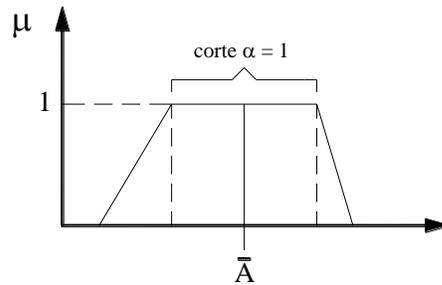


Figura 4.2 Valor central de una variable difusa.

Si se utiliza el método Newton – Raphson, los voltajes y ángulos se obtienen mediante la ecuación (4.13):

$$\begin{bmatrix} \delta^{ctr} \\ |V|^{ctr} \end{bmatrix} = [J]^{-1} \begin{bmatrix} P^{ctr} \\ Q^{ctr} \end{bmatrix} \quad (4.13)$$

donde el superíndice *ctr* significa valores centrales.

El siguiente paso es encontrar las desviaciones debido a las inyecciones nodales difusas, dejando la incertidumbre como pequeños cambios de potencia. Esto se logra restando a las variables el valor central de cada función de distribución de posibilidad (ecuación (4.14)), que es equivalente a mover la función de distribución de posibilidad para que su valor central quede en el origen, como se muestra en la figura 4.3.

$$\begin{bmatrix} \Delta \tilde{P} \\ \Delta \tilde{Q} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \tilde{P} \\ \tilde{Q} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} P^{ctr} \\ Q^{ctr} \end{bmatrix} \quad (4.14)$$

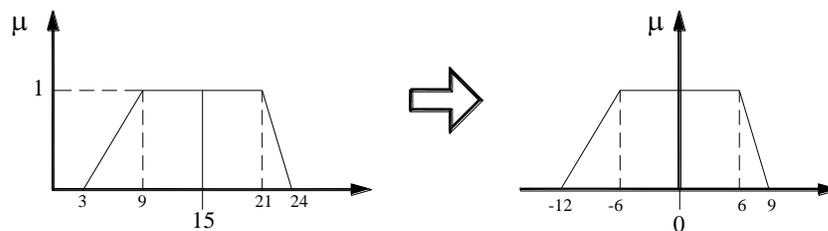


Figura 4.3 Conversión de variable difusa a desviación difusa.

Conociendo las desviaciones difusas de las inyecciones de potencia se pueden calcular las desviaciones de los voltajes y ángulos nodales, para esto se requieren coeficientes que relacionen pequeños cambios de voltajes y ángulos en los nodos con pequeños cambios en las inyecciones de potencia. Las ecuaciones que se utilizan para calcular las inyecciones de potencia están en función de voltajes y ángulos, si se expanden en serie de Taylor se tiene:

$$\Delta P_i = \left[\frac{\partial P_i}{\partial \delta_1} \Delta \delta_1 + \frac{\partial P_i}{\partial \delta_2} \Delta \delta_2 + \dots + \frac{\partial P_i}{\partial \delta_n} \Delta \delta_n \right] + \left[\frac{\partial P_i}{\partial |V_1|} \Delta |V_1| + \frac{\partial P_i}{\partial |V_2|} \Delta |V_2| + \dots + \frac{\partial P_i}{\partial |V_n|} \Delta |V_n| \right] \quad (4.15)$$

$$\Delta Q_i = \left[\frac{\partial Q_i}{\partial \delta_1} \Delta \delta_1 + \frac{\partial Q_i}{\partial \delta_2} \Delta \delta_2 + \dots + \frac{\partial Q_i}{\partial \delta_n} \Delta \delta_n \right] + \left[\frac{\partial Q_i}{\partial |V_1|} \Delta |V_1| + \frac{\partial Q_i}{\partial |V_2|} \Delta |V_2| + \dots + \frac{\partial Q_i}{\partial |V_n|} \Delta |V_n| \right] \quad (4.16)$$

Existen nodos en los que el cambio en el ángulo (nodo compensador) y en el voltaje (nodos de voltaje controlado) es igual a cero, estos elementos se pueden eliminar de las ecuaciones (4.15) y (4.16). Si se resuelve lo anterior para cada una de las inyecciones de potencia y se acomoda en forma matricial se obtiene el último Jacobiano del método Newton – Raphson. Se debe tener cuidado ya que por lo regular se hacen algunas manipulaciones matemáticas en el Jacobiano para simplificar ecuaciones (la más común es multiplicar las derivadas parciales respecto a la magnitud del voltaje por la magnitud del mismo voltaje), y si se utiliza este Jacobiano "modificado" para evaluar las desviaciones se introducirá un error en el resultado. En caso que los valores centrales de voltajes y ángulos se hayan encontrado por algún otro método iterativo (desacoplado rápido, por ejemplo) es necesario formar el Jacobiano con los últimos valores de voltajes y ángulos.

Las desviaciones difusas de voltajes y ángulos se obtienen mediante la ecuación (4.17)

$$\begin{bmatrix} \Delta \tilde{\delta} \\ \Delta |\tilde{V}| \end{bmatrix} = [J]^{-1} \begin{bmatrix} \Delta \tilde{P} \\ \Delta \tilde{Q} \end{bmatrix} \quad (4.17)$$

donde $\Delta\tilde{P}$ y $\Delta\tilde{Q}$ son variables difusas que representan funciones de distribución de posibilidad, por lo que para resolver la ecuación (4.17) se deben utilizar las reglas de aritmética de variables difusas mostradas en la sección 2.3.3. A las desviaciones difusas de voltajes y ángulos se les suma su valor medio calculado previamente (ecuación (4.18)), y se obtienen las funciones de distribución de posibilidad de los voltajes y ángulos nodales, esto se muestra en la figura 4.4.

$$\begin{bmatrix} \tilde{\delta} \\ |\tilde{V}| \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \delta^{ctr} \\ |V|^{ctr} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Delta\tilde{\delta} \\ \Delta|\tilde{V}| \end{bmatrix} \quad (4.18)$$

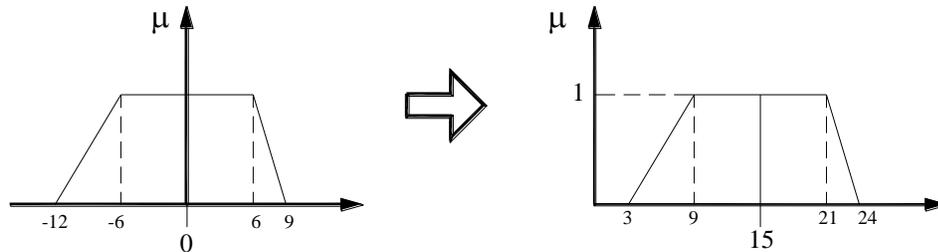


Figura 4.4 Conversión de las desviaciones difusas a una función de distribución de posibilidad.

4.4.2 Coeficientes de sensibilidad

El siguiente paso es calcular las funciones de distribución de posibilidad de los flujos de potencia en las líneas del sistema. Por lo general, al realizar el estudio determinístico, se utilizan ecuaciones que están en función de voltajes y ángulos (ecuaciones (4.11) y (4.12)); en el estudio de flujos difusos no se pueden utilizar estas ecuaciones debido a que las funciones de distribución de posibilidad de voltajes y ángulos tienen áreas o valores mutuamente excluyentes, y si se utilizan las ecuaciones antes mencionadas se obtendrán funciones de distribución de posibilidad con una mayor incertidumbre a la real, es decir, se obtendrán funciones que van a contener a la solución exacta, pero también van a tener muchas *no soluciones* y los resultados no van a estar apegados a la realidad. Por lo tanto, es necesario tener coeficientes que relacionen los flujos de

potencia (tanto real como reactiva) con las entradas del problema, que son variables independientes, es decir, se requieren coeficientes que muestren el cambio en el flujo en las líneas debido a un cambio en las inyecciones de potencia nodales.

Los flujos de potencia en las líneas están en función del voltaje en el nodo de envío, el voltaje en el nodo de recepción, y de los ángulos en los nodos de envío y recepción, como se puede observar en las ecuaciones (4.11) y (4.12). Si se expanden estas ecuaciones en serie de Taylor, se encuentran coeficientes que indican el cambio en la potencia para pequeños cambios en los voltajes y ángulos que la afectan. Esto se muestra en las ecuaciones (4.19) y (4.20).

$$\Delta P_{e-r} = \frac{\partial P_{e-r}}{\partial \delta_e} \Delta \delta_e + \frac{\partial P_{e-r}}{\partial \delta_r} \Delta \delta_r + \frac{\partial P_{e-r}}{\partial |V|_e} \Delta |V|_e + \frac{\partial P_{e-r}}{\partial |V|_r} \Delta |V|_r \quad (4.19)$$

$$\Delta Q_{e-r} = \frac{\partial Q_{e-r}}{\partial \delta_e} \Delta \delta_e + \frac{\partial Q_{e-r}}{\partial \delta_r} \Delta \delta_r + \frac{\partial Q_{e-r}}{\partial |V|_e} \Delta |V|_e + \frac{\partial Q_{e-r}}{\partial |V|_r} \Delta |V|_r \quad (4.20)$$

donde el subíndice e denota que es el nodo de envío, y r significa "recepción".

En el apéndice B2 se puede ver en detalle las derivadas parciales que se utilizan en las ecuaciones (4.19) y (4.20).

Acomodando las ecuaciones en forma matricial para los flujos de potencia activa y reactiva:

$$\Delta P_{e-r} = \begin{bmatrix} \frac{\partial P_{e-r}}{\partial \delta_e} & \frac{\partial P_{e-r}}{\partial \delta_r} & \frac{\partial P_{e-r}}{\partial |V|_e} & \frac{\partial P_{e-r}}{\partial |V|_r} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta_e \\ \Delta \delta_r \\ \Delta |V|_e \\ \Delta |V|_r \end{bmatrix} \quad (4.21)$$

$$\Delta Q_{e-r} = \begin{bmatrix} \frac{\partial Q_{e-r}}{\partial \delta_e} & \frac{\partial Q_{e-r}}{\partial \delta_r} & \frac{\partial Q_{e-r}}{\partial |V|_e} & \frac{\partial Q_{e-r}}{\partial |V|_r} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta_e \\ \Delta \delta_r \\ \Delta |V|_e \\ \Delta |V|_r \end{bmatrix} \quad (4.22)$$

A su vez, el Jacobiano relaciona cambios en los ángulos y voltajes con cambios en las inyecciones de potencia, como se muestra en la ecuación (4.23)

$$\begin{bmatrix} \Delta \delta_e \\ \Delta \delta_r \\ \Delta |V|_e \\ \Delta |V|_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (J^{-1})' \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} \quad (4.23)$$

La matriz $\begin{bmatrix} (J^{-1})' \end{bmatrix}$ contiene solamente los renglones del Jacobiano que relacionan los voltajes y ángulos indicados en el vector del lado izquierdo de la ecuación (4.23), será, entonces, siempre de dimensión (4 x n).

Sustituyendo (4.23) en (4.21) y (4.22) se obtienen las expresiones buscadas:

$$\Delta P_{e-r} = \begin{bmatrix} \frac{\partial P_{e-r}}{\partial \delta_e} & \frac{\partial P_{e-r}}{\partial \delta_r} & \frac{\partial P_{e-r}}{\partial |V|_e} & \frac{\partial P_{e-r}}{\partial |V|_r} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} (J^{-1})' \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} \quad (4.24)$$

(1 x 4) (4 x n) (n x 1)

$$\Delta Q_{e-r} = \begin{bmatrix} \frac{\partial Q_{e-r}}{\partial \delta_e} & \frac{\partial Q_{e-r}}{\partial \delta_r} & \frac{\partial Q_{e-r}}{\partial |V|_e} & \frac{\partial Q_{e-r}}{\partial |V|_r} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} (J^{-1})' \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} \quad (4.25)$$

(1 x 4) (4 x n) (n x 1)

Al multiplicar el vector de derivadas parciales (de dimensión (1 x 4)) por la matriz de renglones del Jacobiano (que será siempre de dimensión (4 x n)) se obtiene un vector de

coeficientes de sensibilidad de dimensión (1 x n) los cuales relacionan los cambios en las inyecciones de potencia con un cambio en los flujos de las líneas, tanto de potencia activa como reactiva.

4.4.3 Evaluación de incertidumbre en flujos de potencia activa y reactiva

Con los coeficientes de sensibilidad se evalúan las desviaciones difusas de los flujos de potencia activa y reactiva:

$$\Delta\tilde{P}_{e-r} = \begin{bmatrix} \frac{\partial P_{e-r}}{\partial \delta_e} & \frac{\partial P_{e-r}}{\partial \delta_r} & \frac{\partial P_{e-r}}{\partial |V|_e} & \frac{\partial P_{e-r}}{\partial |V|_r} \end{bmatrix} \left[(J^{-1})' \right] \begin{bmatrix} \Delta\tilde{P} \\ \Delta\tilde{Q} \end{bmatrix} \quad (4.26)$$

$$\Delta\tilde{Q}_{e-r} = \begin{bmatrix} \frac{\partial Q_{e-r}}{\partial \delta_e} & \frac{\partial Q_{e-r}}{\partial \delta_r} & \frac{\partial Q_{e-r}}{\partial |V|_e} & \frac{\partial Q_{e-r}}{\partial |V|_r} \end{bmatrix} \left[(J^{-1})' \right] \begin{bmatrix} \Delta\tilde{P} \\ \Delta\tilde{Q} \end{bmatrix} \quad (4.27)$$

A las desviaciones difusas de flujos de potencia activa y reactiva se les suman sus valores medios o centrales para obtener las variables difusas que representan sus funciones de distribución de posibilidad, como se muestra en las ecuaciones (4.28) y (4.29).

$$\tilde{P}_{e-r} = P_{e-r}^{ctr} + \Delta\tilde{P}_{e-r} \quad (4.28)$$

$$\tilde{Q}_{e-r} = Q_{e-r}^{ctr} + \Delta\tilde{Q}_{e-r} \quad (4.29)$$

4.4.4 Diagrama de flujo

Se muestra el diagrama de flujo de la metodología propuesta (figura 4.5)

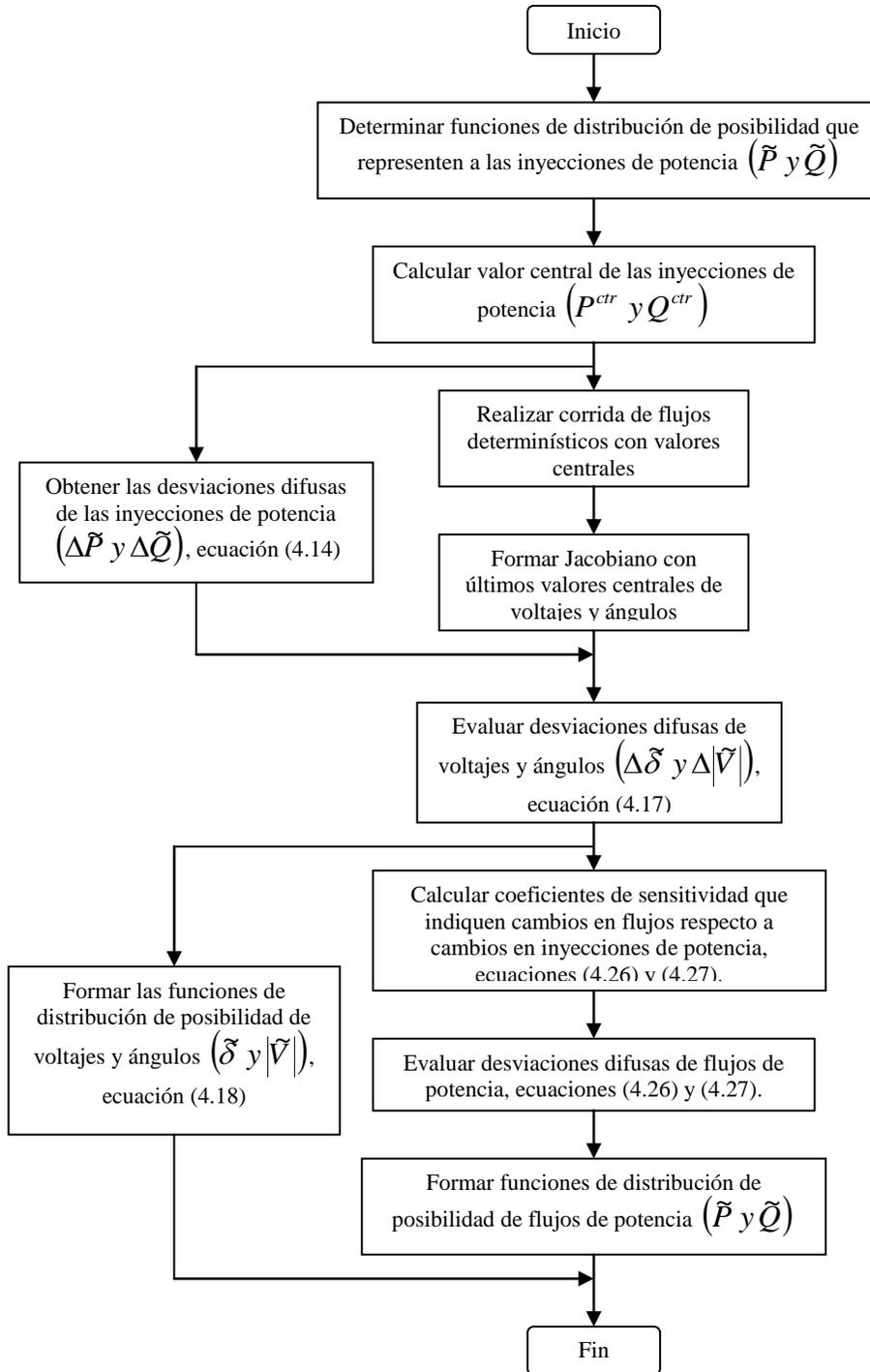


Figura 4.5 Diagrama de flujo del algoritmo utilizado en flujos difusos de CA.

4.5 Casos de prueba:

Se utilizará el sistema de prueba de la figura 4.6, cuyos parámetros se detallan en el apéndice A2, para exponer el cálculo de flujos de potencia difusos.

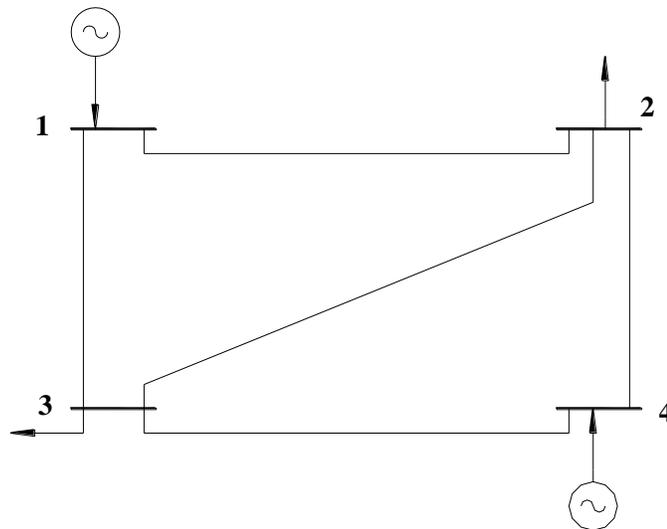


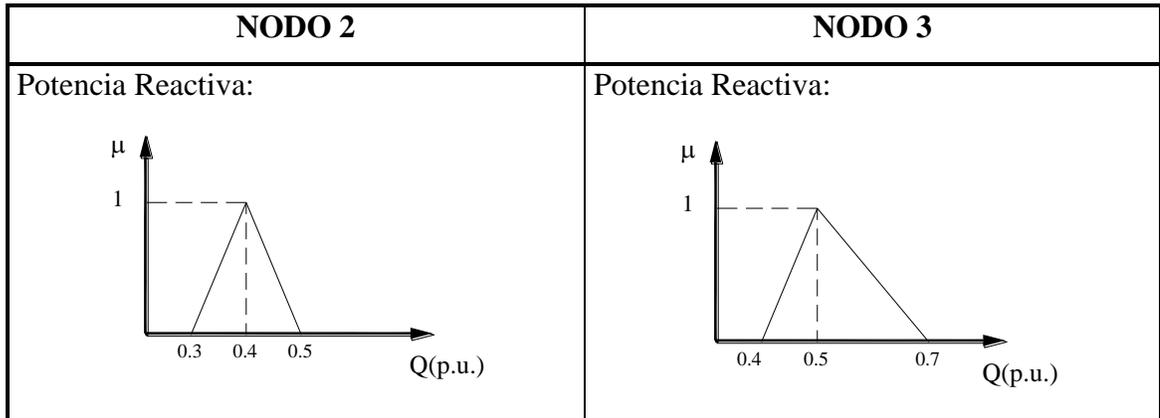
Figura 4.6 Sistema de Prueba.

Las inyecciones de potencia nodales (cargas) están representadas por las siguientes funciones de distribución de posibilidad:

Tabla 4.1 Funciones de distribución de posibilidad de las inyecciones de potencia.

NODO 2	NODO 3
<p>Potencia Activa:</p>	<p>Potencia Activa:</p>

Tabla 4.1 (continuación) Funciones de distribución de posibilidad de las inyecciones de potencia.



Las variables difusas que representan a las funciones de distribución de posibilidad son las siguientes:

Tabla 4.2 Variables difusas representando funciones de distribución de posibilidad.

	Nodo 2:	Nodo 3
Potencia Activa	(-0.97; -0.97; -0.97; -0.95; -0.90; -0.88)	(-0.7; -0.7; -0.7; -0.5; -0.5; -0.5)
Potencia Reactiva	(-0.5; -0.45; -0.4; -0.4; -0.35; -0.30)	(-0.7; -0.6; -0.5; -0.5; -0.45; -0.4)

Se puede observar que la potencia activa demandada en el nodo 2 está representada por una variable difusa de 3 niveles, la cual indica que la mayor posibilidad es que la carga se encuentre entre 0.95 y 0.97 p.u., hay también una alta posibilidad que la carga se encuentre entre 0.9 y 0.95 p.u. hay una mínima posibilidad que la carga activa se encuentre entre 0.88 y 0.9 p.u. La potencia activa demandada en el nodo 3 está representada por un rango simplemente, y ambas inyecciones de potencia reactiva tienen funciones de distribución de posibilidad triangulares.

La potencia activa suministrada por el generador que se encuentra en el nodo 4 tiene la función de distribución de posibilidad mostrada en la figura 4.7:

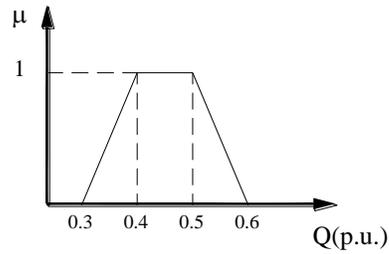


Figura 4.7 Función de distribución de posibilidad de la generación en el nodo 4.

Los resultados de un estudio de flujos determinístico, con los valores centrales del corte ($\alpha = 1$) se muestran en las tablas 4.3 y 4.4:

Tabla 4.3 Valores centrales de flujos de potencia.

Línea	Potencia Activa	Potencia Reactiva
1-2	0.4769	0.0613
2-1	-0.4745	-0.1502
1-3	0.6406	0.1173
3-1	-0.6371	-0.1787
2-3	-0.1642	0.0191
3-2	0.1643	-0.0421
2-4	-0.3213	-0.2689
4-2	0.3226	0.1988
3-4	-0.1272	-0.2793
4-3	0.1274	0.1558

Tabla 4.4 Valores centrales de voltajes y ángulos.

Nodo	Voltaje	Angulo
1	1.0000	0
2	0.9899	-0.0230
3	0.9901	-0.0194
4	1.0000	-0.0144

El siguiente paso consiste en encontrar las desviaciones difusas de las inyecciones de potencia (ecuación (4.14)):

$$\begin{bmatrix} \Delta \tilde{P}_2 \\ \Delta \tilde{P}_3 \\ \Delta \tilde{P}_4 \\ \Delta \tilde{Q}_2 \\ \Delta \tilde{Q}_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (-0.0100 & -0.0100 & -0.0100 & 0.0100 & 0.0600 & 0.0800) \\ (-0.1000 & -0.1000 & -0.1000 & 0.1000 & 0.1000 & 0.1000) \\ (-0.1500 & -0.1000 & -0.0500 & 0.0500 & 0.1000 & 0.1500) \\ (-0.1000 & -0.0500 & 0 & 0 & 0.0500 & 0.1000) \\ (-0.2000 & -0.1000 & 0 & 0 & 0.0500 & 0.1000) \end{bmatrix}$$

donde el subíndice indica el número de nodo.

Utilizando la ecuación (4.17) se calculan las desviaciones difusas de voltajes y ángulos:

$$\begin{bmatrix} \Delta \tilde{\delta}_2 \\ \Delta \tilde{\delta}_3 \\ \Delta \tilde{\delta}_4 \\ \Delta |\tilde{V}|_2 \\ \Delta |\tilde{V}|_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (-0.0057 & -0.0044 & -0.0031 & 0.0031 & 0.0057 & 0.0076) \\ (-0.0057 & -0.0046 & -0.0034 & 0.0034 & 0.0056 & 0.0072) \\ (-0.0083 & -0.0063 & -0.0042 & 0.0042 & 0.0074 & 0.0100) \\ (-0.0028 & -0.0015 & -0.0002 & 0.0002 & 0.0014 & 0.0024) \\ (-0.0037 & -0.0021 & -0.0004 & 0.0004 & 0.0015 & 0.0026) \end{bmatrix}$$

A estas desviaciones se les agrega su valor medio y se encuentran las variables difusas que representan su función de distribución de posibilidad:

$$\begin{bmatrix} \tilde{\delta}_1 \\ \tilde{\delta}_2 \\ \tilde{\delta}_3 \\ \tilde{\delta}_4 \\ |\tilde{V}|_1 \\ |\tilde{V}|_2 \\ |\tilde{V}|_3 \\ |\tilde{V}|_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0) \\ (-0.0287 & -0.0274 & -0.0260 & -0.0199 & -0.0172 & -0.0153) \\ (-0.0252 & -0.0240 & -0.0228 & -0.0161 & -0.0139 & -0.0122) \\ (-0.0228 & -0.0207 & -0.0187 & -0.0102 & -0.0070 & -0.0045) \\ (1.0000 & 1.0000 & 1.0000 & 1.0000 & 1.0000 & 1.0000) \\ (0.9870 & 0.9884 & 0.9897 & 0.9901 & 0.9913 & 0.9923) \\ (0.9864 & 0.9880 & 0.9897 & 0.9905 & 0.9916 & 0.9927) \\ (1.0000 & 1.0000 & 1.0000 & 1.0000 & 1.0000 & 1.0000) \end{bmatrix}$$

Se puede observar que en los nodos de voltaje controlado siempre se mantiene 1 p.u., este voltaje no tiene incertidumbre; en la figura 4.8 se muestran las funciones de distribución de posibilidad del ángulo y voltaje en el nodo 2.

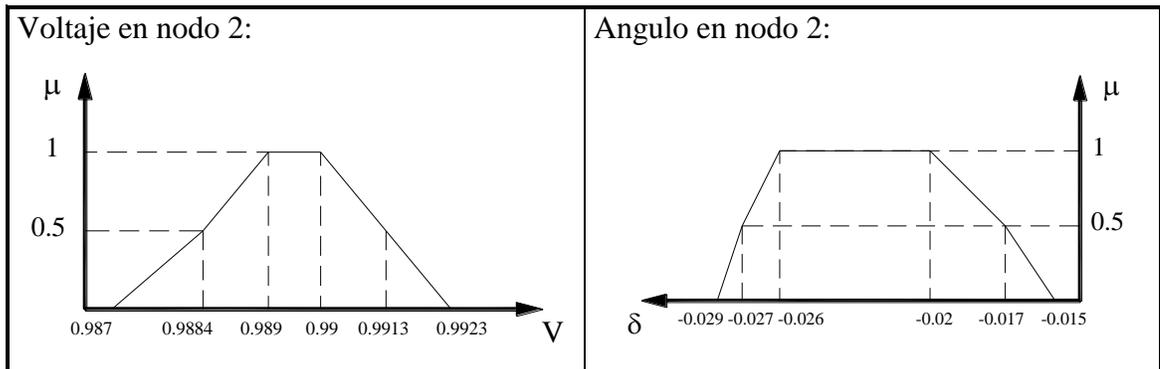


Figura 4.8 Funciones de distribución de posibilidad de voltaje y ángulo en el nodo 2

Utilizando coeficientes de sensibilidad se calculan desviaciones difusas de los flujos de potencia activa:

$$\begin{bmatrix} \Delta \tilde{P}_{1-2} \\ \Delta \tilde{P}_{1-3} \\ \Delta \tilde{P}_{2-3} \\ \Delta \tilde{P}_{2-4} \\ \Delta \tilde{P}_{3-4} \\ \Delta \tilde{P}_{2-1} \\ \Delta \tilde{P}_{3-1} \\ \Delta \tilde{P}_{3-2} \\ \Delta \tilde{P}_{4-2} \\ \Delta \tilde{P}_{4-3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (-0.1387 & -0.1065 & -0.0595 & 0.0595 & 0.0814 & 0.1034) \\ (-0.1982 & -0.1578 & -0.1020 & 0.1020 & 0.1325 & 0.1630) \\ (-0.0488 & -0.0423 & -0.0357 & 0.0357 & 0.0630 & 0.0784) \\ (-0.0933 & -0.0637 & -0.0341 & 0.0341 & 0.0681 & 0.0987) \\ (-0.0901 & -0.0623 & -0.0311 & 0.0311 & 0.0580 & 0.0849) \\ (-0.1353 & -0.1048 & -0.0595 & 0.0595 & 0.0797 & 0.1000) \\ (-0.1982 & -0.1578 & -0.1020 & 0.1020 & 0.1325 & 0.1630) \\ (-0.0481 & -0.0419 & -0.0357 & 0.0357 & 0.0627 & 0.0778) \\ (-0.0933 & -0.0637 & -0.0341 & 0.0341 & 0.0681 & 0.0987) \\ (-0.0901 & -0.0623 & -0.0311 & 0.0311 & 0.0580 & 0.0849) \end{bmatrix}$$

Para la potencia reactiva se tiene:

$$\begin{bmatrix} \Delta \tilde{Q}_{1-2} \\ \Delta \tilde{Q}_{1-3} \\ \Delta \tilde{Q}_{2-3} \\ \Delta \tilde{Q}_{2-4} \\ \Delta \tilde{Q}_{3-4} \\ \Delta \tilde{Q}_{2-1} \\ \Delta \tilde{Q}_{3-1} \\ \Delta \tilde{Q}_{3-2} \\ \Delta \tilde{Q}_{4-2} \\ \Delta \tilde{Q}_{4-3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (-0.0525 & -0.0295 & -0.0065 & 0.0065 & 0.0369 & 0.0667) \\ (-0.0805 & -0.0458 & -0.0112 & 0.0112 & 0.0687 & 0.1245) \\ (-0.0791 & -0.0426 & -0.0052 & 0.0052 & 0.0569 & 0.1086) \\ (-0.1074 & -0.0609 & -0.0144 & 0.0144 & 0.0551 & 0.0937) \\ (-0.0882 & -0.0491 & -0.0100 & 0.0100 & 0.0372 & 0.0628) \\ (-0.0568 & -0.0330 & -0.0092 & 0.0092 & 0.0416 & 0.0726) \\ (-0.0862 & -0.0507 & -0.0152 & 0.0152 & 0.0744 & 0.1312) \\ (-0.0789 & -0.0425 & -0.0053 & 0.0053 & 0.0570 & 0.1087) \\ (-0.1079 & -0.0610 & -0.0140 & 0.0140 & 0.0552 & 0.0940) \\ (-0.0899 & -0.0500 & -0.0101 & 0.0101 & 0.0377 & 0.0637) \end{bmatrix}$$

Una vez obtenidas las desviaciones en flujos de potencia, mediante las ecuaciones (4.28) y (4.29) se calculan las funciones de distribución de posibilidad de los flujos de potencia activa y reactiva:

$$\begin{bmatrix} \tilde{P}_{1-2} \\ \tilde{P}_{1-3} \\ \tilde{P}_{2-3} \\ \tilde{P}_{2-4} \\ \tilde{P}_{3-4} \\ \tilde{P}_{2-1} \\ \tilde{P}_{3-1} \\ \tilde{P}_{3-2} \\ \tilde{P}_{4-2} \\ \tilde{P}_{4-3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (0.3382 & 0.3704 & 0.4175 & 0.5363 & 0.5583 & 0.5803) \\ (0.4424 & 0.4828 & 0.5386 & 0.7425 & 0.7730 & 0.8035) \\ (-0.2130 & -0.2064 & -0.1999 & -0.1285 & -0.1012 & -0.0858) \\ (-0.4146 & -0.3850 & -0.3554 & -0.2873 & -0.2533 & -0.2227) \\ (-0.2173 & -0.1895 & -0.1583 & -0.0961 & -0.0693 & -0.0424) \\ (-0.6114 & -0.5801 & -0.5339 & -0.4151 & -0.3940 & -0.3729) \\ (-0.8352 & -0.7948 & -0.7390 & -0.5351 & -0.5047 & -0.4742) \\ (0.1162 & 0.1224 & 0.1286 & 0.2000 & 0.2270 & 0.2421) \\ (0.2293 & 0.2589 & 0.2885 & 0.3566 & 0.3906 & 0.4212) \\ (0.0373 & 0.0651 & 0.0963 & 0.1585 & 0.1854 & 0.2122) \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} \tilde{Q}_{1-2} \\ \tilde{Q}_{1-3} \\ \tilde{Q}_{2-3} \\ \tilde{Q}_{2-4} \\ \tilde{Q}_{3-4} \\ \tilde{Q}_{2-1} \\ \tilde{Q}_{3-1} \\ \tilde{Q}_{3-2} \\ \tilde{Q}_{4-2} \\ \tilde{Q}_{4-3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (0.0088 & 0.0318 & 0.0548 & 0.0677 & 0.0982 & 0.1280) \\ (0.0368 & 0.0715 & 0.1062 & 0.1285 & 0.1860 & 0.2418) \\ (-0.0599 & -0.0234 & 0.0140 & 0.0243 & 0.0760 & 0.1277) \\ (-0.3762 & -0.3298 & -0.2833 & -0.2545 & -0.2138 & -0.1753) \\ (-0.3674 & -0.3284 & -0.2893 & -0.2693 & -0.2421 & -0.2165) \\ (-0.2070 & -0.1833 & -0.1595 & -0.1410 & -0.1086 & -0.0776) \\ (-0.2649 & -0.2294 & -0.1939 & -0.1634 & -0.1043 & -0.0475) \\ (-0.1209 & -0.0846 & -0.0474 & -0.0368 & 0.0149 & 0.0666) \\ (0.0909 & 0.1378 & 0.1848 & 0.2127 & 0.2539 & 0.2927) \\ (0.0659 & 0.1058 & 0.1458 & 0.1659 & 0.1935 & 0.2195) \end{bmatrix}$$

La figura 4.9 muestra las funciones de distribución de posibilidad del flujo de potencia que va del nodo 1 al nodo 3, tanto activa como reactiva:

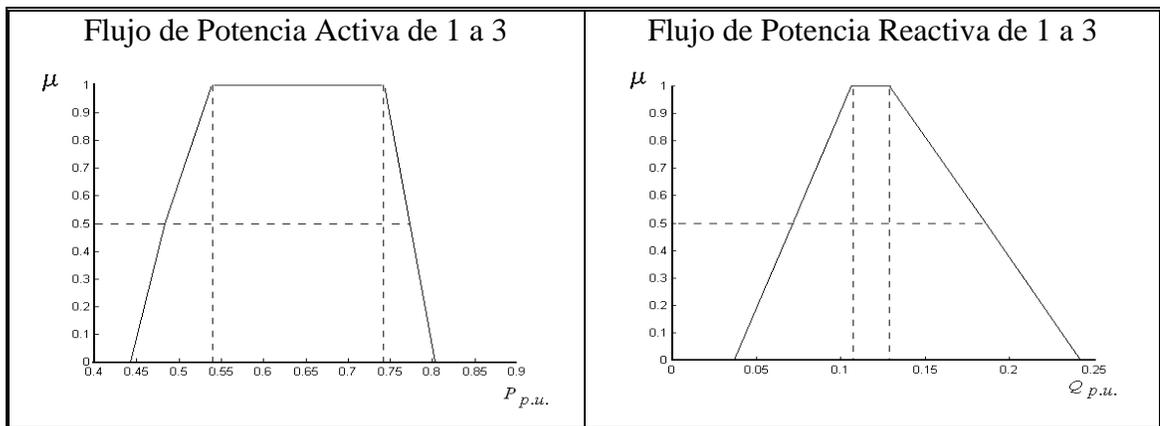


Figura 4.9 Funciones de distribución de posibilidad de flujos de potencia activa y reactiva 1-3

4.6 Expansión de la Herramienta de flujos difusos de C.A.

En la planificación y la operación de los Sistemas Eléctricos de Potencia son de gran importancia los estudios de flujos, ya que permiten analizar posibles escenarios y prever condiciones de riesgo, analizamos en este capítulo las ventajas que ofrece el modelar la incertidumbre en la carga y generación como una variable difusa, permitiendo así analizar varios escenarios posibles con un solo estudio, pero este trabajo se limita a incluir incertidumbre en las inyecciones de potencia activa y reactiva y es conocido que en los estudios de flujos de potencia existen varias fuentes de incertidumbre, algunas con comportamiento no estadístico, que es importante considerar si se quieren cubrir todos los escenarios posibles y agregar valor a los estudios de flujos de potencia.

4.6.1 Modelado de Incertidumbre en la Dependencia del Voltaje de las Cargas [19].

Las cargas en los sistemas eléctricos tienen un comportamiento dependiente del voltaje que regularmente modela utilizando el *modelo exponencial*, ecuación (4.30 y 4.31)

$$P_i = P_{iN} * (V_i/V_{iN})^{np} \quad (4.30)$$

$$Q_i = Q_{iN} * (V_i/V_{iN})^{nq} \quad (4.31)$$

donde:

P_{iN}	Valor nominal de P_i al voltaje nominal V_{iN}
Q_{iN}	Valor nominal de Q_i al voltaje nominal V_{iN} .
np, nq	Coefficientes de dependencia de la carga respecto al voltaje.

En la práctica es extremadamente difícil encontrar los valores exactos para los coeficientes np y nq , pero es relativamente fácil obtener o suponer un rango confiable para estos valores. Modelando este rango como un intervalo es posible obtener conjuntos difusos para P_i y Q_i en cada iteración de la solución del problema de flujos de potencia (dependiendo del valor de V_i) [19], que integren la incertidumbre estadística propia de la carga así como la incertidumbre debida a la dependencia de las cargas respecto al voltaje, modelada mediante los coeficientes np y nq , de tal forma que, a diferencia de los flujos de potencia determinísticos, los valores P_{iN} y Q_{iN} , tendrán su incertidumbre asociada.

4.6.2 Modelado de Incertidumbre en Parámetros del Sistema [19].

Hay múltiples fuentes de incertidumbre para los parámetros del sistema, puede deberse a datos imprecisos en el modelado de la inductancia o en el calculado de la capacitancia, a cambio de parámetros por envejecimiento de los elementos, o incluso a valores de tap de transformadores o elementos en derivación (shunt) erróneos. En la práctica, nunca se van a tener los valores exactos de los parámetros y esto puede llevar a soluciones de flujos de potencia inadecuadas para la toma de decisiones.

Aunque es prácticamente imposible obtener los valores exactos de los parámetros del sistema, es posible deducir un rango en el que los analistas y operadores del sistema tengan la suficiente confianza como para considerar que contienen el parámetro real, partiendo de esto, es posible modelar los parámetros del sistema como una función de distribución de posibilidad, lo que puede ser un conjunto difuso [19].

El algoritmo de solución se modificaría, ya que los valores de $P_{i, calc}$ y $Q_{i, calc}$ (ec. 4.1 y 4.2) que hasta el momento se consideraron *conocidos* serán conjuntos difusos, y habrá que asociarles una incertidumbre, esto implicaría que cada iteración de la solución del problema flujos se realizaría con los valores centrales de estas variables difusas, y en la iteración final obtendrían los vectores de inyecciones P y Q con la incertidumbre asociada a la carga misma y a los parámetros, obteniendo así una solución más confiable que contenga una mayor certidumbre para la toma de decisiones.

CAPÍTULO V

COMPARACIÓN ENTRE ESTUDIOS DE FLUJOS PROBABILÍSTICOS Y ESTUDIOS DE FLUJOS DIFUSOS

5.1 Introducción

Con el fin de validar los algoritmos presentados en los capítulos III y IV se comparan las técnicas utilizadas en esta tesis con métodos de simulación utilizados para modelar la incertidumbre en cargas nodales. Se emplea la técnica de simulación de Montecarlo para representar diferentes modelos de incertidumbre (intervalos simples y funciones de distribución de probabilidad normales) y se comparan los resultados con los flujos de potencia difusos en CA y CD.

5.2 Comparación con simulación de Montecarlo

Para las pruebas se utilizó el sistema mostrado en la figura 5.1, cuyos parámetros se detallan en el apéndice A.1.

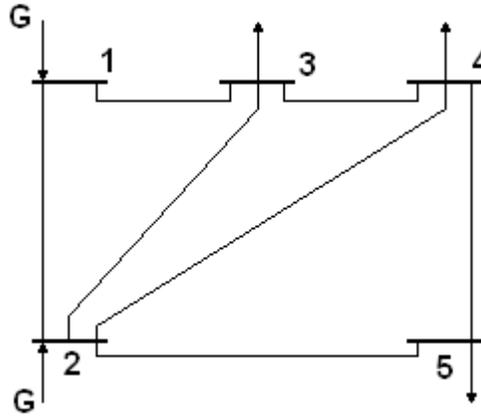


Figura 5.1 Sistema de prueba I.

Las cargas se modelaron con un intervalo de incertidumbre, que es un caso particular de los conjuntos difusos (número difuso rectangular) y los resultados se comparan con los obtenidos mediante la técnica de Montecarlo. Esta técnica consiste en realizar una gran cantidad de estudios de flujos cambiando aleatoriamente las cargas dentro del intervalo establecido. Los valores de las inyecciones nodales se muestran en la tabla 5.1

Tabla 5.1 Valores máximos y mínimos de inyecciones de potencia nodales.

NODO	P_{\min} (p.u.)	P_{\max} (p.u.)
2	0.182	0.218
3	-0.48375	-0.41625
4	-0.436	-0.364
5	-0.6495	-0.5505

Después de 500 iteraciones se obtuvieron los valores máximos y mínimos de ángulos nodales y flujos de potencia en las líneas del sistema de prueba (tablas 5.2 y 5.3).

Tabla 5.2 Valores máximos y mínimos de flujos con 500 iteraciones de Montecarlo.

Líneas	F_{min} (p.u.)	F_{max} (p.u.)
1 – 2	0.7681	0.9451
1 – 3	0.3627	0.4295
2 – 3	0.2248	0.2597
2 – 4	0.2537	0.2932
2 – 5	0.4949	0.5785
3 – 4	0.1501	0.2283
4 – 5	0.0422	0.0839

Tabla 5.3 Valores máximos y mínimos de ángulos nodales con 500 iteraciones de Montecarlo.

Nodo	θ_{\min} (grados)	θ_{\max} (grados)
1	0.00000	0.00000
2	-3.2490	-2.6405
3	-5.9062	-4.9881
4	-6.2655	-5.2848
5	-7.2257	-6.0484

El mismo sistema se resolvió utilizando un algoritmo de flujos difusos de CD (capítulo III); las cargas se modelaron mediante conjuntos rectangulares (intervalos) y los resultados se muestran en las tablas 5.4 y 5.5

Tabla 5.4 Valores máximos y mínimos de flujos de potencia difusos lineales.

Líneas	F_{min} (p.u.)	F_{max} (p.u.)
1 – 2	0.7548	0.9537
1 – 3	0.3579	0.4335
2 – 3	0.2230	0.2627
2 – 4	0.2514	0.2971
2 – 5	0.4927	0.5816
3 – 4	0.1441	0.2330
4 – 5	0.0381	0.0876

Tabla 5.5 Valores máximos y mínimos de ángulos nodales utilizando flujos difusos lineales.

Nodo	θ_{\min} (grados)	θ_{\max} (grados)
1	0.00000	0.00000
2	-3.2787	-2.5949
3	-5.9612	-4.9217
4	-6.3220	-5.2092
5	-7.2702	-5.9897

Si se comparan los resultados se puede observar que la incertidumbre del estudio de flujos difusos es mayor tanto en ángulos nodales como en flujos de potencia, esto es debido a que el estudio difuso contiene en sus resultados todos los valores posibles de ángulos y flujos de potencia, mientras que la técnica de Montecarlo se basa en un gran número de simulaciones pero puede dejar fuera algunos escenarios posibles. A continuación se muestran también los resultados de flujos de potencia y ángulos utilizando Montecarlo, pero forzando la simulación a que solo realice combinaciones aleatorias de valores máximos y mínimos de inyecciones de potencia (500 iteraciones). Los resultados se muestran en las tablas 5.6 y 5.7

Tabla 5.6 Valores máximos y mínimos de flujos mediante Montecarlo utilizando valores extremos.

Líneas	F_{min} (p.u.)	F_{max} (p.u.)
1 – 2	0.7548	0.9537
1 – 3	0.3579	0.4335
2 – 3	0.2230	0.2627
2 – 4	0.2514	0.2971
2 – 5	0.4927	0.5816
3 – 4	0.1441	0.2330
4 – 5	0.0381	0.0876

Tabla 5.7 Valores máximos y mínimos de ángulos mediante Montecarlo utilizando valores extremos.

Nodo	θ_{\min} (grados)	θ_{\max} (grados)
1	0.00000	0.00000
2	-3.2787	-2.5949
3	-5.9612	-4.9217
4	-6.3220	-5.2092
5	-7.2702	-5.9897

Al comparar estos resultados con los obtenidos mediante el estudio de flujos difusos de CD se observa que son exactamente iguales, lo que indica que el estudio difuso es confiable y sus resultados contienen todas las soluciones posibles, con la ventaja que con una iteración se incluyen todos los escenarios.

Considere ahora el sistema de prueba mostrado en la figura 5.2, los parámetros se presentan en el apéndice A.3.

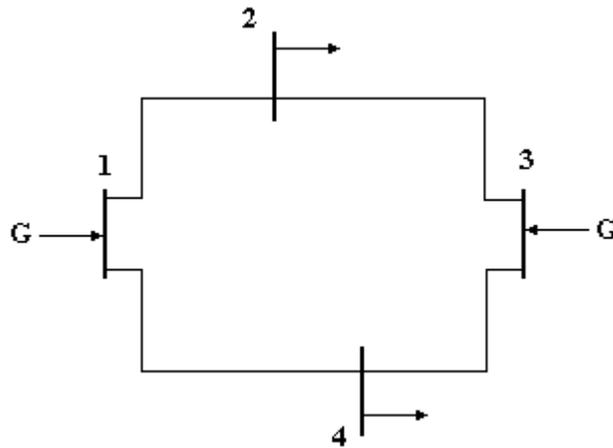


Figura 5.2 Sistema de prueba II.

Las cargas nodales se modelan mediante funciones de distribución de posibilidad trapezoidales (dos cortes α), y los resultados se comparan con los obtenidos utilizando dos veces la técnica de Montecarlo, considerando cada nivel α como un intervalo de incertidumbre (figura 5.3).

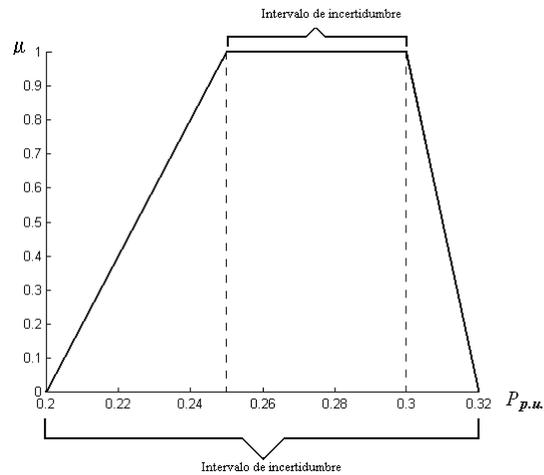


Figura 5.3 Intervalos de incertidumbre de la carga en nodo 2.

Las inyecciones de potencia nodales para el estudio de flujos difusos de CD y para la simulación de Montecarlo se muestran en la tabla 5.8.

Tabla 5.8 Datos de entrada para el estudio de flujos difusos de CD y la simulación de Montecarlo.

NODO	ESTUDIO DE FLUJOS	MONTECARLO	
	DIFUSOS DE CD	INTERVALO 1	INTERVALO 2
	P(p.u.)	P(p.u.)	P(p.u.)
1	(0 0 0 0)	[0 0]	[0 0]
2	(-0.32 -0.3 -0.25 -0.20)	[-0.32 -0.20]	[-0.30 -0.25]
3	(0.15 0.18 0.20 0.22)	[0.15 0.22]	[0.18 0.20]
4	(-0.4 -0.5 -0.55 -0.6)	[-0.4 -0.6]	[-0.5 -0.55]

Las tablas 5.9 y 5.10 muestran la comparación de resultados.

Tabla 5.9 Comparación de ángulos nodales.

NODO	ESTUDIO DE FLUJOS DIFUSOS	MONTECARLO	
	DE CD	INTERVALO 1	INTERVALO 2
	θ (grados)	θ (grados)	θ (grados)
1	(0 0 0 0)	[0 0]	[0 0]
2	(-4.3163 -3.5714 -2.4828 -1.2987)	[-4.3163 -1.2987]	[-3.5714 -2.4828]
3	(-2.8075 -1.9194 -0.8594 0.3438)	[-2.8075 0.3438]	[-1.9194 -0.8594]
4	(-3.3327 -2.9460 -2.5306 -1.8526)	[-3.3327 -1.8526]	[-2.9460 -2.5306]

Tabla 5.10 Comparación de flujos de potencia.

LINEA	ESTUDIO DE FLUJOS	MONTECARLO	
	DIFUSOS DE CD	INTERVALO 1	INTERVALO 2
	F (p.u.)	F (p.u.)	F (p.u.)
1-2	(0.0567 0.1083 0.1558 0.1883)	[0.0567 0.1883]	[0.1083 0.1558]
1-4	(0.3233 0.4417 0.5142 0.5817)	[0.3233 0.5817]	[0.4417 0.5142]
2-3	(-0.1833 -0.1583 -0.1275 -0.0917)	[-0.1833 -0.0917]	[-0.1583 -0.1275]
3-4	(0.0017 0.0317 0.0625 0.0933)	[0.0017 0.0933]	[0.0317 0.0625]

Los resultados obtenidos son iguales, pero el estudio de flujo difuso tiene la ventaja de contener todos los posibles escenarios con una sola iteración.

5.3 Validación de los flujos de potencia difusos de CA con Montecarlo

5.3.1 Comparación modelando la incertidumbre mediante un intervalo

La figura 5.4 representa un sistema real (Subárea de Control Hermosillo, Área de Control Noroeste) con valores de cargas y generaciones nodales típicas. Se supuso una incertidumbre de $\pm 3\%$ en las inyecciones de potencia con una distribución de posibilidad uniforme (intervalo); el sistema se analizó mediante la técnica de Montecarlo y con flujos difusos de CA.

Los parámetros del sistema se detallan en el apéndice A.4.

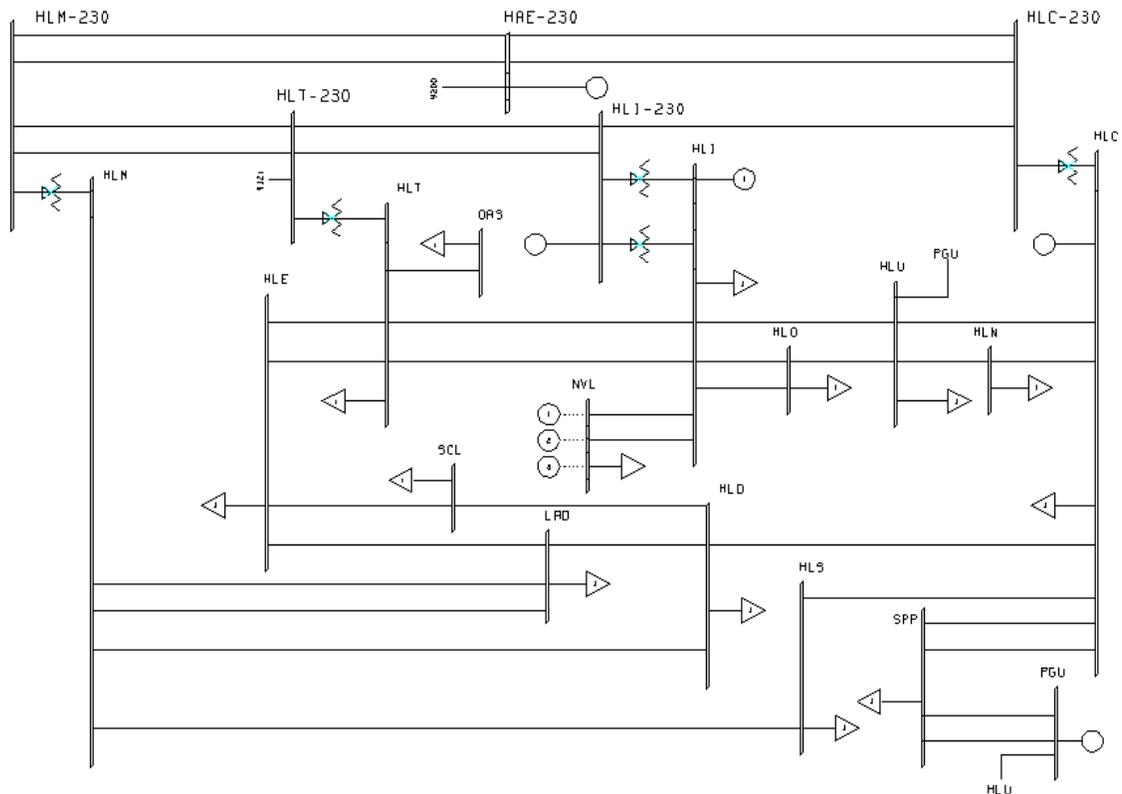


Figura 5.4 Sistema de prueba III, subárea de control Hermosillo, ACNO, CFE.

En la tabla 5.11 se muestran los valores de entrada de cargas y generaciones.

Tabla 5.11 Valores de entrada de inyecciones nodales (P y Q).

NODO	P_{min} (p.u.)	P_{max} (p.u.)	Q_{min} (p.u.)	Q_{max} (p.u.)
HLI-115	0	0	0	0
HLU-115	-0.7622	-0.7178	-0.2163	-0.2037
HLD-115	-0.2369	-0.2231	-0.0702	-0.0662
HLT-115	-0.5871	-0.5529	-0.2060	-0.1940
HLC-115	-0.7416	-0.6984	-0.1957	-0.1843
HLS-115	-0.3090	-0.2910	-0.0927	-0.0873
HLE-115	-0.4841	-0.4559	-0.1133	-0.1067
HLO-115	-0.2472	-0.2328	-0.0927	-0.0873
HLN-115	-0.2369	-0.2231	-0.0618	-0.0582
HLM-115	0	0	0	0
SPP-115	-0.6180	-0.5820	-0.2884	-0.2716
NVL-115	0.5820	0.6180	0	0
LAD-115	-0.1957	-0.1843	-0.0618	-0.0582
SCL-115	-0.2575	-0.2425	-0.0824	-0.0776
URE-115	-0.1030	-0.0970	-0.0206	-0.0194
PGU-115	0.3880	0.4120	0	0
OAS-115	-0.0824	-0.0776	-0.0103	-0.0097
FRH-115	-0.1442	-0.1358	-0.0618	-0.0582
CPN-115	-0.0515	-0.0485	-0.0206	-0.0194
HLC-230	0.2910	0.3090	0	0
HAE-230	2.6675	2.8325	0	0
HLM-230	0	0	0	0
HLT-230	0	0	0	0
HLI-230	0.4850	0.5150	0	0

La tabla 5.12 muestra resultados de ángulos nodales mínimos y máximos de ambos métodos, y se indica además la diferencia entre los dos.

Tabla 5.12 Comparación de resultados entre la simulación de Montecarlo y el estudio de flujo difuso de C.A.

NODO	δ_{\min} (grados) Montecarlo	δ_{\min} (grados) FDCA	Diferencia (grados)	δ_{\max} (grados) Montecarlo	δ_{\max} (grados) FDCA	Diferencia (grados)
HLI-115	0	0	0	0	0	0
HLU-115	-1.4954	-1.5183	0.0229	-1.1173	-1.1115	-0.0061
HLD-115	-0.8537	-0.8594	0.0057	-0.6360	-0.6302	-0.0068
HLT-115	-1.0657	-1.0772	0.0115	-0.7105	-0.7105	-0.0015
HLC-115	-1.1001	-1.1115	0.0115	-0.8365	-0.8308	-0.0046
HLS-115	-1.0714	-1.0829	0.0115	-0.6933	-0.6875	-0.0038
HLE-115	-1.3636	-1.3808	0.0172	-1.0714	-1.0657	-0.0073
HLO-115	-0.7563	-0.7620	0.0057	-0.6016	-0.6016	-0.0004
HLN-115	-1.1345	-1.1459	0.0115	-0.8480	-0.8480	0.0003
HLM-115	-0.8709	-0.8881	0.0172	-0.4985	-0.4927	-0.0066
SPP-115	-2.6413	-2.6528	0.0115	-1.9710	-1.9652	-0.0049
NVL-115	7.2537	7.2537	0	7.7005	7.7005	0.0007
LAD-115	-1.2204	-1.2433	0.0229	-0.8537	-0.8480	-0.0050
SCL-115	-1.5814	-1.6100	0.0286	-1.2147	-1.2089	-0.0037
URE-115	-1.0542	-1.0657	0.0115	-0.8251	-0.8193	-0.0062
PGU-115	1.6272	1.6157	0.0115	2.4236	2.4236	-0.0019
OAS-115	-1.9251	-1.9366	0.0115	-1.6501	-1.6387	-0.0094
FRH-115	-1.7590	-1.7590	0	-1.6444	-1.6444	0.0015
CPN-115	-1.3006	-1.3006	0	-1.2204	-1.2204	-0.0001
HLC-230	0.8537	0.8423	0.0115	1.2376	1.2376	-0.0013
HAE-230	1.3579	1.3464	0.0115	1.7647	1.7704	-0.0036
HLM-230	0.8766	0.8652	0.0115	1.2491	1.2491	-0.0009
HLT-230	0.7334	0.7277	0.0057	1.0600	1.0600	-0.0018
HLI-230	0.7620	0.7563	0.0057	1.0428	1.0428	-0.0020

La tabla 5.13 muestra los resultados de magnitudes de voltajes nodales entre el método de Montecarlo y el estudio de flujo difuso de CA.

Tabla 5.13 Comparación de resultados entre la simulación de Montecarlo y el estudio de flujo difuso de C.A (FDCA).

NODO	V _{min}	V _{min}	Diferencia	V _{max}	V _{max}	Diferencia
	(p.u.) Montecarlo	(p.u.) FDCA	(p.u.) 1.0e-004 *	(p.u.) Montecarlo	(p.u.) FDCA	(p.u.) 1.0e-004 *
HLI-115	1.0000	1.0000	0	1.0000	1.0000	0
HLU-115	0.9905	0.9905	0.1611	0.9913	0.9913	-0.0975
HLD-115	0.9944	0.9944	0.4244	0.9949	0.9949	-0.4314
HLT-115	1.0000	1.0000	0	1.0000	1.0000	0
HLC-115	0.9962	0.9962	-0.3709	0.9966	0.9966	0.0816
HLS-115	0.9954	0.9954	-0.2310	0.9958	0.9958	-0.1783
HLE-115	0.9909	0.9909	-0.3628	0.9917	0.9917	-0.3002
HLO-115	0.9963	0.9963	-0.2511	0.9966	0.9966	-0.0049
HLN-115	0.9966	0.9966	0.2640	0.9969	0.9969	0.4335
HLM-115	0.9953	0.9953	0.2217	0.9958	0.9958	-0.1953
SPP-115	0.9676	0.9676	0.2757	0.9701	0.9701	0.0321
NVL-115	1.0000	1.0000	0	1.0000	1.0000	0
LAD-115	0.9925	0.9925	0.3603	0.9932	0.9932	0.2245
SCL-115	0.9896	0.9895	0.6598	0.9904	0.9904	-0.1707
URE-115	0.9931	0.9931	0.3932	0.9937	0.9937	-0.2808
PGU-115	1.0000	1.0000	0	1.0000	1.0000	0
OAS-115	0.9876	0.9876	-0.0789	0.9887	0.9888	-0.8230
FRH-115	0.9918	0.9918	0.4429	0.9929	0.9929	-0.2582
CPN-115	0.9996	0.9996	-0.0782	1.0004	1.0004	0.1285
HLC-230	0.9995	0.9995	0.0747	0.9996	0.9996	0.2586
HAE-230	1.0000	1.0000	0	1.0000	1.0000	0
HLM-230	0.9988	0.9988	-0.1255	0.9989	0.9989	-0.2039
HLT-230	0.9990	0.9990	-0.3515	0.9991	0.9991	-0.3402
HLI-230	1.0000	1.0000	0	1.0000	1.0000	0

En las tablas 5.14 y 5.15 se comparan resultados de flujos de potencia activa y reactiva, respectivamente.

Tabla 5.14 Comparación de los flujos de potencia activa.

RAMA	F_{\min}	F_{\min}	Diferencia	F_{\max}	F_{\max}	Diferencia
	(p.u.) Montecarlo	(p.u.) FDCA		(p.u.) Montecarlo	(p.u.) FDCA	
1	0.3960	0.3884	0.0076	0.5154	0.5212	-0.0058
2	0.3556	0.3526	0.0030	0.4635	0.4646	-0.0011
3	0.4197	0.4171	0.0026	0.5216	0.5226	-0.0010
4	-0.6036	-0.6036	0.0000	-0.5692	-0.5693	0.0001
5	0.1365	0.1365	0.0000	0.1450	0.1450	0.0000
6	0.0487	0.0487	0.0000	0.0517	0.0517	-0.0000
7	-0.6196	-0.6238	0.0042	-0.4530	-0.4506	-0.0024
8	-0.2459	-0.2475	0.0016	-0.2047	-0.2037	-0.0010
9	-0.5454	-0.5457	0.0003	-0.5086	-0.5085	-0.0001
10	-0.1753	-0.1756	0.0003	-0.1555	-0.1552	-0.0003
11	0.1533	0.1523	0.0010	0.2028	0.2039	-0.0011
12	0.4462	0.4441	0.0021	0.5320	0.5329	-0.0009
13	0.0971	0.0971	0.0000	0.1031	0.1031	0.0000
14	0.0781	0.0781	-0.0000	0.0830	0.0830	-0.0000
15	-0.4670	-0.4674	0.0004	-0.4241	-0.4237	-0.0004
16	0.0585	0.0553	0.0032	0.1233	0.1256	-0.0023
17	-0.0012	-0.0012	0.0000	0.0520	0.0532	-0.0012
18	0.0887	0.0844	0.0043	0.1826	0.1860	-0.0034
19	0.2781	0.2781	0.0000	0.3267	0.3267	0.0000
20	-1.3967	-1.3969	0.0002	-1.3050	-1.3046	-0.0004
21	-0.2770	-0.2792	0.0022	-0.1789	-0.1780	-0.0009
22	0.0430	0.0409	0.0021	0.1441	0.1489	-0.0048
23	-0.0966	-0.0966	0.0000	-0.0810	-0.0809	-0.0001
24	-0.3015	-0.3019	0.0004	-0.2471	-0.2464	-0.0007
25	-0.0725	-0.0725	-0.0000	-0.0365	-0.0361	-0.0004
26	0.0492	0.0491	0.0001	0.0942	0.0949	-0.0007
27	0.3913	0.3907	0.0006	0.4286	0.4300	-0.0014
28	-1.2504	-1.2524	0.0020	-1.1749	-1.1740	-0.0009
29	-0.3127	-0.3128	0.0001	-0.2926	-0.2926	-0.0000
30	-1.1639	-1.1645	0.0006	-1.0692	-1.0684	-0.0008
31	0.0381	0.0367	0.0014	0.0932	0.0946	-0.0014
32	1.5695	1.5683	0.0012	1.6953	1.6963	-0.0010
33	0.3536	0.3513	0.0023	0.4804	0.4832	-0.0028
34	-0.0794	-0.0839	0.0045	0.0244	0.0271	-0.0027

Tabla 5.15 comparación de los flujos de potencia reactiva.

RAMA	F_{q_{min}} (p.u.) Montecarlo	F_{q_{min}} (p.u.) FDCA	Diferencia (p.u.)	F_{q_{max}} (p.u.) Montecarlo	F_{q_{max}} (p.u.) FDCA	Diferencia (p.u.)
1	0.0838	0.0822	0.0016	0.1014	0.1030	-0.0016
2	0.0028	0.0020	0.0008	0.0231	0.0239	-0.0008
3	0.0422	0.0416	0.0006	0.0624	0.0631	-0.0007
4	0.0785	0.0785	0.0000	0.0893	0.0892	0.0001
5	-0.0403	-0.0403	-0.0000	-0.0360	-0.0360	0.0000
6	-0.0382	-0.0382	-0.0000	-0.0368	-0.0368	0.0000
7	0.0030	0.0029	0.0001	0.0056	0.0056	0.0000
8	-0.1366	-0.1375	0.0009	-0.1227	-0.1216	-0.0011
9	-0.1098	-0.1100	0.0002	-0.0979	-0.0974	-0.0005
10	-0.0398	-0.0399	0.0001	-0.0335	-0.0333	-0.0002
11	0.0535	0.0530	0.0005	0.0662	0.0668	-0.0006
12	0.0894	0.0881	0.0013	0.1068	0.1077	-0.0009
13	0.0148	0.0148	0.0000	0.0160	0.0160	-0.0000
14	-0.0159	-0.0159	-0.0000	-0.0151	-0.0151	-0.0000
15	-0.0668	-0.0672	0.0004	-0.0586	-0.0583	-0.0003
16	0.0866	0.0858	0.0008	0.1107	0.1113	-0.0006
17	0.1721	0.1714	0.0007	0.1845	0.1851	-0.0006
18	0.1609	0.1600	0.0009	0.1813	0.1824	-0.0011
19	0.1515	0.1514	0.0001	0.1696	0.1695	0.0001
20	0.0386	0.0385	0.0001	0.0444	0.0445	-0.0001
21	0.0270	0.0256	0.0014	0.0492	0.0500	-0.0008
22	-0.1234	-0.1242	0.0008	-0.1026	-0.1016	-0.0010
23	-0.0050	-0.0050	0.0000	0.0021	0.0021	-0.0000
24	0.0845	0.0841	0.0004	0.0971	0.0972	-0.0001
25	-0.0231	-0.0239	0.0008	-0.0153	-0.0147	-0.0006
26	0.0074	0.0071	0.0003	0.0176	0.0183	-0.0007
27	0.0927	0.0923	0.0004	0.1042	0.1047	-0.0005
28	-0.1227	-0.1233	0.0006	-0.1051	-0.1041	-0.0010
29	-0.0911	-0.0911	-0.0000	-0.0775	-0.0775	0.0000
30	0.0516	0.0515	0.0001	0.0585	0.0586	-0.0001
31	-0.0627	-0.0629	0.0002	-0.0557	-0.0556	-0.0001
32	-0.0480	-0.0496	0.0016	-0.0229	-0.0215	-0.0014
33	-0.1212	-0.1220	0.0008	-0.1051	-0.1040	-0.0011
34	-0.1439	-0.1449	0.0010	-0.1263	-0.1255	-0.0008

Se puede observar en las tablas que las diferencias entre ambos métodos son mínimas, lo que indica que la forma de manejar la incertidumbre mediante conjuntos difusos es adecuada; así, se pueden obtener funciones de distribución de posibilidad confiables de flujos de potencia y voltajes nodales en función de la incertidumbre en las inyecciones de potencia del sistema.

5.3.2 Comparación modelando la incertidumbre mediante una función de distribución de probabilidad normal

En esta sección se consideró una incertidumbre probabilística para las inyecciones de potencia, la cual se modela mediante una función de densidad de probabilidad normal y en el estudio difuso se aproximó mediante variables difusas triangulares, como se muestra en la figura 6.5. Es importante señalar que los conceptos de probabilidad y posibilidad son diferentes, tanto la manera de manipularlos como en su interpretación, por lo que las comparaciones mostradas a continuación son solamente ilustrativas. Con la técnica de Montecarlo se determinaron las funciones de densidad de probabilidad de voltajes y ángulos nodales, así como de los flujos en las líneas.

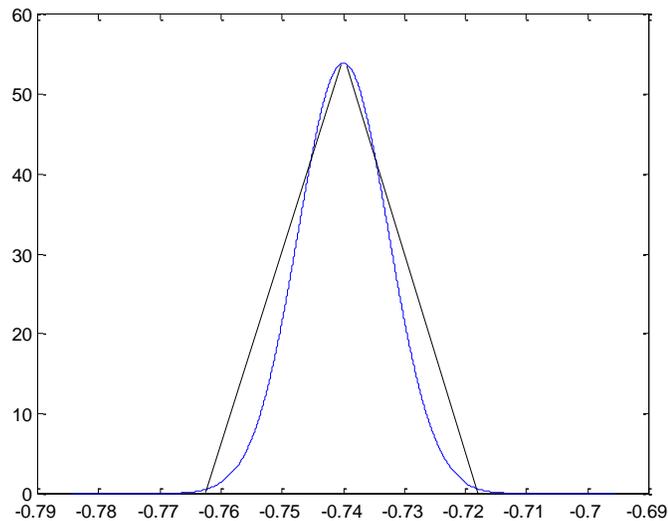


Figura 5.5 Aproximación de variable difusa a campana de Gauss.

Los datos de entrada para la simulación de Montecarlo (media y desviación estándar) se muestran en la tabla 5.16

Tabla 5.16 Datos de entrada para simulación de Montecarlo.

NODO	Pm (p.u.)	σ (p.u.)	Qm (p.u.)	σ (p.u.)
HLI-115	0	0	0	0
HLU-115	-0.74	0.0074	-0.21	0.0021
HLD-115	-0.23	0.0023	-0.0682	0.000682
HLT-115	-0.57	0.0057	-0.2	0.002
HLC-115	-0.72	0.0072	-0.19	0.0019
HLS-115	-0.3	0.003	-0.09	0.0009
HLE-115	-0.47	0.0047	-0.11	0.0011
HLO-115	-0.24	0.0024	-0.09	0.0009
HLN-115	-0.23	0.0023	-0.06	0.0006
HLM-115	0	0	0	0
SPP-115	-0.6	0.006	-0.28	0.0028
NVL-115	0.6	0.006	0	0
LAD-115	-0.19	0.0019	-0.06	0.0006
SCL-115	-0.25	0.0025	-0.08	0.0008
URE-115	-0.1	0.001	-0.02	0.0002
PGU-115	0.4	0.004	0	0
OAS-115	-0.08	0.0008	-0.01	0.0001
FRH-115	-0.14	0.0014	-0.06	0.0006
CPN-115	-0.05	0.0005	-0.02	0.0002
HLC-230	0.3	0.003	0	0
HAE-230	2.75	0.0275	0	0
HLM-230	0	0	0	0
HLT-230	0	0	0	0
HLI-230	0.5	0.005	0	0

La desviación estándar se determinó de forma que 3σ sea igual a un intervalo de incertidumbre de 3%, y con este valor de variación se eligieron los valores máximos y mínimos de entrada de los números difusos, esto se muestra en la tabla 5.17.

Tabla 5.17 Datos de entrada utilizados en el estudio difuso.

NODO	POTENCIA ACTIVA				POTENCIA REACTIVA			
	(p.u.)				(p.u.)			
HLI-115	0	0	0	0	0	0	0	0
HLU-115	-0.7622	-0.74	-0.74	-0.7178	-0.2163	-0.21	-0.21	-0.2037
HLD-115	-0.2369	-0.23	-0.23	-0.2231	-0.0702	-0.0682	-0.0682	-0.0662
HLT-115	-0.5871	-0.57	-0.57	-0.5529	-0.206	-0.2	-0.2	-0.194
HLC-115	-0.7416	-0.72	-0.72	-0.6984	-0.1957	-0.19	-0.19	-0.1843
HLS-115	-0.309	-0.3	-0.3	-0.291	-0.0927	-0.09	-0.09	-0.0873
HLE-115	-0.4841	-0.47	-0.47	-0.4559	-0.1133	-0.11	-0.11	-0.1067
HLO-115	-0.2472	-0.24	-0.24	-0.2328	-0.0927	-0.09	-0.09	-0.0873
HLN-115	-0.2369	-0.23	-0.23	-0.2231	-0.0618	-0.06	-0.06	-0.0582
HLM-115	0	0	0	0	0	0	0	0
SPP-115	-0.618	-0.6	-0.6	-0.582	-0.2884	-0.28	-0.28	-0.2716
NVL-115	0.582	0.6	0.6	0.618	0	0	0	0
LAD-115	-0.1957	-0.19	-0.19	-0.1843	-0.0618	-0.06	-0.06	-0.0582
SCL-115	-0.2575	-0.25	-0.25	-0.2425	-0.0824	-0.08	-0.08	-0.0776
URE-115	-0.103	-0.1	-0.1	-0.097	-0.0206	-0.02	-0.02	-0.0194
PGU-115	0.388	0.4	0.4	0.412	0	0	0	0
OAS-115	-0.0824	-0.08	-0.08	-0.0776	-0.0103	-0.01	-0.01	-0.0097
FRH-115	-0.1442	-0.14	-0.14	-0.1358	-0.0618	-0.06	-0.06	-0.0582
CPN-115	-0.0515	-0.05	-0.05	-0.0485	-0.0206	-0.02	-0.02	-0.0194
HLC-230	0.291	0.3	0.3	0.309	0	0	0	0
HAE-230	2.6675	2.75	2.75	2.8325	0	0	0	0
HLM-230	0	0	0	0	0	0	0	0
HLT-230	0	0	0	0	0	0	0	0
HLI-230	0.485	0.5	0.5	0.515	0	0	0	0

Las inyecciones de potencia se modelaron con números difusos triangulares, es por esto que los valores medios que los representan son iguales.

Los ángulos resultantes, tanto de la simulación de Montecarlo (valor medio y desviación estándar) como del estudio difuso (valor mínimo, medio y máximo) se muestran en la tabla 5.18.

Tabla 5.18 Resultados de ángulos nodales.

NODO	MONTECARLO		FDCA		
	δ_m (p.u.)	δ_σ (p.u.)	δ_{med} (p.u.)	δ_{min} (p.u.)	δ_{max} (p.u.)
HLI-115	0.000000	0.000000	0	0	0
HLU-115	-0.022953	0.000439	-0.0229	-0.0265	-0.0194
HLD-115	-0.013018	0.000247	-0.013	-0.015	-0.011
HLT-115	-0.015619	0.000399	-0.0156	-0.0188	-0.0124
HLC-115	-0.016947	0.000285	-0.0169	-0.0194	-0.0145
HLS-115	-0.015488	0.000432	-0.0155	-0.0189	-0.012
HLE-115	-0.021336	0.000334	-0.0213	-0.0241	-0.0186
HLO-115	-0.011912	0.000162	-0.0119	-0.0133	-0.0105
HLN-115	-0.017395	0.000305	-0.0174	-0.02	-0.0148
HLM-115	-0.012039	0.000445	-0.012	-0.0155	-0.0086
SPP-115	-0.040305	0.000906	-0.0403	-0.0463	-0.0343
NVL-115	0.130551	0.001338	0.1305	0.1266	0.1344
LAD-115	-0.018250	0.000428	-0.0182	-0.0217	-0.0148
SCL-115	-0.024620	0.000422	-0.0246	-0.0281	-0.0211
URE-115	-0.016440	0.000252	-0.0164	-0.0186	-0.0143
PGU-115	0.035265	0.001173	0.0353	0.0282	0.0423
OAS-115	-0.031231	0.000339	-0.0312	-0.0338	-0.0286
FRH-115	-0.029687	0.000316	-0.0297	-0.0307	-0.0287
CPN-115	-0.021983	0.000219	-0.022	-0.0227	-0.0213
HLC-230	0.018152	0.000535	0.0182	0.0147	0.0216
HAE-230	0.027182	0.000617	0.0272	0.0235	0.0309
HLM-230	0.018448	0.000532	0.0185	0.0151	0.0218
HLT-230	0.015579	0.000454	0.0156	0.0127	0.0185
HLI-230	0.015691	0.000384	0.0157	0.0132	0.0182

La tabla 5.19 muestra los resultados de la magnitud de voltajes nodales.

Tabla 5.19 Resultados de voltajes nodales.

NODO	MONTECARLO		FDCA		
	Vm (p.u.)	Vs (p.u.)	Vmed (p.u.)	Vmin (p.u.)	Vmax (p.u.)
HLI-115	1.000000	0.000000	1.000000	1.000000	1.000000
HLU-115	0.990900	0.000048	0.990900	0.990500	0.991300
HLD-115	0.994654	0.000027	0.994700	0.994400	0.994900
HLT-115	1.000000	0.000000	1.000000	1.000000	1.000000
HLC-115	0.996414	0.000022	0.996400	0.996200	0.996600
HLS-115	0.995622	0.000021	0.995600	0.995400	0.995800
HLE-115	0.991338	0.000040	0.991300	0.990900	0.991700
HLO-115	0.996464	0.000019	0.996500	0.996300	0.996600
HLN-115	0.996715	0.000018	0.996700	0.996600	0.996900
HLM-115	0.995551	0.000027	0.995500	0.995300	0.995800
SPP-115	0.968854	0.000304	0.968800	0.967600	0.970100
NVL-115	1.000000	0.000000	1.000000	1.000000	1.000000
LAD-115	0.992824	0.000035	0.992800	0.992500	0.993200
SCL-115	0.989980	0.000048	0.990000	0.989500	0.990400
URE-115	0.993398	0.000030	0.993400	0.993100	0.993700
PGU-115	1.000000	0.000000	1.000000	1.000000	1.000000
OAS-115	0.988202	0.000084	0.988200	0.987600	0.988800
FRH-115	0.992339	0.000147	0.992300	0.991800	0.992900
CPN-115	0.999997	0.000097	1.000000	0.999600	1.000400
HLC-230	0.999533	0.000007	0.999500	0.999500	0.999600
HAE-230	1.000000	0.000000	1.000000	1.000000	1.000000
HLM-230	0.998866	0.000005	0.998900	0.998800	0.998900
HLT-230	0.999084	0.000004	0.999100	0.999000	0.999100
HLI-230	1.000000	0.000000	1.000000	1.000000	1.000000

Los resultados de los flujos de potencia, tanto activa como reactiva, se muestran en las tablas 5.20 y 5.21, respectivamente.

Tabla 5.20 Resultados de flujos de potencia activa.

RAMA	MONTECARLO		FDCA		
	Fm (p.u.)	Fs (p.u.)	Fmed (p.u.)	Fmin (p.u.)	Fmax (p.u.)
1	0.454313	0.007976	0.454800	0.388400	0.521200
2	0.408225	0.006609	0.408600	0.352600	0.464600
3	0.469523	0.006049	0.469800	0.417100	0.522600
4	-0.586559	0.005693	-0.586500	-0.603600	-0.569300
5	0.140711	0.001440	0.140700	0.136500	0.145000
6	0.050196	0.000516	0.050200	0.048700	0.051700
7	-0.537957	0.012952	-0.537200	-0.623800	-0.450600
8	-0.225647	0.002635	-0.225600	-0.247500	-0.203700
9	-0.527267	0.003131	-0.527100	-0.545700	-0.508500
10	-0.165437	0.001631	-0.165400	-0.175600	-0.155200
11	0.178249	0.002981	0.178100	0.152300	0.203900
12	0.488325	0.005040	0.488500	0.444100	0.532900
13	0.100048	0.001037	0.100100	0.097100	0.103100
14	0.080561	0.000838	0.080600	0.078100	0.083000
15	-0.445722	0.003595	-0.445500	-0.467400	-0.423700
16	0.090744	0.004305	0.090400	0.055300	0.125600
17	0.025886	0.002879	0.026000	-0.001200	0.053200
18	0.135664	0.006172	0.135200	0.084400	0.186000
19	0.302232	0.005974	0.302400	0.278100	0.326700
20	-1.351101	0.007617	-1.350800	-1.396900	-1.304600
21	-0.228201	0.005814	-0.228600	-0.279200	-0.178000
22	0.094380	0.006455	0.094900	0.040900	0.148900
23	-0.088827	0.001632	-0.088800	-0.096600	-0.080900
24	-0.274183	0.003058	-0.274200	-0.301900	-0.246400
25	-0.054385	0.002068	-0.054300	-0.072500	-0.036100
26	0.071927	0.002606	0.072000	0.049100	0.094900
27	0.410477	0.002399	0.410300	0.390700	0.430000
28	-1.213484	0.005658	-1.213200	-1.252400	-1.174000
29	-0.302687	0.002336	-0.302700	-0.312800	-0.292600
30	-1.117045	0.011228	-1.116400	-1.164500	-1.068400
31	0.065971	0.004310	0.065700	0.036700	0.094600
32	1.633412	0.016404	1.632300	1.568300	1.696300
33	0.418076	0.011785	0.417300	0.351300	0.483200
34	-0.027804	0.008495	-0.028400	-0.083900	0.027100

Tabla 5.21 Resultados de flujos de potencia reactiva.

RAMA	MONTECARLO		FDCA		
	Fq _m (p.u.)	Fq _s (p.u.)	Fq _{med} (p.u.)	Fq _{min} (p.u.)	Fq _{max} (p.u.)
1	0.092549	0.001239	0.092600	0.082200	0.103000
2	0.013053	0.001178	0.013000	0.002000	0.023900
3	0.052422	0.001176	0.052400	0.041600	0.063100
4	0.083878	0.001783	0.083800	0.078500	0.089200
5	-0.038167	0.000655	-0.038200	-0.040300	-0.036000
6	-0.037494	0.000211	-0.037500	-0.038200	-0.036800
7	0.004232	0.000204	0.004200	0.002900	0.005600
8	-0.129477	0.001041	-0.129600	-0.137500	-0.121600
9	-0.103651	0.000953	-0.103700	-0.110000	-0.097400
10	-0.036593	0.000488	-0.036600	-0.039900	-0.033300
11	0.059873	0.000868	0.059900	0.053000	0.066800
12	0.097946	0.001088	0.097900	0.088100	0.107700
13	0.015412	0.000234	0.015400	0.014800	0.016000
14	-0.015490	0.000225	-0.015500	-0.015900	-0.015100
15	-0.062681	0.000436	-0.062800	-0.067200	-0.058300
16	0.098486	0.001626	0.098600	0.085800	0.111300
17	0.178208	0.000835	0.178300	0.171400	0.185100
18	0.171141	0.001307	0.171200	0.160000	0.182400
19	0.160388	0.002585	0.160500	0.151400	0.169500
20	0.041557	0.000499	0.041500	0.038500	0.044500
21	0.037698	0.001260	0.037800	0.025600	0.050000
22	-0.112915	0.001610	-0.112900	-0.124200	-0.101600
23	-0.001437	0.000738	-0.001500	-0.005000	0.002100
24	0.090582	0.000918	0.090700	0.084100	0.097200
25	-0.019268	0.000472	-0.019300	-0.023900	-0.014700
26	0.012705	0.000613	0.012700	0.007100	0.018300
27	0.098436	0.000666	0.098500	0.092300	0.104700
28	-0.113545	0.000984	-0.113700	-0.123300	-0.104100
29	-0.084237	0.001277	-0.084300	-0.091100	-0.077500
30	0.054975	0.000948	0.055100	0.051500	0.058600
31	-0.059288	0.000675	-0.059200	-0.062900	-0.055600
32	-0.035544	0.001824	-0.035500	-0.049600	-0.021500
33	-0.113118	0.001523	-0.113000	-0.122000	-0.104000
34	-0.135329	0.001489	-0.135200	-0.144900	-0.125500

Las figuras 5.6 y 5.7 muestran gráficamente la comparación de resultados para el flujo de potencia activa y reactiva en la rama 20 (flujo entre HLC-230 y HLC-115) entre el FDCA y los flujos probabilísticos modelados mediante la técnica de Montecarlo.

Se puede notar una mayor incertidumbre en el estudio difuso, esto es debido a que la metodología contiene en su conjunto resultante todos los valores de flujos posibles, mientras que la distribución Gaussiana muestra la distribución de probabilidad del resultado.

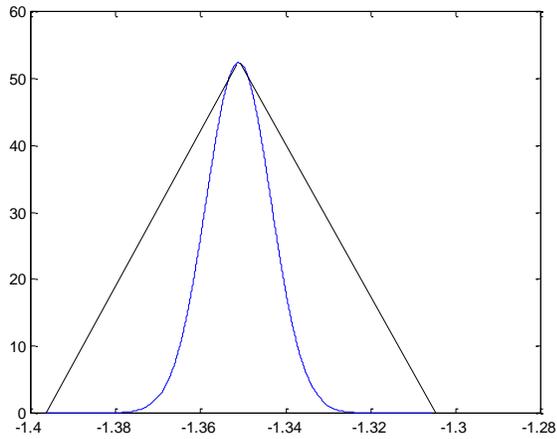


Figura 5.6 Comparación de flujos probabilísticos con el estudio difuso para la potencia activa en la rama 20.

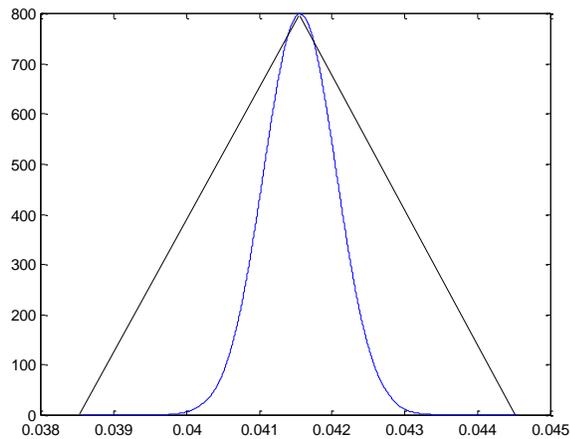


Figura 5.7 Comparación de flujos probabilísticos con el estudio difuso para la potencia reactiva en la rama 20.

Considere ahora el sistema de prueba IV, los parámetros se detallan en el apéndice A.5.

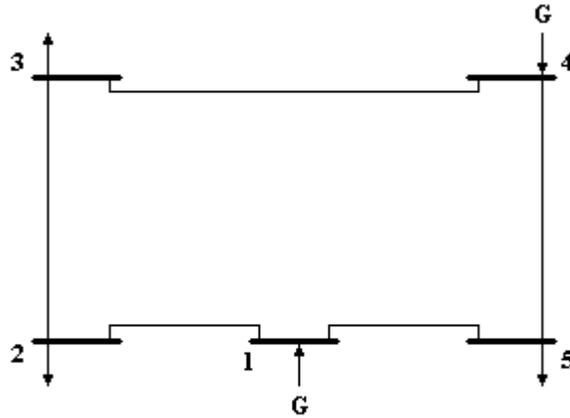


Figura 5.8 Sistema de prueba IV

La incertidumbre en la carga se modela con una distribución de probabilidad normal y se aproxima con una variable difusa de tres cortes α , como se indica en la figura 5.9.

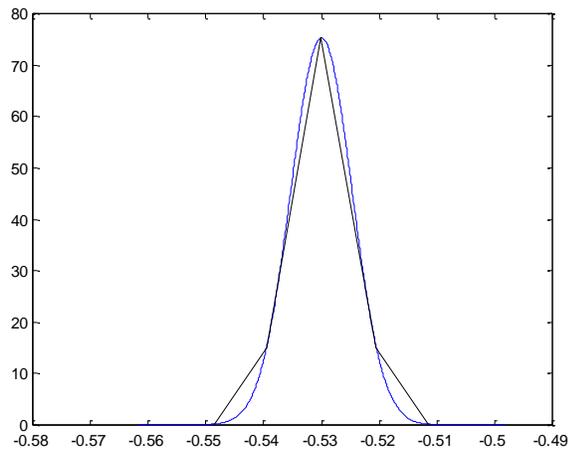


Figura 5.9 Aproximación a una distribución de probabilidad normal mediante una variable difusa de tres cortes α .

Los datos de entrada para la simulación de Montecarlo se muestran en la tabla 5.22:

Tabla 5.22 Valores medios y desviación estándar de los datos de entrada para la simulación de Montecarlo.

NODO	P_m (p.u.)	P_σ (p.u.)	Q_m (p.u.)	Q_σ (p.u.)
1	0	0	0	0
2	-0.53	-0.0053	-0.18	-0.0018
3	-0.30	-0.0030	-0.10	-0.0010
4	0.42	0.0042	0	0
5	-0.48	-0.0048	-0.15	-0.0015

Las variables difusas de entrada para el estudio de flujos difusos de C.A. se muestran en la tabla 5.23.

Tabla 5.23 Variables difusas de entrada utilizadas en el estudio de flujos difusos de C.A.

NODO	POTENCIA ACTIVA (p.u.)	POTENCIA REACTIVA (p.u.)
1	(0.00 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00)	(0.00 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00)
2	(-0.548 -0.539 -0.530 -0.530 -0.520 -0.511)	(-0.1863 -0.1832 -0.18 -0.18 -0.1768 -0.1737)
3	(-0.310 -0.3054 -0.3 -0.3 -0.2946 -0.2895)	(-0.1035 -0.1018 -0.1 -0.1 -0.0982 -0.0965)
4	(0.4053 0.4125 0.42 0.42 0.4275 0.4347)	(0.00 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00)
5	(-0.497 -0.4886 -0.48 -0.48 -0.4714 -0.463)	(-0.1553 -0.1527 -0.15 -0.15 -0.1473 -0.1447)

La simulación de Montecarlo arrojó los voltajes y ángulos nodales mostrados en la tabla 5.24

Tabla 5.24 Valores medios y desviación estándar de voltajes y ángulos nodales obtenidos por Montecarlo.

NODO	V_m (p.u.)	V_σ (p.u.)	δ_m (grados)	δ_σ (grados)
1	1.0000	0.0000000	0.0000000	0.0000000
2	1.0424	0.0000538	-1.6404417209	0.0131473267
3	1.0655	0.0000380	-1.7335123781	0.0141740079
4	1.1000	0.0000000	-1.4248916990	0.0144489240
5	1.0586	0.0000282	-1.3210469292	0.0118884382

En la tabla 5.25 se muestran los resultados de los flujos de potencia activa y reactiva:

Tabla 5.25 Flujos de potencia activa y reactiva (valor medio y desviación estándar) obtenidos por Montecarlo.

NODO ENVIO	NODO RECEPCION	F_m (p.u.)	F_σ (p.u.)	Fq_m (p.u.)	Fq_σ (p.u.)
1	2	0.5079	0.0047	-0.9048	0.0011
1	5	0.4085	0.0049	-1.3478	0.0007
2	3	-0.0273	0.0035	-1.1057	0.0010
3	4	-0.3297	0.0033	-1.2032	0.0013
4	5	0.0861	0.0038	1.6065	0.0012

El estudio de flujos difusos de C.A. arrojó los resultados mostrados en las tablas 5.26, 5.27 y 5.28, para voltajes, ángulos y flujos de potencia, respectivamente.

Tabla 5.26 Variables difusas de voltajes y ángulos nodales.

NODO	VOLTAJE (p.u.)	ANGULO (grados)
1	(1.000 1.000 1.000 1.000 1.000 1.000)	(0 0 0 0 0 0)
2	(1.0421 1.0422 1.0424 1.0424 1.0425 1.0427)	(-1.7237 -1.6833 -1.6407 -1.6407 -1.5982 -1.5578)
3	(1.0653 1.0654 1.0655 1.0655 1.0656 1.0657)	(-1.8293 -1.7827 -1.7338 -1.7338 -1.6848 -1.6382)
4	(1.1000 1.1000 1.1000 1.1000 1.1000 1.1000)	(-1.5212 -1.4743 -1.4250 -1.4250 -1.3757 -1.3288)
5	(1.0585 1.0586 1.0586 1.0586 1.0587 1.0588)	(-1.3978 -1.3604 -1.3211 -1.3211 -1.2819 -1.2445)

Tabla 5.27 Variables difusas de flujo de potencia activa.

NODO ENVIO	NODO RECEPCION	FLUJO DE POTENCIA ACTIVA
1	2	(0.4782 0.4927 0.5079 0.5079 0.5232 0.5377)
1	5	(0.3775 0.3927 0.4086 0.4086 0.4246 0.4398)
2	3	(-0.0495 -0.0387 -0.0273 -0.0273 -0.0159 -0.0051)
3	4	(-0.3503 -0.3403 -0.3297 -0.3297 -0.3192 -0.3091)
4	5	(0.0631 0.0744 0.0862 0.0862 0.0981 0.1094)

Tabla 5.28 Variables difusas de flujo de potencia reactiva.

NODO ENVIO	NODO RECEPCION	FLUJO DE POTENCIA REACTIVA
1	2	(-0.9095 -0.9071 -0.9047 -0.9047 -0.9022 -0.8998)
1	5	(-1.3512 -1.3495 -1.3478 -1.3478 -1.3460 -1.3443)
2	3	(-1.1119 -1.1089 -1.1058 -1.1058 -1.1028 -1.0998)
3	4	(-1.2110 -1.2072 -1.2034 -1.2034 -1.1995 -1.1958)
4	5	(1.6002 1.6033 1.6066 1.6066 1.6098 1.6130)

En las figuras 5.10 y 5.11 se muestra una comparación gráfica de resultados obtenidos.

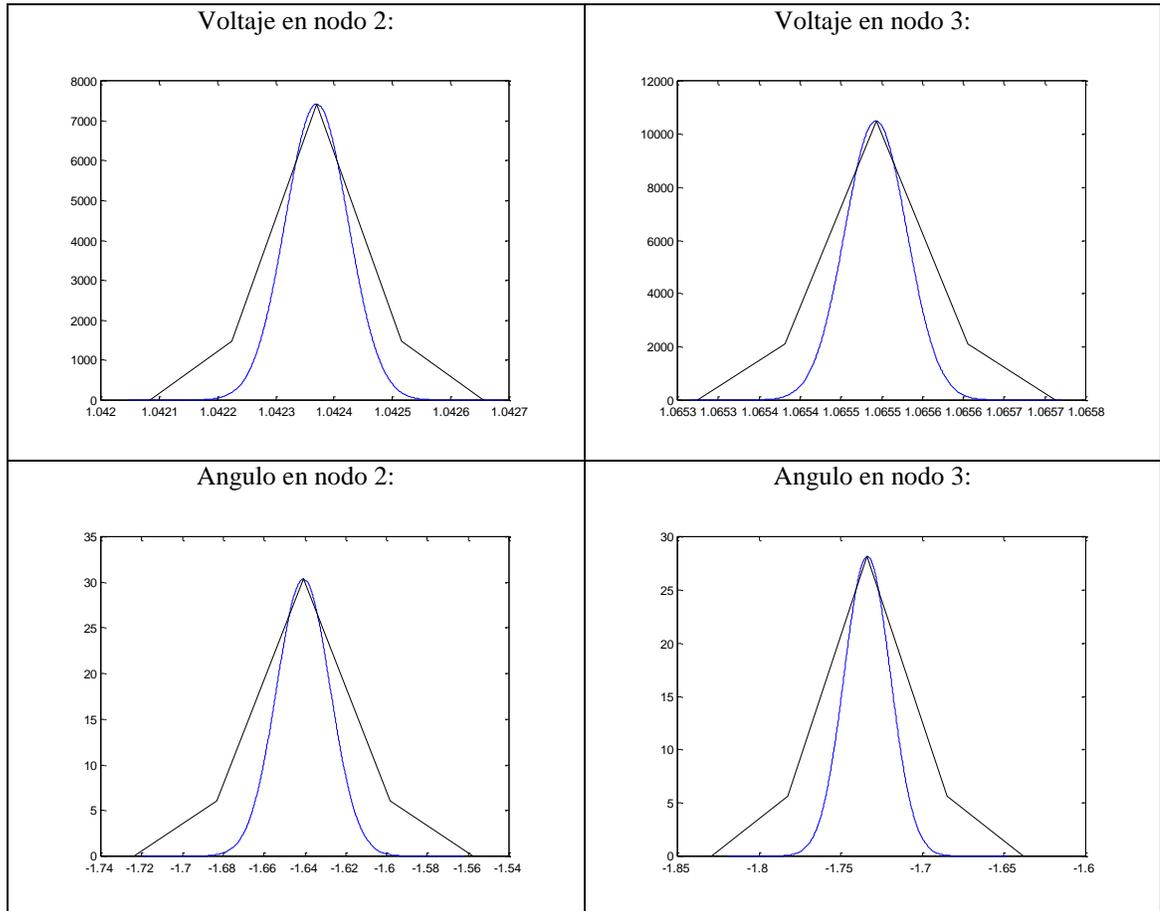


Figura 5.10 Comparación de resultados en voltajes y ángulos nodales.

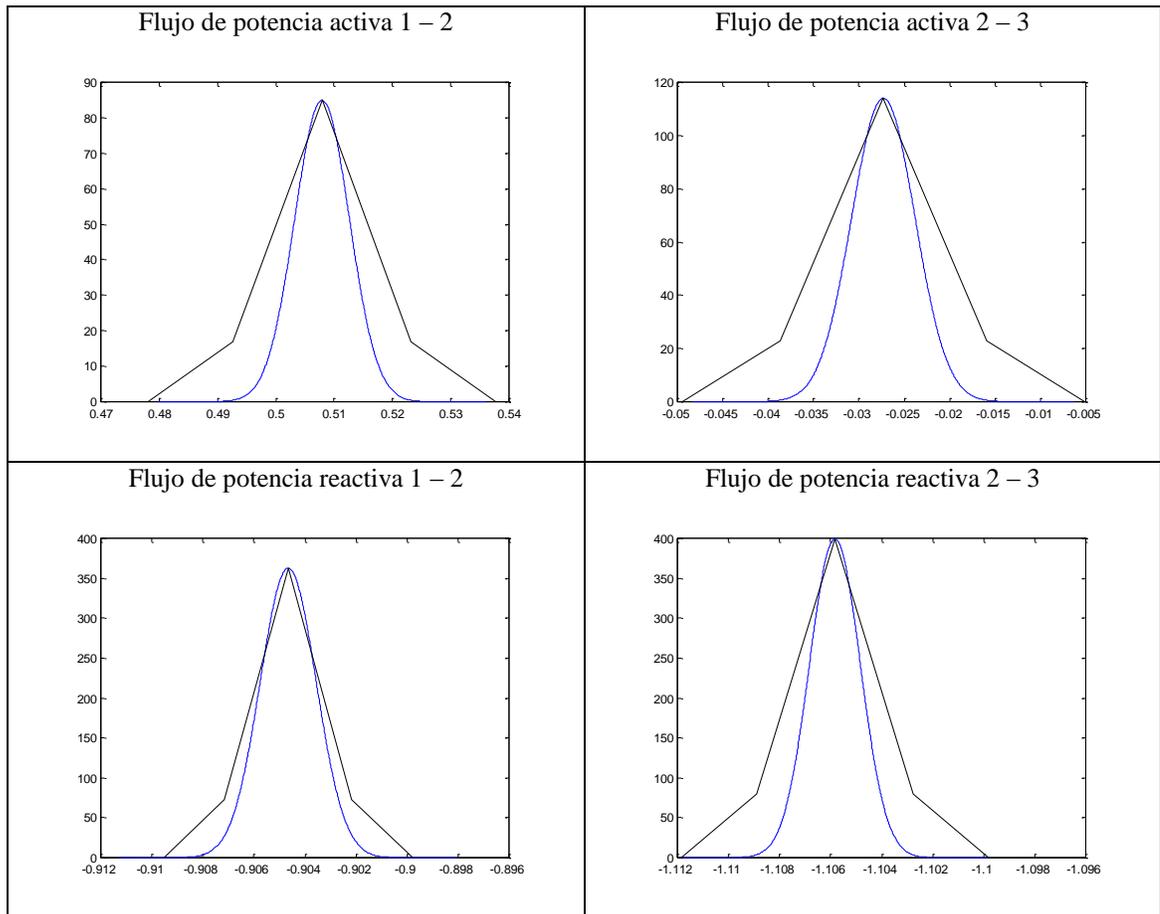


Figura 5.11 Comparación de resultados en flujos de potencia.

Se observa una mejor aproximación de la variable difusa en los resultados, esto es porque los datos de entrada se aproximaron de una forma más exacta a las funciones de distribución de probabilidad.

CAPÍTULO VI

FLUJOS ÓPTIMOS DIFUSOS DE C.D.

6.1 Introducción.

En los capítulos anteriores se presentó la manera de incluir la incertidumbre de carga y generación en estudios de flujos de potencia modelando dicha incertidumbre mediante funciones de distribución de posibilidad. En este capítulo se presenta una primera aproximación para la solución del despacho económico de unidades generadoras considerando la incertidumbre en las cargas y su efecto en la incertidumbre del costo del despacho [10,12,13,18].

Esta metodología busca obtener funciones de distribución de posibilidad óptimas de generadores y de flujos en las líneas. En ambos casos las distribuciones serán función de la incertidumbre en la carga, de las restricciones en las líneas y de los costos de generación.

6.2 Metodología analizada

La metodología presentada se basa en la solución lineal de flujos (flujos difusos lineales, capítulo III), donde:

$$\tilde{\theta} = Y^{-1} \tilde{P}$$
$$\tilde{F}_{k-l} = \sum_{n=1}^n (C_{kl/n}) \tilde{P}_n$$

6.2.1 Modelado de generadores

Se utilizan funciones de costo lineales en los generadores; en caso que las funciones de costo sean no lineales, éstas se descomponen en 2 o más secciones lineales, es decir, los generadores se representan por un número de generadores ficticios con un costo incremental constante.

6.2.2 Función objetivo

El objetivo de los flujos óptimos difusos es minimizar el costo de la energía producida para satisfacer la carga en el sistema que incluye la incertidumbre representada por una función de distribución de posibilidad, esto se describe en la ecuación (6.1):

$$f(G) = \sum_{i=1}^{ng} a_i \cdot \tilde{G}_i \quad (6.1)$$

donde:

- $f(G)$ Valor de la función objetivo;
- ng Número de generadores;
- a_i Costo incremental de generador i ;
- \tilde{G}_i Generación difusa en el bus i .

Cabe mencionar que debido a la naturaleza de la carga (con incertidumbre) se obtendrá una función de distribución de posibilidad de costo.

6.2.3 Restricciones operacionales

Como en la formulación lineal no se consideran pérdidas en la transmisión de energía, la carga con su incertidumbre debe ser igual a la generación, la cual tendrá, en consecuencia, una incertidumbre asociada. Considerando lo anterior, se tiene la siguiente ecuación de balance de potencia:

$$\sum_{i=1}^{ng} \tilde{G}_i = \sum_{j=1}^n \tilde{C}_j \quad (6.2)$$

donde:

- \tilde{C}_j Función de distribución de posibilidad de la carga en el nodo j
- n Número de nodos

La ecuación (6.2) se puede descomponer en varias ecuaciones algebraicas, dependiendo de la cantidad de cortes α con que se represente la carga. Para una variable difusa trapezoidal (con 2 niveles α , 0 y 1) representada por 4 valores o puntos de quiebre (a_1, a_2, a_3, a_4) se tendrán 4 ecuaciones algebraicas:

$$\sum_{i=1}^{ng} \tilde{G}_{ik} = \sum_{j=1}^n \tilde{C}_{jk} \quad k=1,\dots,4 \quad (6.3)$$

Además existen restricciones relacionadas a los generadores, las cuales son necesarias para asegurar que las funciones de distribución de posibilidad mantengan su naturaleza incremental y que los generadores no se salgan de sus límites máximos y mínimos de generación; el número de estas restricciones también dependerá de la

cantidad de cortes α con los que se represente la carga, para funciones de distribución de posibilidad trapezoidales se tiene:

$$G_{i\min} \leq G_{i1} \leq G_{i2} \leq G_{i3} \leq G_{i4} \leq G_{i\max} \quad (6.4)$$

donde:

- $G_{i\min}$ Límite inferior de generación para el generador i .
- $G_{i\max}$ Límite superior de generación para el generador i .
- $G_{i1} \dots G_{i4}$ Puntos de quiebre que representan a la variable difusa.

6.2.4 Restricciones de seguridad

Las restricciones de seguridad se incluyen para evitar que los valores máximos y mínimos de ciertas variables sean violados. En el caso de estudio, los límites térmicos son utilizados para representar los límites en la transmisión de potencia. Para un número difuso trapezoidal la restricción correspondiente a la rama i está dada por:

$$L_{i\min} \leq L_{i1} \leq L_{i2} \leq L_{i3} \leq L_{i4} \leq L_{i\max} \quad i=1, \dots, nl \quad (6.5)$$

donde:

- $L_{i\min}$ Límite inferior de transferencia de potencia.
- $L_{i\max}$ Límite superior de transferencia de potencia.
- $L_{i1} \dots L_{i4}$ Puntos de quiebre que representan a la variable difusa.

6.2.5 Solución del problema de despacho económico

El planteamiento del problema de despacho económico utilizado en este capítulo maneja la función objetivo y las restricciones en forma lineal, por lo que se utilizó el método de programación lineal (Simplex) disponible en el toolbox de optimización de MATLAB [13].

El método Simplex es un procedimiento iterativo que busca optimizar el valor de la función objetivo (ec. 5.1) considerando la intersección de $f(G)$ con cada una de las restricciones en forma secuencial (una a la vez), mejorando en cada paso el valor de la función objetivo. Este método utiliza algunas variables complementarias en las restricciones de desigualdad (slack), las cuales convierten las desigualdades en igualdades. Dada la restricción de desigualdad:

$$\sum_{i=1}^n a_{ji} \tilde{G}_i \leq b_j \quad (b_j \geq 0) \quad (6.6)$$

Se agrega la variable s_j para convertir la restricción de desigualdad (ec. (6.6)) en una restricción de igualdad:

$$\sum_{i=1}^n a_{ji} \tilde{G}_i + s_j = b_j \quad (6.7)$$

De tal forma que, si la j -ésima restricción está en el límite, $s_j = 0$.

6.2.6 Resultados

Los resultados que se obtienen del proceso de optimización son funciones de distribución de posibilidad óptimas de generación para cada una de las secciones lineales en que se dividen los generadores, así como funciones de distribución de posibilidad de los flujos de potencia.

Con la ecuación (6.8) se calcula la generación total para cada generador:

$$\tilde{G}_i = \sum_{j=1}^{ns} \tilde{G}_{ij} \quad (6.8)$$

donde:

- \tilde{G}_i Función de distribución de posibilidad del generador i .
- ns Número de secciones lineales en que se divide la función del generador i .
- \tilde{G}_{ij} Función de distribución de posibilidad del generador i sección j .

Se calcula también la función de distribución de posibilidad del costo:

$$\tilde{C}_T = \sum_{i=1}^{ng} \left(\sum_{j=i}^{ns} a_{ij} \cdot \tilde{G}_{ij} \right) \quad (6.9)$$

donde:

- \tilde{C}_T Función de distribución de posibilidad del costo total.
- ng Número de generadores.
- a_{ij} Costo incremental del generador i sección j .

6.3 Índices de robustez y exposición

Cuando se realiza un estudio de flujos óptimos difusos de C.D. y se encuentra una solución factible para todos los diferentes escenarios que se pueden presentar debidos a la incertidumbre de la carga, se puede decir que el sistema es totalmente robusto.

Es posible que en algunas ocasiones exista solución factible solo para combinaciones de cargas con un valor superior a un determinado corte α , ya que para ciertas combinaciones de valores que se encuentren abajo de este corte se pueden violar límites de flujos por líneas o límites de generación. En estos casos se puede decir que el sistema analizado tiene un grado α de exposición y $(1-\alpha)$ de robustez. Este indicador se puede asociar directamente con el elemento de la red que viola sus límites para valores α

inferiores al grado de exposición. Esto nos da información de los elementos críticos del sistema, los cuales deben tener prioridad en estrategias de reforzamiento de la red.

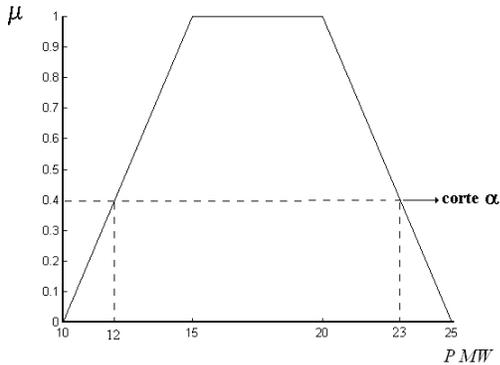


Figura 6.1 Corte α de una variable difusa trapezoidal

En la figura 5.1 se observa una función de distribución de posibilidad trapezoidal de una inyección de potencia (carga), que originalmente se describe por sus cuatro puntos de quiebre $\tilde{P} = (10,15,20,25)$; debido a que para ciertas combinaciones de valores que se encuentran debajo del corte $\alpha = 0.4$ no existe solución de flujos factible, este sistema tiene un grado de robustez igual a 0.6 y un grado de exposición igual a 0.4.

6.3.1 Cálculo de índices de robustez y exposición

Los índices de robustez y exposición de un sistema eléctrico se pueden calcular realizando varios estudios de flujos óptimos de C.D. difusos para diferentes niveles α . Primero se realiza un estudio para el nivel $\alpha=0$, si se encuentra solución factible el sistema es totalmente robusto, si no, se puede analizar el nivel $\alpha=1$, si no encuentra solución, el sistema ni siquiera puede garantizar la solución para las combinaciones de carga con más alto nivel de posibilidad, por lo que se considera totalmente expuesto (inseguro). Si se encuentra solución para $\alpha=1$ se realiza otro estudio para $\alpha=0.5$, y se continua con este proceso iterativo hasta que se encuentra el punto frontera (con una

precisión preestablecida) entre la no solución y la solución factible. Este nivel α es el que indica los índices de robustez y exposición.

6.3.2 Incremento de la robustez en un sistema

Para poder incrementar el índice de robustez de un sistema es necesario primeramente identificar la restricción o restricciones cuya violación es la responsable del índice obtenido, esto se puede lograr realizando un estudio para un nivel α con un valor muy cercano, pero inferior, al índice de exposición. El estudio seguramente no tendrá solución, pero será posible identificar los elementos del sistema donde se están violando límites. El siguiente paso es aumentar o disminuir (dependiendo del caso) estos límites para aumentar la robustez del sistema, se realizan varios estudios modificando límites hasta que se obtiene el índice de robustez deseado. Esto no es fácil en un sistema real, ya que para modificar límites se requiere inversión, pero puede ser una herramienta muy útil en la planeación de sistemas de potencia, ya que se pueden evaluar varios escenarios operativos futuros, identificar puntos problema y destinar los recursos de una forma más adecuada.

6.4 Ejemplo Ilustrativo

Considere el sistema de la figura 6.2:

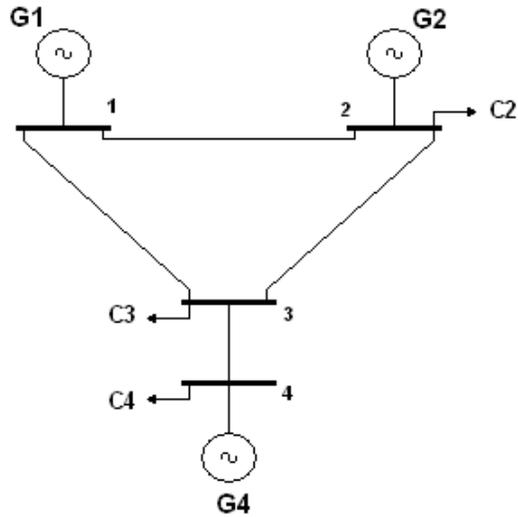


Figura 6.2 Sistema de Prueba.

Los datos del costo de generación se indican en la tabla 6.1:

Tabla 6.1 Datos de Generadores.

Generador	Sección	G_{\min} (MW)	G_{\max} (MW)	Costo Incremental (\$/MW hora)
1	1	20	40	500
1	2	0	20	1000
1	3	0	10	3000
2	1	0	50	1000
2	2	0	30	2000
4	1	10	60	2000
4	2	0	60	3000

Las cargas se representan por números difusos trapezoidales, como se muestra en la tabla 6.2:

Tabla 6.2 Distribución de posibilidad trapezoidal de las cargas.

Nodo i	C_{i1} (MW)	C_{i2} (MW)	C_{i3} (MW)	C_{i4} (MW)
2	105	110	115	125
3	80	90	95	105
4	10	10	10	10
TOT.	195	210	220	240

Los datos de las ramas (líneas y transformadores), incluyendo sus límites de transmisión se indican en la tabla 6.3:

Tabla 6.3 Datos de ramas.

N° de Rama	Nodo Envío	Nodo Recepción	X (p.u.)	P_{max} (MW)
1	1	2	0.0035	50
2	1	3	0.0050	60
3	2	3	0.0060	60
4	3	4	0.0050	90

Después de resolver despacho económico difuso de C.D. (ec. 6.1 – 6.5), se obtiene una función de distribución de posibilidad para cada sección con que se modeló la curva de costo de los generadores, las funciones resultantes se muestran en la tabla 6.4:

Tabla 6.4 Funciones de distribución de posibilidad para cada sección de los generadores.

Generador i	Sección	G_{i1} (MW)	G_{i2} (MW)	G_{i3} (MW)	G_{i4} (MW)
1	1	40	40	40	40
1	2	6	20	20	20
1	3	0	1	10	10
2	1	50	50	50	50
2	2	30	30	30	30
4	1	60	60	60	60
4	2	9	9	10	30

Las funciones de distribución de posibilidad de los generadores se obtienen con la ecuación (6.8), de tal forma que:

$$\tilde{G}_1 = (46,61,70,70)$$

$$\tilde{G}_2 = (80,80,80,80)$$

$$\tilde{G}_4 = (69,69,70,90)$$

$$\tilde{G}_{TOT} = (195,210,220,240)$$

Estas potencias de generación cumplen con las restricciones (6.3) y (6.4), es decir, la carga total es igual a la generación total y se mantiene la naturaleza incremental de los conjuntos difusos:

$$\tilde{G}_{TOT} = \tilde{L}_{TOT}$$

Los flujos por las líneas son:

$$\tilde{L}_{1-2} = (18.9655, 33.1034, 38.9655, 50.0000)$$

$$\tilde{L}_{1-3} = (6.0345, 26.8966, 32.0345, 41.0000)$$

$$\tilde{L}_{2-3} = (-10.8621, 1.8966, 5.1724, 9.8276)$$

$$\tilde{L}_{3-4} = (-80.0000, -60.0000, -59.0000, -59.0000)$$

Se observa que también se cumple con la restricción de flujo por las líneas; la figura 6.3 muestra la función de distribución de posibilidad del flujo de potencia que pasa por la línea 2-3.

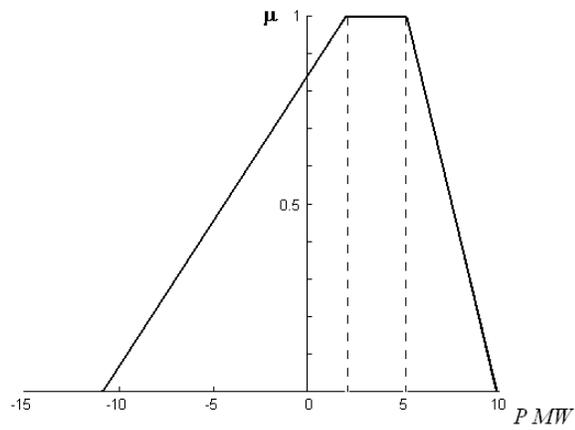


Figura 6.3 Distribución de posibilidad del flujo en la línea 3-4.

Mediante la ecuación (6.9), se calcula la función de distribución de posibilidad del costo, y se muestra en la figura 6.4.

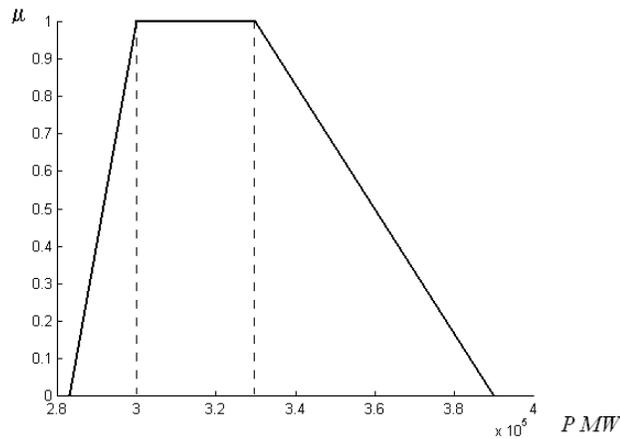


Figura 6.4 Distribución de posibilidad del costo

Esta función de distribución de posibilidad indica que hay mayor posibilidad que el costo óptimo de despacho se encuentre entre \$300,000 y \$330,000, pudiendo alcanzar un costo mínimo de \$283,000 y uno máximo de \$390,000.

El sistema analizado anteriormente tuvo solución factible para el corte $\alpha=0$, por lo que su índice de robustez es 1 y el de exposición es igual a 0. Si el límite de potencia de la línea 4 (nodo 3 a nodo 4) se reduce de 90 a 75 MW, el sistema no tiene solución factible para $\alpha=0$, esto se puede deducir fácilmente, ya que la carga máxima en nodo 2 y nodo 3 suman 230 MW, y la generación máxima en G1 y G2 es de 150 MW, por lo tanto, si la carga toma su valor máximo posible se requiere transmitir 80 MW por la línea 4, y esta solo puede transmitir 75 MW. Se utilizó el proceso iterativo mencionado anteriormente para evaluar los índices de exposición y robustez. El resultado fue:

- Índice de Exposición: $\alpha=0.25$
- Índice de Robustez: $1-\alpha=0.75$

Se tiene una solución factible garantizada para cualquier combinación de valores de cargas que estén contenidas en el subconjunto $\geq \alpha$, como se ilustra en la figura 6.5.

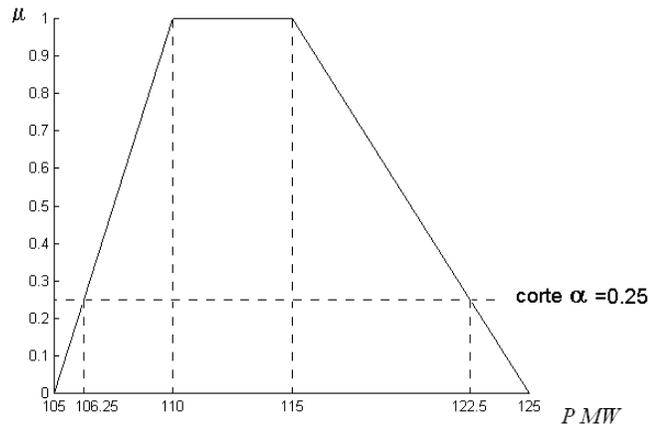


Figura 6.5 Corte α de la carga en el nodo 2

6.5 Expansión de la Herramienta Flujos Óptimos Difusos de C.D.

En este capítulo se describe una metodología para modelar la incertidumbre en cargas mediante variables difusas como una primera aproximación para la solución de Flujos Óptimos de C.D., esto con el fin de presentar una herramienta de uso general que arroja como resultado, además de las funciones de distribución de posibilidad de flujos en la líneas, una función de distribución de posibilidad del costo óptimo, con la limitante que se consideran conocidos los costos incrementales para los diferentes niveles de carga de los generadores.

Es importante, a fin de obtener una herramienta más completa, incorporar al algoritmo la forma de modelar incertidumbre en los costos incrementales de los generadores [18], ya que estos costos son muy volátiles debido a su dependencia de un

gran número de variables, como precio del combustible, nivel de demanda, disponibilidad de elementos del sistema, etc.

Actualmente hay trabajos de investigación en desarrollo [18] que proponen modelar la incertidumbre en cargas en el *eje y* de la función de la variable difusa, y en el *eje x* la incertidumbre en los costos incrementales de los generadores, quedando una variable difusa de tres dimensiones, se indican las regiones factibles y las regiones críticas de la solución. En la figura 6.6 se muestra la representación de una variable difusa que integra dos parámetros, los posibles valores de la carga 1 (Δ_1) contra la función de costo en el generador 2 (Φ_2), se muestra también la región factible (R0) y las regiones críticas (R1, R2 y R3)

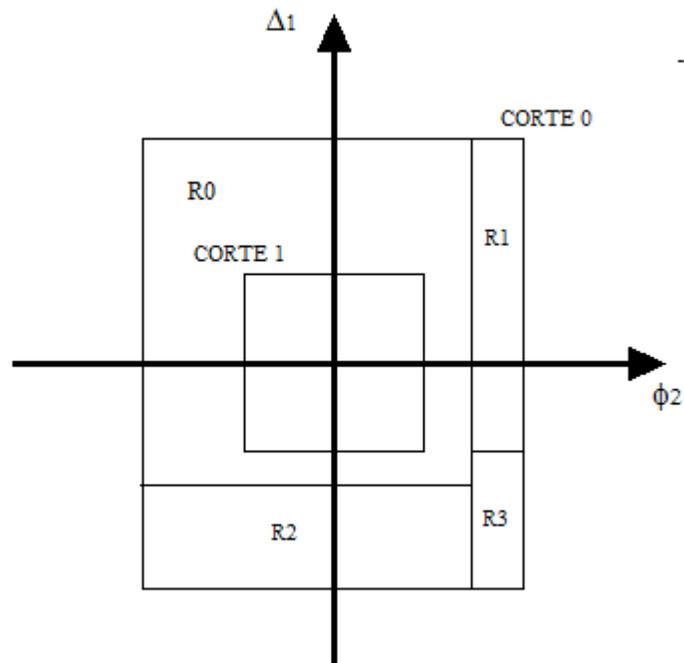


Figura 6.6 Variable difusa que integra dos parámetros

De esta manera en un problema multinodal se pueden representar las variables difusas de los diferentes flujos y cargas contra los costos incrementales con incertidumbre, obteniendo regiones críticas y factibles.

CAPÍTULO VII

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

7.1 Conclusiones

En este capítulo se presentan las conclusiones de la tesis, además se muestran las aportaciones más importantes y se incluyen recomendaciones sobre trabajos futuros.

7.1.1 Conjuntos difusos

- Los conjuntos difusos se pueden interpretar como una extensión de los conjuntos clásicos, en los cuales existe un número infinito de grados de membresía y la transición entre la *no membresía* y la *membresía total* es difusa (vaga).
- Las variables difusas son conjuntos difusos definidos en los números reales y con función de membresía continua por partes, por lo que se simplifica la manera de realizar operaciones con ellos.

- Un corte α de una variable difusa es el conjunto de elementos con un nivel de membresía mayor o igual a α .
- Se pueden resolver operaciones aritméticas con variables difusas utilizando aritmética de intervalos, asociando cada punto de quiebre del conjunto con un nivel o corte α , y considerando un intervalo cerrado por cada uno de estos niveles.

7.1.2 Flujos de potencia difusos

- Los datos de entrada para un estudio de flujos determinístico están sujetos a errores, los cuales afectan la solución del mismo. La solución será tan precisa como lo sean sus datos de entrada.
- Es posible modelar mediante variables difusas los datos de entrada de un estudio de flujos de potencia, asociando el nivel o grado de membresía de cada elemento del conjunto a un nivel o grado de posibilidad de ocurrencia.
- Para obtener la solución de flujos de potencia y ángulos nodales es importante expresarlos en función de las variables de entrada independientes, no se deben utilizar inversas aditivas o multiplicativas, ya que se incrementaría la incertidumbre de la solución.

7.1.3 Flujos de potencia difusos de CA

- La incertidumbre en las inyecciones de potencia, tanto activa como reactiva, se puede modelar mediante variables difusas, asociadas a funciones de distribución de posibilidad.
- Mediante un algoritmo difuso se obtienen las funciones de distribución de posibilidad de ángulos y voltajes nodales, así como de flujos de potencia activa y reactiva por las líneas del sistema.
- Es posible utilizar cualquier método de iterativo de flujos para resolver el estudio difuso, como desacoplado, desacoplado rápido, Newton- Raphson, etc.

- La interpretación de resultados es simple y directa, con una descripción gráfica de la variabilidad y posibilidad de los valores de flujos de potencia, voltajes y ángulos nodales.
- Es necesario evaluar la incertidumbre con coeficientes de sensibilidad que relacionen directamente los flujos de potencia con las inyecciones de potencia nodales, con el fin reducir la incertidumbre de la solución.
- Los resultados de un estudio difuso tendrán un error inherente a la linealización que se utiliza en el proceso de solución. No se recomienda utilizar este método cuando la incertidumbre sea muy grande.

7.1.4 Flujos óptimos difusos de CD

- Incorporando la teoría de conjuntos difusos a los métodos tradicionales de flujos óptimos de C.D. es posible modelar la incertidumbre en la carga y encontrar un despacho óptimo con su incertidumbre asociada.
- En un estudio difuso de flujos óptimos es posible encontrar índices de robustez y exposición para medir la confiabilidad del sistema e identificar elementos críticos de la red.
- Además de las funciones de distribución de posibilidad de flujos en líneas, el estudio genera una función óptima del costo total y funciones de distribución de posibilidad de costo y generación para cada unidad generadora.

7.2 Aportaciones de la tesis

Las aportaciones de este trabajo son las siguientes:

- Análisis de una alternativa diferente para modelar la incertidumbre en las inyecciones de potencia con una descripción gráfica que facilita su interpretación.

- Desarrollo y prueba de un algoritmo para el estudio de flujo difuso lineal, donde se modela la incertidumbre en las inyecciones de potencia mediante variables difusas.
- Desarrollo y prueba de un algoritmo para el estudio de flujo difuso de CA, donde se obtienen funciones de distribución de posibilidad para flujos de potencia, tanto activa como reactiva, así como para magnitudes de voltaje y ángulos nodales.
- Desarrollo y prueba de la extensión del estudio de flujos óptimos de CD a un estudio difuso. Se presentó una alternativa para manejar la incertidumbre en las inyecciones de potencia activa y obtener las distribuciones de posibilidad óptimas de los generadores y flujos de potencia.

7.3 Recomendaciones para trabajos futuros

- Evaluar el comportamiento del estudio de flujo difuso de C.A. en sistemas reales.
- Desarrollar una formulación del estudio de flujo difuso de C.A. que incluya los controles típicos en estos estudios.
- Investigar la manera de manejar una función de distribución de posibilidad en la magnitud del voltaje en los nodos de voltaje controlado.
- Analizar y proponer modelos más complejos de flujos óptimos difusos y sus aplicaciones en la operación y planificación de sistemas eléctricos.

REFERENCIAS

- [1] Florencio Aboytes García, “Análisis de Sistemas de Potencia”, Comisión Federal de Electricidad, Universidad Autónoma de Nuevo León, Monterrey, Nuevo León, México, 1990.

- [2] John J. Grainger, William D. Stevenson Jr., “Análisis Eléctricos de Potencia”, McGraw-Hill, Inc., México, 1996.

- [3] Joao Tomé Saraiva, “Fuzzy Sets – Basics”, JIASE 99, julio de 1999.

- [4] Joao Tomé Saraiva, “Intergration of Load Uncertainties in Marginal Pricing Calculation”, JIASE 99, Julio de 1999.

- [5] J.A. Momoh, K. Tomsovic, “Overview and Literature survey of Fuzzy Sets Theory in Power Systems”, IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 10, No. 3, August 1995, pag. 1676 – 1690.

- [6] Zian Wang, Fernando L. Alvarado, “Interval Arithmetic in Power Flow Analysis”, IEEE Transaction on Power Systems, Vol 7, No. 3, August 1992, pag. 1341 – 1349.

- [7] M. Flam, A. M. Sasson, “Stochastic Load Flow – Decoupled Implementation”, Trans PWRS 1977, Summer Meeting, México City.

- [8] R.N. Allan, B. Borkowska, C.H. Grigg, “Probabilistic Analysis of Power Flow” PROC IEE Vol 121, No. 12, December 1974.

- [9] F. Aboytes, “Tópicos Selectos Curso de Análisis de Sistemas de Potencia”, FIME UANL, Enero 2000.
- [10] V. Miranda, J. T. Saraiva, “Fuzzy Modelling of Power System Optimal Load Flow”, IEEE Transaction on Power Systems, Vol. 7, No. 2, Mayo 1992.
- [11] L. A. Zadeh, “Fuzzy Sets”, Information and Control, 8, 338 (1965).
- [12] Allen J. Wood, Bruce F. Wollenberg, “Power Generation Operation and Control”, Second Edition, John Wiley and Sons, New York, 1996.
- [13] Thomas F. Coleman, Mary Ann Branch, Andrew Grace, “Optimization Toolbox User’s Guide”, The Math Works, Inc., January 1999.
- [14] R. A. M. Van Amerongen, “A General – Purpose Version of the Fast Decoupled Loadflow”, IEEE/PES, Summer Meeting, Portland, Oregon, 24 – 29 Julio, 1988.
- [15] J. Tomé Saraiva, Vladimiro Miranda, L.M.V.G. Pinto, "Generation/ Transmission Power System Reliability Evaluation by Monte-Carlo Simulation Assuming a Fuzzy Load Description", Proceedings of PICA'95 - Power Industry Computer Applications, Mayo 1995.
- [16] M. Pereira, M. Maceira, P. Oliveira, L. M. V. G. Pinto, “Combining Analytical Models and Monte – Carlo Techniques in probabilistic Power System Analysis”, IEEE Trans. PWRS, vol 7, n° 1, Febrero 1992.
- [17] M. Cortés-Carmona, R. Palma-Behnke, G. Jiménez-Estevez, “Fuzzy Arithmetic for DC Load Flow”, IEEE Trans. PWRS, vol 25, n° 1, Febrero 2010.
- [18] B. André, J. Tomé Saraiva, “Calculation of Nodal Marginal Prices Considering Load and Generation Price Uncertainties”, IEEE Power Tech, Lausanne 2007.

[19]P. R. Bijwe, M. Hanmandlu, V. N. Pande “Fuzzy Power Flow Solution with Reactive Limits and Multiple Uncertainties”, Elect Power Systems. Res., vol 76, 2005.

[20]J. Tomé Saraiva, F. Duarte, “Enhanced Fuzzy Power Flow Models Integrating Correlation between Nodal Injections”, 8th Int. Conf. Probabilistic Methods Applied to Power Systems, Sept 2004.

A P É N D I C E A

PARÁMETROS DE SISTEMAS DE PRUEBA UTILIZADOS

I.- Parámetros de sistemas de prueba

Tabla A.1. Parámetros de sistema de prueba (Capítulo III, Capítulo V)

Nodo envío	Nodo recepción	X (p.u.)
1	2	0.06000
1	3	0.24000
2	3	0.18000
2	4	0.18000
2	5	0.12000
3	4	0.03000
4	5	0.24000

Tabla A.2. Parámetros de sistema de prueba (Capítulo IV)

Nodo envío	Nodo recepción	R	X	Y/2
1	2	0.01000	0.0500	0.051000
1	3	0.00800	0.0320	0.038000
2	3	0.00501	0.0200	0.012000
2	4	0.00800	0.0320	0.038000
3	4	0.00272	0.0436	0.063750

Tabla A.3. Parámetros de sistema de prueba II (Capítulo V)

Nodo envío	Nodo recepción	X (p.u.)
1	2	0.4
1	4	0.1
2	3	0.2
3	4	0.5

Tabla A.4. Parámetros de sistema de prueba III (Capítulo V)

Nodo envío	Nodo recepción	R	X	Y/2
1	3	0.0053	0.0296	0.0086
1	5	0.0075	0.0416	0.003
1	8	0.0047	0.0258	0.0019
1	12	0.0372	0.2129	0.0586
1	18	0.0372	0.2129	0.0516
1	19	0.0744	0.4257	0.0293
1	24	0	0.0292	0
2	4	0.0165	0.0415	0.0026
2	10	0.0045	0.0213	0.0014
2	13	0.0054	0.0291	0.0022
2	14	0.0018	0.0098	0.0007
3	7	0.0032	0.0175	0.005
3	15	0.0063	0.0349	0.0025
3	17	0.087	0.2202	0.0137
3	23	0	0.0638	0
4	5	0.0105	0.0263	0.0017
4	6	0.0042	0.0238	0.0016
4	9	0.0029	0.0168	0.0011
4	11	0.0404	0.1038	0.0249
4	20	0	0.025	0
5	8	0.0038	0.0212	0.0015
5	9	0.001	0.0035	0.0002
5	16	0.2028	0.5158	0.0323
6	10	0.0035	0.0113	0.0011
7	13	0.0108	0.059	0.0044
7	14	0.0084	0.0466	0.0034
10	13	0.0027	0.0157	0.0042
10	22	0	0.025	0
11	16	0.0685	0.2478	0.061
20	21	0.001	0.008	0.0312
20	24	0.0047	0.036	0.0378
21	22	0.0007	0.0053	0.044
22	23	0.0009	0.0067	0.0275
23	24	0.0013	0.0086	0.0326

Tabla A.5 Parámetros de sistema de prueba IV(Capítulo V)

Nodo envío	Nodo recepción	R	X	Y/2
1	2	0.0050	0.0500	0.015
1	5	0.0045	0.0450	0.010
2	3	0.0022	0.0220	0.012
3	4	0.0030	0.0300	0.010
4	5	0.0028	0.0280	0.008

A P É N D I C E B

FORMACIÓN DE JACOBIANO Y RESUMEN DE DERIVADAS PARCIALES UTILIZADAS PARA OBTENER COEFICIENTES DE SENSITIVIDAD

B.1. Formación del Jacobiano:

El Jacobiano es una matriz cuadrada de derivadas parciales de dimensión $(2*N-NVC)$, donde N representa el número de nodos y NVC el número de nodos de voltaje controlado, indica el cambio en las inyecciones de potencia para un cambio pequeño en ángulos y magnitudes de voltaje nodales. Como el ángulo en el nodo compensador y los voltajes en los nodos de voltaje controlado no cambian, se eliminan los renglones y columnas que los involucren, quedando una matriz con la siguiente estructura:

$$\begin{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{\partial P_2}{\partial \delta_2} & \dots & \frac{\partial P_2}{\partial \delta_N} \\ \vdots & J_{11} & \vdots \\ \frac{\partial P_N}{\partial \delta_2} & \dots & \frac{\partial P_N}{\partial \delta_N} \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} \frac{\partial P_2}{\partial |V_2|} & \dots & \frac{\partial P_2}{\partial |V_{N-NVC}|} \\ \vdots & J_{12} & \vdots \\ \frac{\partial P_N}{\partial |V_2|} & \dots & \frac{\partial P_N}{\partial |V_{N-NVC}|} \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} \frac{\partial Q_2}{\partial \delta_2} & \dots & \frac{\partial Q_2}{\partial \delta_N} \\ \vdots & J_{21} & \vdots \\ \frac{\partial Q_{N-NVC}}{\partial \delta_2} & \dots & \frac{\partial Q_{N-NVC}}{\partial \delta_N} \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} \frac{\partial Q_2}{\partial |V_2|} & \dots & \frac{\partial Q_2}{\partial |V_{N-NVC}|} \\ \vdots & J_{22} & \vdots \\ \frac{\partial Q_{N-NVC}}{\partial |V_2|} & \dots & \frac{\partial Q_{N-NVC}}{\partial |V_{N-NVC}|} \end{bmatrix} \end{bmatrix}$$

Donde:

$$P_i = |V_i|^2 G_{ii} + \sum_{\substack{n=1 \\ n \neq i}}^N |V_i V_n Y_{in}| \cos(\theta_{in} + \delta_n - \delta_i)$$

$$Q_i = -|V_i|^2 B_{ii} - \sum_{\substack{n=1 \\ n \neq i}}^N |V_i V_n Y_{in}| \sin(\theta_{in} + \delta_n - \delta_i)$$

B.2. Derivadas parciales utilizadas en el Capítulo IV para obtener coeficientes de sensibilidad:

Coefficientes de sensibilidad de flujos de potencia activa:

$$\frac{\partial P_{er}}{\partial |V_e|} = 2G_{er}|V_e| - G_{er}|V_r|\cos(\delta_e - \delta_r) - B_{er}|V_r|\sin(\delta_e - \delta_r)$$

$$\frac{\partial P_{er}}{\partial |V_r|} = -G_{er}|V_e|\cos(\delta_e - \delta_r) - B_{er}|V_e|\sin(\delta_e - \delta_r)$$

$$\frac{\partial P_{er}}{\partial \delta_e} = G_{er}|V_e V_r|\sin(\delta_e - \delta_r) - B_{er}|V_e V_r|\cos(\delta_e - \delta_r)$$

$$\frac{\partial P_{er}}{\partial \delta_r} = -G_{er}|V_e V_r|\sin(\delta_e - \delta_r) + B_{er}|V_e V_r|\cos(\delta_e - \delta_r)$$

Coefficientes de sensibilidad de flujos de potencia reactiva:

$$\frac{\partial Q_{er}}{\partial |V_e|} = -2Y|V_e| - 2B_{er}|V_e| - G_{er}|V_r|\sin(\delta_e - \delta_r) + B_{er}|V_r|\cos(\delta_e - \delta_r)$$

$$\frac{\partial Q_{er}}{\partial |V_r|} = -G_{er}|V_e|\sin(\delta_e - \delta_r) + B_{er}|V_e|\cos(\delta_e - \delta_r)$$

$$\frac{\partial Q_{er}}{\partial \delta_e} = -G_{er}|V_e V_r|\cos(\delta_e - \delta_r) - B_{er}|V_e V_r|\sin(\delta_e - \delta_r)$$

$$\frac{\partial Q_{er}}{\partial \delta_r} = G_{er}|V_e V_r|\cos(\delta_e - \delta_r) + B_{er}|V_e V_r|\sin(\delta_e - \delta_r)$$